

УДК 621.187.121

**Гаращенко В. І., к.т.н., доцент, Гаращенко О. В., к.т.н.**

(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

### **ФЕРИТО-ФЕРОМАГНІТНА ГРАНУЛЬОВАНА ЗАГРУЗКА ДЛЯ МАГНІТНОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ВІД ФЕРОМАГНІТНИХ ДОМІШОК**

**Досліджені фільтраційні та магнітні властивості ферито-ферромагнітної фільтруючої загрузки магнітних фільтрів для очищення рідких середовищ. Встановлені критерії вибору фільтруючих матеріалів. Показано вплив напруженості зовнішнього магнітного поля на величину коефіцієнта осадження.**

**Ключові слова:** феромагнітна фільтруюча загрузка, магнітне очищення, фільтрація.

**Вступ.** Водні середовища котельних установок, теплоелектроцентралей, ДРЕС, АЕС, металургійних виробництв, хімічної технології внаслідок неперервної корозії технологічного обладнання та трубопроводів збагачуються залізовмісними домішками продуктів корозії. Встановлено, що, частка феромагнітної фракції домішок в загальній масі залізовмісних домішок досягає 70-90% [1; 2]. Тому на даних підприємствах використовують ефективні та екологічно безпечні магнітні фільтри з феромагнітною фільтруючою загрузкою. Такі фільтри здатні очищувати середовища з температурою до 500° С, при швидкості фільтрування 100-300 м/год, в окремих випадках до 1000 м/год [1; 2]. Основним робочим органом магнітних фільтрів є феромагнітна фільтруюча загрузка, в об'ємі якої відбувається процес магнітного осадження домішок. Відповідно, в залежності від виду середовища, концентрації та магнітної сприйнятливості домішок потрібні і різні за властивостями фільтруючі загрузки.

**Аналіз існуючих досліджень.** Відомо використання в якості феромагнітних фільтруючих загрузок для магнітних фільтрів кульок, стрижнів, гранул стружки, сіток, сталевого дробу та інших загрузок [1; 2; 3; 7; 8]. Для тонкого очищення воднодисперсних систем і агресивних рідких середовищ хімічної промисловості гранули загрузки легують антикорозійними елементами (Cr, Ni) [3; 10]. Для ефективного осадження високодисперсних домішок в об'ємі феромагнітних загрузок створюють неоднорідність магнітного поля з градієнтом ( $H_{gradH}$ ) величиною порядку ( $1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14} \text{ A}^2/\text{m}^3$ )

З іншої сторони існують такі водні середовища, в яких концентрація залізовмісних домішок становить сотні тисяч мкг/л. Наприклад, концентрація заліза в оборотних водах прокатних станів мета-

лургійних виробництв досягає 120000-160000 мкг/дм<sup>3</sup>. Для очищення таких середовищ необхідні магнітні фільтри з феромагнітною фільтруючою загрузкою, яка б намагнічувалась до необхідного рівня невисокої за значенням напруженості зовнішніх магнітних полів і ефективно регенерувалась.

Регенерація фільтруючої загрузки здійснюється водоповітряною сумішшю при відключенні зовнішнього магнітного поля. В разі використання кульок із сталі ШХ-15 або інших гранул, які виготовленні з високовуглецевих сталей при відключенні поля вся маса такої фільтруючої загрузки зберігає залишкову намагніченість близько 45-65 мТл [2]. Це створює перешкоди для ефективної регенерації фільтруючої загрузки. Виникає необхідність у розробці і використанні спеціальних електричних схем для розмагнічування таких фільтруючих загрузок.

### **Результати досліджень**

Запропонована композиційна ферито-феромагнітна гранульована загрузка для магнітних фільтрів, яка включає гранули фериту і феромагнетика [8; 9]. Така фільтруюча загрузка, при певному співвідношенні одних та інших гранул, має незначну залишкову намагніченість при відсутності зовнішнього магнітного поля. Одночасно, при незначних по величині зовнішніх полях, до  $(0,25-0,35) \cdot 10^5$  А/м величина магнітної проникності і рівень намагніченості фільтруючої загрузки досягає значення, яке забезпечує ефективний рівень очищення водних середовищ. В якості гранул фериту використовували подрібнені гранульовані відходи виробництва феритів, наприклад 2000НМ, 3000НМС, які відносяться до магнітом'яких матеріалів. Ферити є феримагнетиками, які поєднують феромагнітні і напівпровідникові властивості. Питомий опір окремих видів феритів в мільярди разів перевищує опір металевих феромагнетиків, тому у феритів практично відсутні вихрові струми. Елементарна комірка шпінелі зображена на рис. 1 [6].

Комірка шпінелі являє собою куб з ребром  $a=8,5\text{Å}$ . Для зручності цей куб можна розділити на вісім менших кубів з ребрами  $a/2$ , що називають октантами (рис. 1). Структура заштрихованих і світлих октантів відрізняється.

Всього елементарна комірка шпінелі містить вісім „молекул”  $\text{MeFe}_2\text{O}_4$ , тобто 32 іони кисню, 16 іонів заліза і 8 іонів двовалентного металу  $\text{Me}^{2+}$ . Іони кисню утворюють гранецентровану кубічну решітку. В проміжках між іонами кисню знаходяться іони металів (чорні кола), що оточені чотирма або шістьма іонами кисню (світлі кола), як показано на рис. 2.

Кристалічна решітка шпінелі, складається з двох підрешіток: одна з магнітних іонів металів, що знаходяться в тетраедричних

проміжках (підрешітка А), і друга з іонів в октаедричних проміжках (підрешітка В).

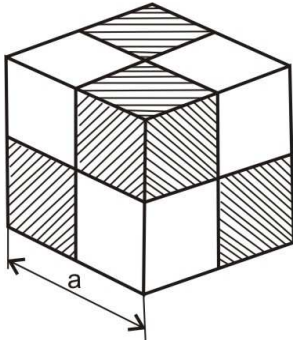


Рис. 1. Схематичне зображення елементарної комірки шпінельної структури

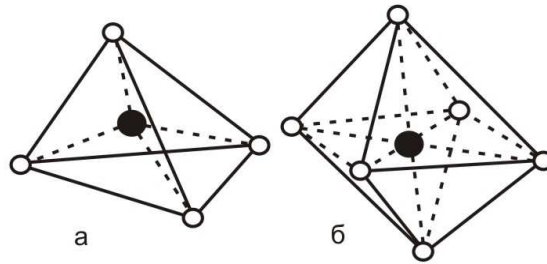


Рис. 2. Схематичне зображення тетраедричного (а) і октаедричного (б) вузлів

В елементарній решітці шпінелі міститься всього 64 тетраедричних і 32 октаедричних місця (пустот). З них зайняті 8 тетраедричних (А-вузли) і 16 октаедричних (В-вузли) місць; 72 місця залишаються вільними. Найближчі сусіди будь-якого магнітного іона в підрешітці А належать підрешітці В.

Між магнітними іонами підрешіток А і В існує сильна негативна взаємодія типу АВ, що призводить до антипаралельного розміщення спінів (магнітних моментів) підрешіток.

Взаємодія типу АА і ВВ в порівнянні з АВ незначна. При рівності магнітних моментів підрешіток А і В має місце антиферромагнетизм. Якщо магнітні моменти А і В не рівні між собою, значить існує феримагнетизм [4; 6].

Для дослідження магнітних властивостей використовували секційний соленоїд. З метою зменшення розмагнічуючого фактора величину геометричного симплекса  $L/d$  зразка встановлювали  $L/d \geq 10$ . Вимірювання виконували імпульсно-індукційним методом з використанням мілівеберметра. Співвідношення між гранулами визначали

коефіцієнтом  $\alpha = \frac{m_k}{m_k + m_\phi}$ ,  $m_k$  – маса феромагнітних кульок,  $m_\phi$  – маса феритових гранул.

Криві намагнічування досліджених ферито-феромагнітних зразків (рис. 3) засвідчують, що при зміні зовнішнього магнітного поля  $H$  від 0 до  $0,25 \cdot 10^5$  А/м, значення величини середньої індукції  $B_c$  в об'ємі гранульованих зразків при різних значеннях коефіцієнта  $\alpha$  співмірні між собою, за виключенням кривої 8. При  $H > 0,75 \cdot 10^5$  А/м спостерігається значне збільшення величини  $B_c$  для фільтруючих загрузок з коефіцієнтом  $\alpha > 0,75$ .

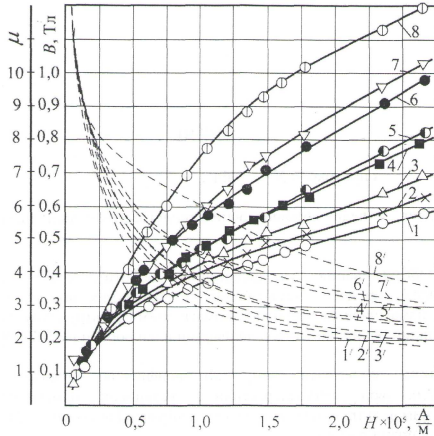


Рис. 3. Криві намагнічування пористих зразків ферито-феромагнітної фільтруючої загрузки;  $\alpha = m_k / (m_k + m_\phi)$   
 $m_k$  – маса феромагнітних кульок;  
 $m_\phi$  – маса феритових гранул. 1 – гранули фериту; 2 –  $\alpha = 0,176$ ; 3 –  $0,305$ ;  
4 –  $0,465$ ; 5 –  $0,625$ ; 6 –  $0,75$ ; 7 –  $0,846$ ;  
8 – феромагнітні кульки з сталі ШХ-15;  
1' – 8' – магнітна проникність

В залежності від  $\alpha = m_k / m_\phi$ , на рис. 4 представлені криві намагнічування і залишкової намагніченості для ферито-феромагнітних пористих зразків. При значеннях  $m_k / m_\phi > 2$ , особливо при  $H \geq 3 \cdot 10^4$  А/м, спостерігається стрибкоподібне зростання величини  $B_c$ . При  $\alpha \geq 3$  зростання величини  $B_c$  незначне, в межах 0,5-1,5%.

Вимірювалась залишкова намагніченість  $B_3$  ферито-феромагнітних пористих зразків. При зміні  $\alpha$  від 0,214 до 0,869 величина залишкової намагніченості  $B_3$  при  $H = 3$  і  $6 \cdot 10^4$  А/м змінюється від 0 до 0,007 Тл, а при  $H = 8,8 \cdot 10^4$  А/м, величина  $B_3$  складає 0,017 Тл. Збільшення величини залишкової намагніченості  $B_3$  спостерігається при зміні  $\alpha$  від 0,869 до 3. В цьому діапазоні зміни  $\alpha$  величина  $B_3$  зростає до 0,015 Тл при  $H = 3 \cdot 10^4$  А/м, та  $B_3 = 0,032$  Тл при  $H_0 = 8,8 \cdot 10^4$  А/м. Слід зазначити, що величина залишкової намагніченості  $B_3$  ферито-феромагнітного пористого зразка в 2-4 рази менша від  $B_3$  кулькового феромагнітного зразка з сталі ШХ-15 [5; 6; 9].

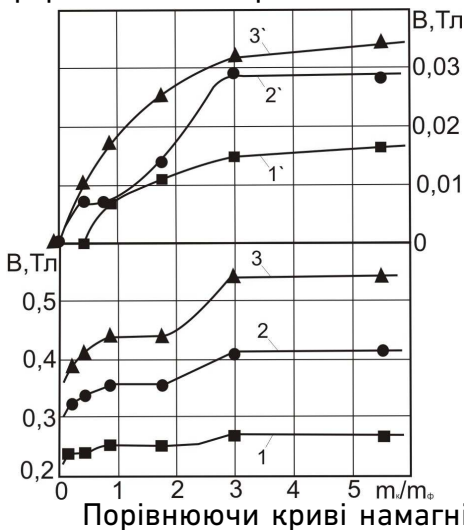


Рис. 4. Криві намагнічування (1-3) і залишкової намагніченості (1'-3') ферито-феромагнітного фільтруючого матеріалу в залежності від  $\alpha = m_k / m_\phi$ , при різних значеннях напруженості поля:  
1-1' –  $3 \cdot 10^4$  А/м; 2-2' –  $6 \cdot 10^4$  А/м;  
3-3' –  $8,8 \cdot 10^4$  А/м

ченості ферито-феромагнітного фільтруючого матеріалу, можна зробити висновок, що рекомендованою величиною  $m_k/m_\phi$  можна вважати величину, що знаходиться в діапазоні  $0,9 \leq m_k/m_\phi \leq 3$ .

Досліджувались фільтраційні властивості загрузок: феритової, ферито-феромагнітної, фeroмагнітної.

Дослідження виконували за методикою описаною в [2]. Використовували технологічну воду одного з промислових виробництв. Вихідна концентрація заліза у воді складала в середньому 77 мг/л. Залежність коефіцієнта осадження  $\psi=f(H)$  зображена на рис. 5. Інтенсивне осадження дисперсної фази домішок заліза в об'ємі намагнічених загрузок спостерігається при зміні напруженості  $H$  магнітного поля від 0 до 20 кА/м (рис. 5). При  $H > 30$  кА/м зростання коефіцієнта осадження незначне. Так, при зміні  $H$  від 30 до 50 кА/м, для феритової загрузки величина  $\psi$  збільшується на 10,9% (рис. 5, крива 1), для ферито-феромагнітної – на 8%, для кулькової – на 2% (рис. 5, криві 2, 3).

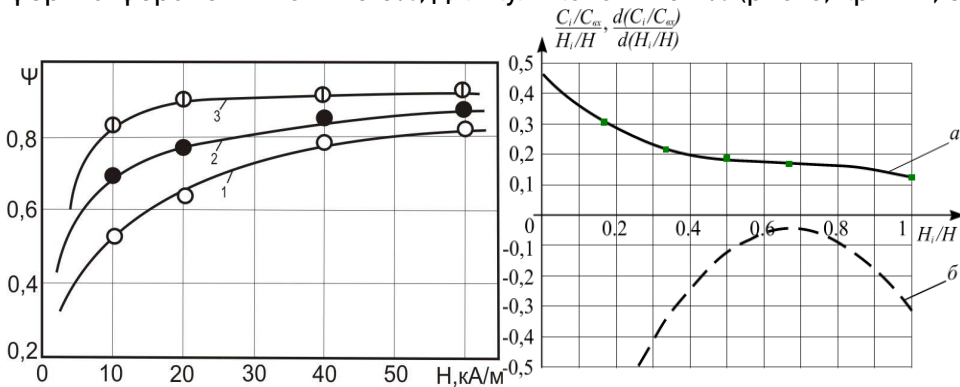


Рис. 5. Залежність коефіцієнта осадження від напруженості магнітного поля ( $L=0,33$  м,  $V=250$  м/ч.)  $L$  – висота намагніченої загрузки;  $V$  – швидкість середовища, що фільтрується: 1 – гранули фериту; 2 – ферито-феромагнітні гранули; 3 – гранули фeroмагнетика (кульки ШХ-15)

Рис. 6. Залежність відносної (а) і диференціальної (б) величини концентрації заліза від величини відносної напруженості магнітного поля:  $P=0,6$ ;  $V=250$  м/г.;  $L=0,33$  м; ( $P$  – щільність пакування гранул загрузки)

Зауважимо, що вже при  $H=30-40$  кА/м, коефіцієнт осадження для ферито-феромагнітної загрузки досягає 0,81-0,85. Це значення коефіцієнта  $\psi$  достатнє для забезпечення необхідного рівня очищення воднодисперсної системи від фeroмагнітних домішок. Обробка результатів досліджень по впливу відносного значення  $H_i/H$  на ве-

личини  $\frac{C_i/C_{ex}}{H_i/H}$  і  $\frac{d(C_i/C_{ex})}{d(H_i/H)}$  показує характер зміни концентрації домішок заліза в процесі очищення при зміні напруженості зовнішнього магнітного поля (рис. 6).

Вищевказані величини описуються поліноміальними рівняннями

$$\frac{C_i/C_{ex}}{H_i/H} = -0,8646 \cdot \left(\frac{H_i}{H}\right)^3 + 1,7540 \cdot \left(\frac{H_i}{H}\right)^2 - 1,2315 \cdot \left(\frac{H_i}{H}\right) + 0,4699,$$

(R<sup>2</sup>=0,998)

$$\frac{d(C_i/C_{ex})}{d(H_i/H)} = -2,5937 \cdot \left(\frac{H_i}{H}\right)^2 + 3,5079 \cdot \left(\frac{H_i}{H}\right) - 1,2315,$$

де  $H_i, H$  – локальне і максимальне значення напруженості поля;  $C_i, C_{ex}$  – локальне і значення концентрації заліза на вході магнітного фільтра.

Найбільша інтенсивність зменшення концентрації домішок заліза приходить на діапазон зміни  $H_i/H$  від 0,17 до 0,5. Видно (рис. 6), що зона максимального осадження домішок приходить на величину  $\frac{d(C_i/C_{ex})}{d(H_i/H)} = -0,0454$ . Це відповідає  $H_i/H = 0,6762$  і  $\frac{C_i/C_{ex}}{H_i/H} = 0,1718$ . При досягненні часу захисної дії загрузки, тобто часу, при якому намагнічена феромагнітна фільтруюча загрузка максимально насичується осадженими домішками, виконують регенерацію без додаткового розмагнічування.

В залежності від виду воднодисперсного середовища, що очищується (малоконцентроване чи багатоконцентроване) та магнітної сприйнятливості домішок (феромагнітні, феримагнітні, парамагнітні) по величині  $\alpha$  підбирається ферито-феромагнітна фільтруюча загрузка з необхідними магнітними, а відповідно фільтраційними і регенераційними властивостями.

**Висновки.** Досліджені магнітні властивості композиційної гранульованої загрузки магнітних фільтрів. Показано вплив співвідношення мас гранул феромагнетика і феримагнетика на величину середньої індукції магнітного поля в об'ємі загрузки. На основі досліджень рекомендовані критерії для вибору ферито-феромагнітних фільтруючих матеріалів. Показано вплив напруженості зовнішнього магнітного поля на коефіцієнт осадження феродомішок у феромагні-

тній, феритовій і ферито-феромагнітній фільтруючих загрузках.

1. Магніто-сорбційні властивості гранульованих фільтруючих насадок / В. І. Гаращенко, І. Г. Скрипник, О. П. Лук'янчук, О. В. Гаращенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування – 2008. – № 3(43). – С. 184–191.
2. Сандуляк А. В. Электромагнитные фильтр-осадители. Монография / Сандуляк А. В., Гаращенко В. И. – Львов : Вища школа, 1982. – 70 с.
3. Гаращенко В. І. Екологічно безпечний метод очистки текучих середовищ в намагнічених полі градієнтних насадках / В. І. Гаращенко // Проблеми фундаментальної і прикладної екології, екологічної геології і раціонального природокористування: IV Міжнародна науково-практична конференція, 19-21.03.2009 р.: тези доп. – Кривий Ріг, 2009. – С. 125–127.
4. Гаращенко В. І. Намагнічування феримагнітної гранульованої фільтруючої насадки / В. І. Гаращенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Рівне, 2008. – Вип. № 4(44). – С. 348–355.
5. Гаращенко В. І. Магнітні властивості феромагнітних пористих структур / В. І. Гаращенко / Фізика неупорядкованих систем: IV міжнар. наук. конф., 14-16 жовтня 2008 р.: тези доп. – Львів, 2008. – С. 162.
6. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы / Преображенский А. А., Бишард Е. Г. – М. : Высшая школа, 1986. – 351 с.
7. А.С. 1721892 А2 СССР „МКИ” В03 С1/00. Насадка в устройствах для магнитного осаждения / В. И. Гаращенко, Е. К. Ким (СССР). № 4855436/03 заявл. 26.07.90: Зарегистрировано в Г.Р.И. СССР 22.11.1992 ДСП.
8. А.С. 1155295 А СССР „МКИ” В03 С1/00. Насадка в устройствах для магнитного разделения / В. И. Гаращенко, А. В. Сандуляк, Р. Д. Бартосевич, В. Д. Довганюк (СССР). № 3640728/22-03 заявл. 9.09.1983. Зарегистрировано в Г.Р.И. СССР 15.01.1985 Т.
9. Магнитные свойства пористых насадок электромагнитных фильтров / А. В. Сандуляк, В. И. Гаращенко, В. Д. Довганюк, В. М. Арсенюк // Энергетика и электрификация. – 1982. – № 3. – С. 31–34.
10. Гаращенко В. І. Поліградієнтні феромагнітні матеріали для очистки водно-дисперсних середовищ / В. І. Гаращенко // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів: VII Всеукраїнська науково-технічна конференція, 7-9.11.2008 р.: тези доп. – Кременчук, 2008. – С. 137.

Рецензент: с.н.с., к.т.н. Яцков М. В. (НУВГП)

---

**Harashchenko V. I., Candidate of Engineering, Associate Professor,**  
**Harashchenko O. V., Candidate of Engineering** (National University of  
Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **FERRITO-FERROMAGNETIC GRANULAR NOZZLE FOR MAGNETIC PURIFICATION OF WATER ENVIRONMENTS FROM FERROMAGNETIC ADMIXTURES**

**Filtration and magnetic properties of ferrito-ferromagnetic filtering nozzle of magnetic filters was researched. The criteria for selection of filter materials was found. It was shown the influence of the external magnetic field on the rate of deposition.**

***Keywords:* ferromagnetic filtering nozzle, magnetic purification, filtration.**

---

**Гаращенко В. И., к.т.н., доцент, Гаращенко А. В., к.т.н.**  
(Национальный университет водного хозяйства и  
природопользования, г. Ровно)

## **ФЕРРИТО-ФЕРРОМАГНИТНАЯ ГРАНУЛИРОВАННАЯ ЗАГРУЗКА ДЛЯ МАГНИТНОЙ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД ОТ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ**

**Исследованы фильтрационные и магнитные свойства феррито-ферромагнитной фильтрующей загрузки магнитных фильтров для очистки жидких сред. Установлены критерии выбора фильтрующих материалов. Показано влияние напряженности внешнего магнитного поля на величину коэффициента осаждения.**

***Ключевые слова:* ферромагнитная фильтрующая загрузка, магнитная очистка, фильтрация.**

---