

УДК 621.187.121

В. Гаращенко, канд. техн. наук; О. Гаращенко

Національний університет водного господарства та природокористування

НАМАГНІЧУВАННЯ ФЕРИТО-ФЕРОМАГНІТНИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ ФІЛЬТРУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Резюме. Досліджено магнітні властивості ферито-ферромагнітного фільтруючого матеріалу магнітних фільтрів для очищення рідких середовищ. Встановлено критерії вибору фільтруючих матеріалів. Аналітично описано криві намагнічування.

Ключові слова: ферромагнітний фільтруючий матеріал; магнітне очищення; осадження домішок у магнітному полі.

V.Garashchenko, O.Garashchenko

MAGNETIZING FERRIT-FERROMAGNETIC GRANULAR FILTERING MATERIALS

The summary. Magnetic properties of ferito-ferromagnetic filtering material of magnetic filters for cleaning of liquid environments were investigated. The criteria of choice of filtering materials were determined. The magnetizings curves were analytically described.

Key words: ferromagnetic filtering material; magnetic purification; besieging of admixtures in the magnetic field.

Вступ. У різних галузях промисловості для очищення рідких середовищ, у тому числі водно-дисперсних систем, використовують ефективні та екологічно безпечні магнітні фільтри з ферромагнітним пористим фільтруючим матеріалом. Такі фільтри здатні очищувати середовища з температурою до 500°C, швидкістю фільтрування 100-300м/год, в окремих випадках до 1000м/год [1,2]. Основним робочим органом магнітних фільтрів є ферромагнітний фільтруючий матеріал, в об'ємі якого відбувається процес магнітного осадження домішок. Для різних середовищ (рідких, газових), що потребують очищення, як, наприклад, малоконцентровані, багатоконцентровані, з домішками, що мають сильно або слабо виражені ферромагнітні властивості, відповідно, потрібні й різні за властивостями фільтруючі матеріали.

Аналіз існуючих досліджень. Відомо використання в якості ферромагнітних фільтруючих матеріалів для магнітних фільтрів кульок, стрижнів, гранул стружки, сіток, сталевго дробу, які створюють поліградієнтні пористі середовища [1, 2, 3]. Фільтруючі матеріали, що містять у собі антикорозійні леговані добавки використовують переважно для тонкого очищення малоконцентрованих водно-дисперсних систем, в яких ферромагнітні домішки мають високий ступінь дисперсності. Для ефективного осадження домішок малоконцентрованих систем необхідно в поліградієнтних фільтруючих матеріалах створювати неоднорідність магнітного поля з градієнтом (H_{grad}) порядку $1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14} \text{ A}^2/\text{m}^3$. Ця умова забезпечується при напруженості зовнішнього магнітного поля $6-8 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ і більше, щільності пакування гранул фільтруючого матеріалу порядку 0,5 – 0,7 та високих магнітних властивостях матеріалу гранул фільтруючого матеріалу.

Особливістю магнітних властивостей окремих феромагнітних фільтруючих матеріалів є те, що при відключенні зовнішнього магнітного поля вони зберігають залишкову намагніченість значної величини, наприклад, кульки зі сталі ШХ-15 мають залишкову намагніченість 45–65 мТл. [2] Це створює перешкоди для ефективної регенерації кулькового фільтруючого матеріалу. Виникає необхідність у розробленні й використанні спеціальних електричних схем для розмагнічування таких фільтруючих матеріалів.

Постановка завдання. Розглянемо магнітні властивості феромагнітних і феритових фільтруючих матеріалів. Визначальним параметром, що характеризує магнітні властивості, є величина середньої індукції B_c в об'ємі пористого феромагнітного матеріалу залежно від напруженості H_3 зовнішнього магнітного поля $B_c=f(H_3)$. На основі цих параметрів розраховується відносна магнітна проникність, розмагнічуючий фактор, градієнт поля ($H_{grad}H$), силовий фактор, залишкова намагніченість. Намагнічування пористих зразків фільтруючих матеріалів здійснювали в секційному соленоїді. Для зменшення впливу розмагнічуючого фактора величину геометричного симплексу L/d зразка встановлювали $L/d > 10$ [2,4]. При такому значенні L/d , магнітне поле соленоїда однорідне. Вимірювання виконували імпульсно-індукційним методом із використанням мілівеберметра.

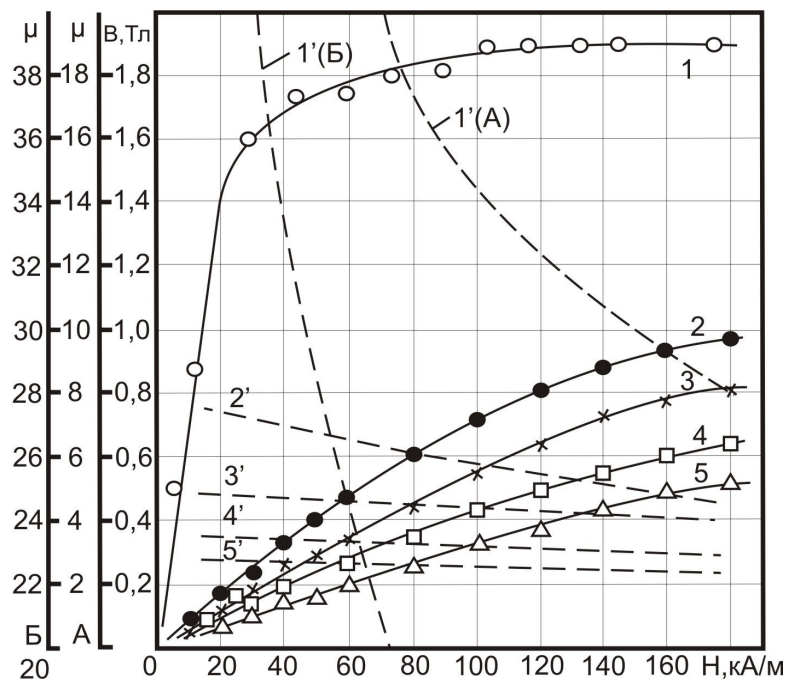


Рисунок 1. Криві намагнічування зразків кулькового феромагнітного фільтруючого матеріалу зі сталі ШХ-15 при різній щільності пакування:
1 – суцільний зразок зі сталі ШХ-15; 2 – 0,58; 3 – 0,5; 4 – 0,4; 5 – 0,3;

Виклад основних результатів. Криві намагнічування кулькового феромагнітного пористого матеріалу, при різній щільності пакування гранул, що зображені на рис. 1, засвідчують, що в магнітному полі при $H_3=0-6,0 \cdot 10^4$ А/м (криві 2,3,4) і при $H_3=0-8,0 \cdot 10^4$ А/м (крива 5) спостерігається практично лінійна залежність $B_c=f(H_3)$. При $H_3 > 8,0 \cdot 10^4$ А/м залежність $B_c=f(H_3)$ нелінійна. Зауважимо, що магнітна проникність μ для зразків при $H_3=2,0 \cdot 10^4$ А/м досягає значення $\mu=7,2$ (крива 2), для зразка 3 $\mu=5,0$. Для суцільного зразка феромагнітного матеріалу, з якого виготовлені кульки, при

$H_3=2,0 \cdot 10^4$ А/м величина μ складає ≈ 75 (рис. 1). При величині напруженості поля $H_3 > 3,0 \cdot 10^4$ А/м спостерігається процес магнітного насичення суцільного зразка (рис.1, крива 1). У пористому кульковому середовищі на відміну від суцільного зразка швидкість зростання величини індукції поля, при зміні величини напруженості зовнішнього поля H_3 , у 2–7 разів менша.

Використовуючи криву намагнічування для суцільного зразка (рис.1) і формули для розрахунку середньої індукції у феромагнітному пористому середовищі [5, 9, 10], отримаємо розрахункову криву намагнічування пористого гранульованого феромагнітного матеріалу. Запишемо формули [5, 9, 10]

$$B = \left[1 + \frac{\mu_0 H}{0,052 + \frac{1}{\mu - 1}} \right] \mu_0 H ; \quad (1)$$

$$B = \frac{\mu \mu_0 H}{1 + \frac{k \cdot \Pi (\mu - 1)}{\mu_0 H}} , \quad (2)$$

де μ – магнітна проникність суцільного зразка; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; H – напруженість зовнішнього магнітного поля; Π – пористість феромагнітного гранульованого матеріалу; μ_0 – щільність пакування гранул феромагнітного матеріалу $k=(0,13-0,15)$ – значення k вибирають залежно від форми гранул і щільності пакування. Для нашого випадку $k=0,15$. Наприклад, підставляючи дані з рис.1, при щільності $\mu_0=0,58$, отримаємо розрахункову криву намагнічування $B=f(H)$. Розрахунки показують, що величина B отримана з використанням формули (1) адекватніша експериментальній кривій 2. Водночас розбіжність значень B , розрахованих за формулами (1), (2), складає 3–5%.

В якості фільтруючого матеріалу магнітних фільтрів використовують також гранули магнітомого фериту [4]. Це – подрібнені гранульовані відходи виробництва феритів, наприклад 2000НМ, 2000НМС, 3000НМС та інші. Ферити, як відомо, – хімічні сполуки окислів заліза Fe_2O_3 з окислами інших металів. Ферити є феромагнетиками, які поєднують феромагнітні й напівпровідникові властивості. Питомий опір окремих видів феритів у мільярди разів перевищує опір металевих феромагнетиків. Тому у феритів практично відсутні вихрові струми. По структурі кристалічної ґратки розрізняють: ферити-шпінелі, ферити-гранати, ортоферити, гексаферити. Вищенаведені ферити відносяться до феритів-шпінелів, які, в свою чергу, відносяться до магнітомого матеріалів. Елементарна комірка шпінелі зображена на рис. 2 [6].

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

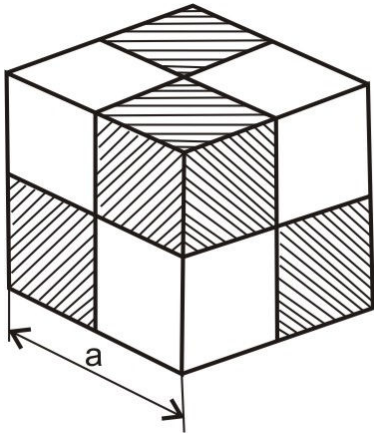


Рисунок 2. Схематичне зображення елементарної комірки шпінельної структури

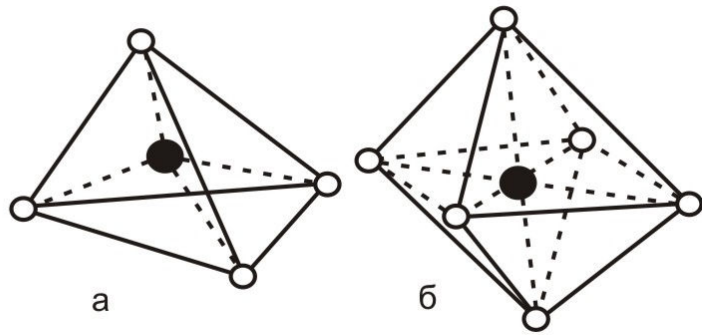


Рисунок 3. Схематичне зображення тетраедричного (а) і октаедричного (б) вузлів

Всього елементарна комірка шпінелі містить вісім „молекул” MeFe_2O_4 , тобто 32 іони кисню, 16 іонів заліза і 8 іонів двовалентного металу 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. 3.

Кристалічна решітка шпінелі складається з двох підрешіток: одна з магнітних іонів металів, що знаходяться в тетраедричних проміжках (підрешітка А), друга – з іонів в октаедричних проміжках (підрешітка В).

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 ферромагнетизм [4,6].

Криві намагнічування зразків суцільного фериту та гранульованого фериту наведено на рис. 4, магнітна проникність – на рис. 5. У магнітних полях невисокої напруженості $0-2,5 \cdot 10^4$ А/м (рис. 4) спостерігається різке збільшення величини середньої індукції B_c магнітного поля та магнітної проникності μ (рис. 5) в об'ємі пористих феритових зразків. Порівнюючи криві намагнічування пористих зразків з феромагнітних (рис. 1) і феритових гранул (рис. 4), спостерігаємо, що в полях $0-2,5 \cdot 10^4$ А/м величини середньої індукції поля та магнітної проникності в гранульованому фериті на 12–15% більші, ніж у гранулах феромагнітних. Відмінність гранульованого феритового середовища полягає в тому, що його залишкова намагніченість практично дорівнює нулю, що забезпечує ефективну регенерацію без додаткових схем розмагнічування. Окрім того, густина матеріалу фериту складає $4-5 \text{ г/см}^3$, а феромагнетика – $7,7-7,9 \text{ г/см}^3$. При рівних об'ємах пористих зразків маса гранульованого фериту в 1,7–1,9 раза менша за масу гранульованого феромагнетика. Відповідно при регенерації феритового фільтруючого матеріалу зменшуються витрати водоповітряної суміші.

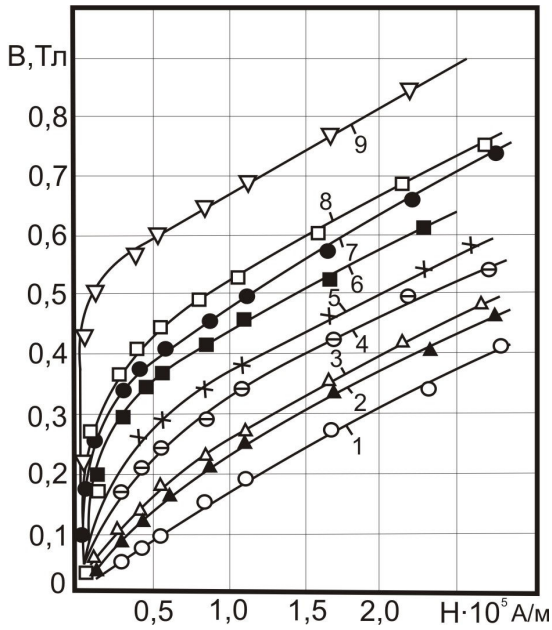


Рисунок 4. Криві намагнічування зразків гранульованого феритового фільтруючого матеріалу при різній щільності пакування: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,5; 6 – 0,6; 7 – 0,69; 8 – 0,75; 9 – суцільний феритовий зразок

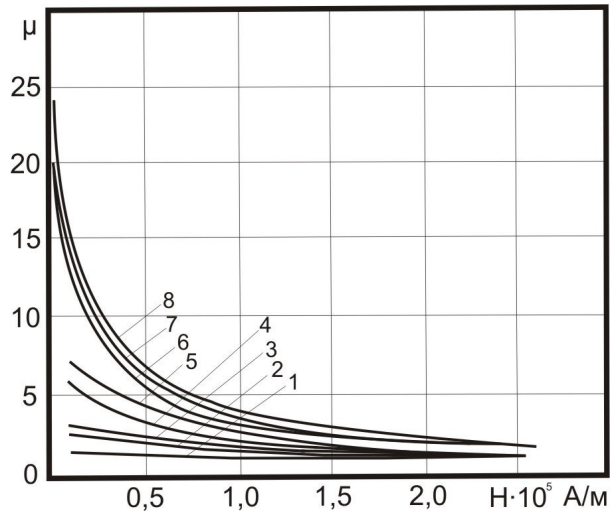


Рисунок 5. Магнітна проникність гранульованих феритових зразків при різній щільності пакування: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,5; 6 – 0,6; 7 – 0,69; 8 – 0,75

Ми пропонуємо композиційний ферито-феромагнітний гранульований фільтруючий матеріал [7, 8]. Феромагнітні кульки зі сталі ШХ-15 діаметром 3мм змішували з гранулами фериту 2000МНС, еквівалентні діаметром 3–4мм. Співвідношення між гранулами визначали коефіцієнтом $\alpha = m_k / m_{\phi}$, де m_k – маса феромагнітних кульок; m_{ϕ} – маса феритових гранул. Для дослідження магнітних властивостей виготовлені кілька ферито-феромагнітних зразків з різними значеннями α . Намагнічування зразків здійснювали в секційному соленоїді, такому, як при дослідженні феромагнітних зразків (див. рис. 1). На рис. 6 представлені криві намагнічування ферито-феромагнітного гранульованого фільтруючого матеріалу. При зміні зовнішнього магнітного поля H від 0 до $2,5 \cdot 10^4$ А/м значення величини середньої індукції B_c магнітного поля в об'ємі гранульованих зразків, при різних коефіцієнтах α , співмірні між собою за винятком кривої 8 (рис. 6). При $H > 7,5 \cdot 10^4$ А/м спостерігається „розшарування” кривих, значне зростання величини B_c у пористих зразках 6, 7, 8 (рис. 6) у порівнянні з величинами B_c у зразках 1, 2, 3, 4, 5 (рис. 6).

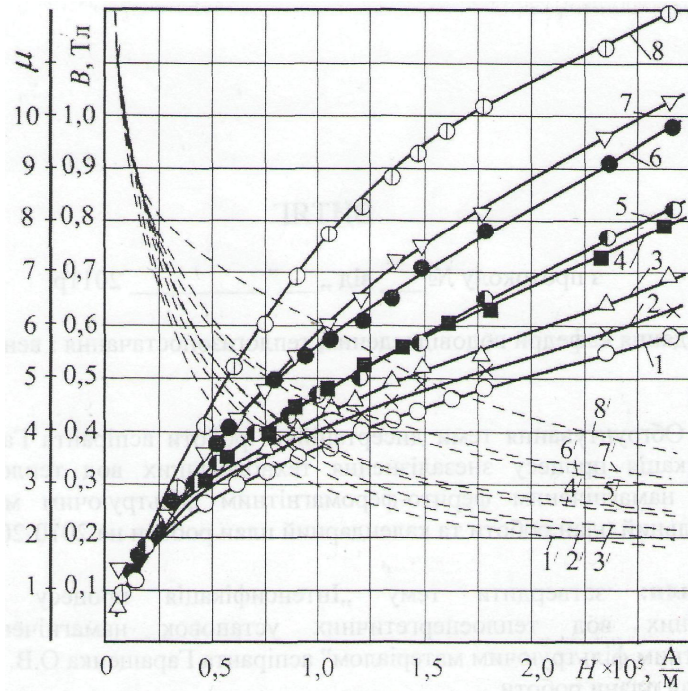


Рисунок 6. Криві намагнічування зразків ферито-феромагнітного фільтруючого матеріалу при різних значеннях коефіцієнта $\alpha = m_k/m_\phi$, де m_k – маса феромагнітних кульок; m_ϕ – маса феритових гранул, 1 – гранули фериту; 2 – $\alpha=0,214$; 3 – 0,44; 4 – 0,869; 5 – 1,669; 6 – 3; 7 – 5,49; 8 – кульки з сталі ШХ-15; 1’–8’ – криві магнітної проникності

Криві намагнічування і магнітної проникності апроксимовані рівняннями, представленими в таблиці. Коефіцієнт кореляції для кривих намагнічування коливається в межах ($R^2=0,995-0,999$), що засвідчує адекватність рівняння кривим намагнічування. Залежно від $\alpha=m_k/m_\phi$, на рис. 7 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%.

Таблиця 1. Рівняння кривих намагнічування

№	(B, Тл; H, кА/м)
1	$B = -5,8528 \cdot 10^{-10} \cdot H^4 + 3,6415 \cdot 10^{-7} \cdot H^3 - 8,0004 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0087 \cdot H$ ($R^2=0,995$);
2	$B = -5,5752 \cdot 10^{-10} \cdot H^4 + 3,6187 \cdot 10^{-7} \cdot H^3 - 8,3216 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0094 \cdot H$ ($R^2=0,996$);
3	$B = -4,6131 \cdot 10^{-10} \cdot H^4 + 3,1657 \cdot 10^{-7} \cdot H^3 - 7,7006 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0093 \cdot H$ ($R^2=0,997$);
4	$B = -5,0926 \cdot 10^{-10} \cdot H^4 + 3,3149 \cdot 10^{-7} \cdot H^3 - 7,7503 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0097 \cdot H$ ($R^2=0,998$);
5	$B = -6,5641 \cdot 10^{-10} \cdot H^4 + 4,0559 \cdot 10^{-7} \cdot H^3 - 8,7549 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0100 \cdot H$ ($R^2=0,997$);
6	$B = -4,9472 \cdot 10^{-10} \cdot H^4 + 3,2230 \cdot 10^{-7} \cdot H^3 - 7,6785 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0106 \cdot H$ ($R^2=0,998$);
7	$B = -4,3075 \cdot 10^{-10} \cdot H^4 + 2,7794 \cdot 10^{-7} \cdot H^3 - 6,8017 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0104 \cdot H$ ($R^2=0,997$);
8	$B = -0,2761 \cdot 10^{-10} \cdot H^4 + 0,7194 \cdot 10^{-7} \cdot H^3 - 4,1286 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0109 \cdot H$ ($R^2=0,999$);

Таблиця 2. Рівняння кривих магнітної проникності

№	(H, кА/м)
1’	$\mu = 27,0368 \cdot H^{-0,4830}$ ($R^2=0,986$);
2’	$\mu = 31,0100 \cdot H^{-0,4932}$ ($R^2=0,989$);
3’	$\mu = 29,9175 \cdot H^{-0,4740}$ ($R^2=0,994$);
4’	$\mu = 27,8971 \cdot H^{-0,4371}$ ($R^2=0,996$);
5’	$\mu = 23,5938 \cdot H^{-0,4012}$ ($R^2=0,984$);
6’	$\mu = 22,0414 \cdot H^{-0,3502}$ ($R^2=0,983$);

7'	$\mu=22,0283 \cdot H^{-0,3410} (R^2=0,987);$
8'	$\mu=16,7867 \cdot H^{-0,2426} (R^2=0,883);$

Вимірювалась залишкова намагніченість B_3 ферито-феромагнітних пористих зразків. При зміні α 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 0,007Тл, 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 α від 0,869 до 3. У цьому діапазоні зміни α 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. Засвідчено, що величина залишкової намагніченості B_3 ферито-феромагнітного пористого зразка в 2–4 рази менша від B_3 кулькового феромагнітного зразка зі сталі ШХ-15.

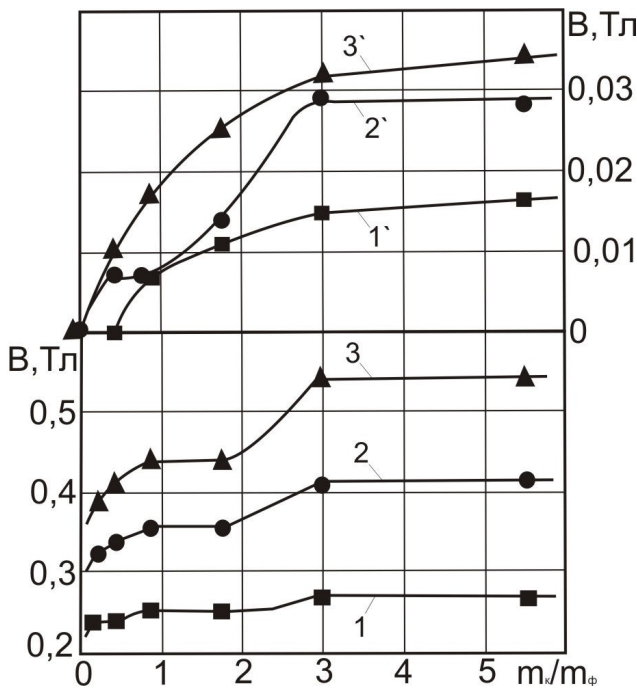


Рисунок 7. Криві намагнічування (1-3) і залишкової намагніченості (1'-3') ферито-феромагнітного фільтруючого матеріалу в залежності від $\alpha=m_k/m_\phi$, при різних значеннях напруженості поля:
1-1' – $3 \cdot 10^4$ А/м; 2-2' – $6 \cdot 10^4$ А/м; 3-3' – $8,8 \cdot 10^4$ А/м

Порівнюючи криві намагнічування й криві залишкової намагніченості ферито-феромагнітного фільтруючого матеріалу, можна зробити висновок, що рекомендованою величиною m_k / m_ϕ можна вважати величину, що знаходиться в діапазоні $0,9 \leq m_k / m_\phi \leq 3$.

Висновки. Досліджено магнітні властивості гранульованих ферито-феромагнітних фільтруючих матеріалів у широкому діапазоні зміни магнітного поля, $H=0-2,7 \cdot 10^5$ А/м. Аналітично описано криві намагнічування ферито-феромагнітних пористих матеріалів. На основі досліджень рекомендовано критерії для вибору ферито-феромагнітних фільтруючих матеріалів.

Література

1. Магніто-сорбційні властивості гранульованих фільтруючих насадок [Текст] / В.І. Гаращенко, І.Г. Скрипник, О.П. Лук'янчук, О.В. Гаращенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2008. – №3. – С. 184–191.
2. Сандуляк, А.В. Електромагнітніе фильтр-осадители: монографія [Текст]/ А.В. Сандуляк, В.И. Гаращенко. – Львов: Выща школа, 1982. – 70с.
3. Гаращенко, В.І. Екологічно безпечний метод очистки текучих середовищ в намагнічених поліградієнтних насадках [Текст] / В.І. Гаращенко //Проблеми фундаментальної і прикладної екології, екологічної геології й раціонального природокористування: IV Міжнародна науково-

- практична конференція., 19–21.03.2009р.: тези доп. – Кривий Ріг, 2009. – С. 125–127.
4. Гаращенко, В.І. Намагнічування феримагнітної гранульованої фільтруючої насадки [Текст] / В.І. Гаращенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Рівне, 2008. – №4(44). – С. 348–355.
 5. Гаращенко, В.І. Магнітні властивості феромагнітних пористих структур [Текст] / В.І. Гаращенко // Фізика неупорядкованих систем: IV міжнар. наук. конф., 14–16 жовтня 2008р.: тези доп. – Львів, 2008. – С. 162.
 6. Преображенский, А.А. Магнитные материалы и элементы [Текст] / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – М.: Высшая школа, 1986. – 351с.
 7. А.С. 1721892 А2 СССР „МКИ” В03 С1/00. Насадка в устройствах для магнитного осаждения [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / А.В. Сандуляк, В.И. Гаращенко, В.Д. Довганюк, В.М. Арсенюк // Энергетика и электрификация. – 1982. – №3. – С. 31–34.
 10. Сандуляк, А.В. Очистка жидкостей в магнитном поле [Текст] / А.В. Сандуляк. – Львов: Выща школа, 1984. – 168с.

Отримано 16.03.2011