

УДК 621.187.12

Гаращенко В. І., к.т.н., доцент, Гаращенко О. В., к.т.н.  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## ЧАСТОТНО-МАГНІТНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ МАГНІТНОЇ ОЧИСТКИ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ

**Розроблений новий метод контролю процесу магнітної очистки водних середовищ, який полягає у визначенні і контролі відносної частоти давачів, розміщених на корпусі фільтра, заповненого гранульованою фільтр-матрицею.**

**Ключові слова:** магнітна очистка, фільтруюча матриця, магнітний фільтр, ефективність очищення.

Відомий метод контролю процесу магнітної очистки полягає в тому, що в процесі очистки водного середовища періодично визначають концентрацією заліза до магнітного фільтра ( $C_0$ ) і після фільтра ( $C$ ) і по відносній зміні  $\Psi = \frac{(C_0 - C)}{C_0}$  визначають ефективність процесу ма-

гнітної очистки водного середовища від залізовмісних домішок [1; 2; 3]. Величини  $C_0$ ,  $C$  визначають, як правило, фотоколориметричним методом і на їх визначення витрачається декілька годин [2; 3]. Слід зауважити, що  $C_0$ ,  $C$  є змінними величинами технологічних водних систем. Точно визначити час фільтроциклу, тобто той момент часу, коли необхідно виконувати регенерацію феромагнітної фільтр-матриці, складно. Величина  $C_0$  змінюється в часі в широкому діапазоні, особливо в пускових режимах технологічного теплоенергетичного обладнання. Це призводить до того, що фільтруюча матриця магнітного фільтра насичується забруднюючими домішками до критичної маси, що визначається періодом фільтроциклу, і в подальшому фільтр, працюючи в режимі очистки, швидко зменшує свою ефективність. Існуючим методом складно оперативно визначити момент часу, при якому ефективність процесу магнітної очистки раптово зменшується. Важливим параметром магнітних фільтрів є щільність ( $\Pi$ ) феромагнітної фільтр-матриці. Величина щільності  $\Pi$  може змінюватись в діапазоні (0,05-0,85), залежно від виду фільтруючої матриці, співвідношення розмірів гранул матриці і розмірів корпусу фільтра. Від щільності ( $\Pi$ ) залежить величина силового фактора ( $H_{gradH}$ ) в об'ємі гранул фільтруючої мат-

риці, що визначає ефективність процесу магнітної очистки. Як відомо, маса феромагнітної матриці в промислових магнітних фільтрах досягає 1000 кг і більше, тому визначити щільність матриці технічно складно, особливо якщо врахувати, що корпуси виготовляють не тільки у вигляді циліндра, а також у вигляді тора, конусної, трапецевидної форми. При завантаженні матриці нерідко в корпусі фільтра утворюються повітряні прошарки між гранулами матриці, в той час, коли вся маса фільтруючої матриці завантажена в корпус фільтра. Такі повітряні прошарки утворюються також і при інтенсивній регенерації, наприклад, високошвидкісним потоком водоповітряної суміші: при цьому фільтруюча матриця розрихлюється, перебуваючи у псевдорозрідженому стані. При поверненні в своє початкове положення щільність матриці змінюється і її величина, як правило, зменшується, що призводить до зменшення величини середньої індукції поля в матриці і до зменшення ефективності процесу очистки.

Запропоновано щільність феромагнітної фільтр-матриці та ефективність процесу очистки контролювати частотно-магнітним методом [4; 5]. Відомо, що індуктивність зв'язана з частотою співвідношенням

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}, \text{ відповідно, частота } f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}, \text{ де } L, C - \text{ індуктивність}$$

та ємність вимірювального контуру. Перед завантаженням гранульованої матриці в корпус магнітного фільтра розраховують індуктивність соленоїдної намагнічуючої системи [6; 7]:

$$L = \frac{k\bar{\mu}\mu_0 N^2 S}{l}, \quad (1)$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $\bar{\mu}$  – магнітна проникність середовища соленоїда,  $N$  – кількість витків соленоїда,  $S$  – площа поперечного перерізу соленоїда,  $l$  – довжина соленоїда,  $k$  – коефіцієнт, який

залежить від співвідношення  $\frac{l}{d}$ ,  $d$  – діаметр соленоїда.

При заповненні соленоїда зернистою фільтр-матрицею, наприклад, феромагнітними кульками, величина  $\bar{\mu}$  визначається [8; 9; 10] як

$$\bar{\mu} = \frac{\mu \cdot \Pi}{\Pi + 0,15(1 - \Pi)(\mu - 1)}, \quad (2)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу матриці,  $\Pi$  – щільність фільтр-матриці.

Величина індуктивності соленоїда при заповненні, наприклад, кульковою феромагнітною матрицею розраховується за співвідношенням

$$L = \frac{k\mu_0\mu\mathcal{H}N^2S}{[\mathcal{H} + 0,15(1 - \mathcal{H})(\mu - 1)] l} \quad (3)$$

З (3) видно, що величина  $L$  значною мірою залежить від  $\mathcal{H}$ . Інші величини для соленоїда з фіксованими параметрами залишаються незмінними. Змінюючи величину  $\mathcal{H}$  і розраховуючи  $L$ , можна оцінити, в якому діапазоні може змінюватись величина  $L$ . Це дозволить вибрати вимірвальну систему, яка дозволить з максимальною точністю виконати вимірювання.

Запропонований метод контролю процесу магнітної очистки реалізується таким чином: корпус магнітного фільтра 1 (рис. 1) заповнюється гранулами фільтр-матриці 2. Вимірвальна електрична котушка 4 підключається до приладу (частотоміра або мікроконтролера) і вимірюється частота до початку процесу очистки  $f_0$ . В процесі очистки середовища, наприклад, технологічної води теплової електричної станції, феромагнітні домішки під дією магнітних сил будуть осаджуватись на намагнічених гранулах фільтр-матриці, при цьому величина магнітної проникності ( $\mu$ ) матриці буде збільшуватись.

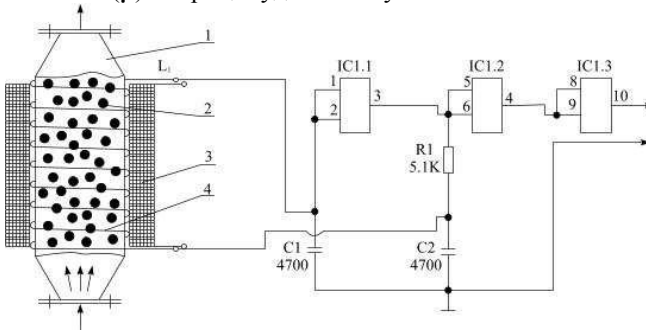


Рис. 1. Магнітний фільтр з вимірвальною схемою

Зі збільшенням  $\mu$  частота  $f$  вимірвальної котушки буде поступово зменшуватись. Настає такий момент часу, коли кількість феромагнітних домішок, осаджених в об'ємі фільтр-матриці, досягає максимального значення. В подальшому концентрація домішок ( $C_0$ ) до фільтра і концентрація домішок після фільтра ( $C$ ) стають практично однаковими, відповідно, ефективність процесу очистки зменшується і наближається до нуля. В цей момент часу  $t_f$  частота  $f$  електричної вимірвальної котушки зменшуватись не буде (рис. 2). Це свідчить про те, що необхідно виконувати регенерацію фільтр-матриці. В проміжку часу  $(0-t_f)$  фільтр працює в режимі процесу очистки і за величиною  $f_0/f$  мо-

жна оцінювати як відбувається процес «заносу» фільтр-матриці домішками і визначати момент часу, при якому необхідно виконувати регенерацію фільтра [4].

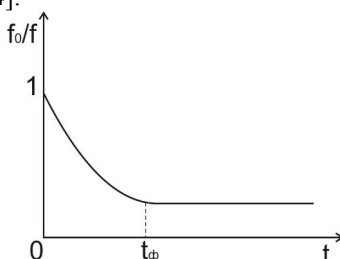


Рис. 2. Залежність відносної частоти індуктивного давача від часу

В процесі накопичення домішок в об'ємі матриці щільність (Щ) фільтр-матриці також збільшується. Збільшення величини щільності фільтр-матриці пропорційна відносній зміні частоти електричної вимірювальної котушки. Отже, спосіб контролю процесу магнітної очистки реалізується також шляхом контролю щільності фільтр-матриці. Окрім того, при заповненні корпуса промислового фільтра гранулами фільтр-матриці візуально контролювати необхідну щільність технічно складно. А від величини щільності залежить величина індукції в об'ємі фільтр-матриці, а, відповідно, силова дія магнітного поля на феромагнітні домішки та ефективність процесу магнітної очистки. Електрична вимірювальна котушка дозволяє швидко і точно визначити щільність фільтр-матриці до процесу очистки, в процесі очистки і після очистки.

В магнітному фільтрі на рис. 3 в місцях розміщення нижнього і верхнього шарів фільтр-матриці розташовані дві вимірювальні котушки 4 і 5 (давачі).

Перед початком процесу магнітної очистки вимірюють частоту  $f_{01}$  електричної котушки 4, розташованої на нижньому шарі фільтр-матриці, і частоту  $f_{02}$  верхньої котушки. Поступово, з часом, в процесі магнітної очистки змінюється частота нижньої електричної вимірювальної котушки 4, яку позначимо  $f_1$ , та частота верхньої котушки 5, яку позначимо, відповідно,  $f_2$ . Відношення  $f_{01}/f_1$  позначимо  $P_1$ , а відношення  $f_{02}/f_2$  –  $P_2$ . При магнітній очистці середовища величина  $\varepsilon = (P_1 - P_2)/P_1$  буде змінюватись від максимального до певного мінімального значення і, відповідно, буде змінюватись величина  $\varepsilon$ , яка характеризує відносну зміну щільності домішок до фільтра і після фільтра. Настає такий момент часу, коли величина  $\varepsilon$  не збільшується. Це свідчить про те, що відбулось максимальне насичення феромагнітної фільтр-матриці домішками. Цей момент часу відповідає періоду фільт-

роциклу. В подальшому домішки середовища «транзитом» проходять об'єм намагніченої фільтр-матриці, не осаджуючись на її гранулах. Це означає, що необхідно регенерувати фільтр-матрицю.

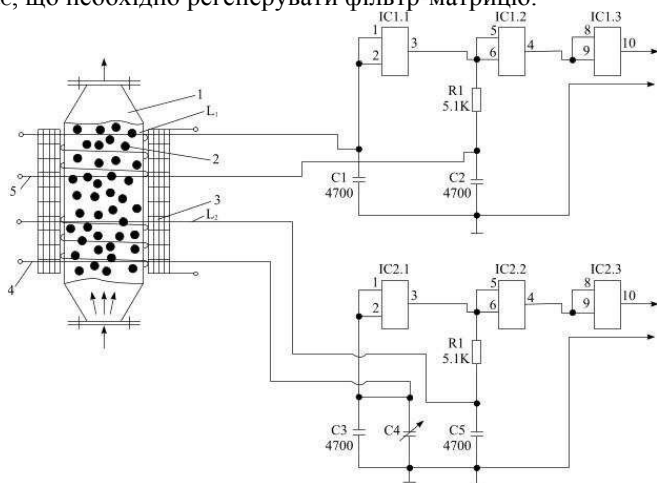


Рис. 3. Магнітний фільтр з вимірювальною схемою, що містить 2 давачі

Технологічні вимірювання здійснюються з використанням двох вимірювальних LC-генераторів, виконаних на мікросхемах IC1 і IC2 (K561LE5) (рис. 3). Негативний зворотний зв'язок по постійному струму між виходом (вивід 3) і входом (виводи 1, 2) даних мікросхем здійснюється через резистори R1 і R2 відповідно, а також давачі котушки індуктивності L1 і L2. Параметри котушок L1 і L2, і відповідно резисторів R1 і R2 вибрані так, що елемент працює на лінійній ділянці передавальної характеристики мікросхем. Таким чином створюються умови для збудження каскаду на частоті, яка визначається параметрами елементів контуру L1C1C2 і L2C3C4C5. Частоту коливань другого генератора можна змінювати в невеликих межах конденсатором змінної ємності C4. Елементи мікросхеми IC1.3 і IC2.3 послаблюють шунтуючий вплив вхідного опору вимірювальних приладів на контури. В якості вимірювальних приладів можуть бути використані частотометри або реєстратори на мікроконтролерах.

Процес вимірювання здійснюється наступним чином: при проходженні забрудненої феромагнітними домішками технологічної води через давачі котушки L1 і L2 збільшується їх індуктивність, а тому частота коливань контурів L1C1C2 і L2C3C4C5 зменшується, що в свою чергу призводить до зменшення частоти роботи генераторів, і, відпові-

дно, реструється за допомогою вимірювальних приладів. На початку роботи фільтра виставляємо конденсатором С4 однакову початкову частоту генераторів. При максимальному насиченні домішками фільтр-матриці частоти генераторів зменшаться і зрівняються.

Контроль процесу магнітної очистки може бути також реалізований шляхом визначення відносної зміни частоти електричної вимірювальної котушки з середовищем, що очищується, до початку процесу очистки і після завершення процесу очистки. Для цього пробу середовища, наприклад, технологічної води, що очищується, взяту до очистки, розміщують в електричну вимірювальну котушку (рис. 4) і вимірюють частоту цієї котушки. Потім таку ж за об'ємом пробу води після очистки розміщують в електричну вимірювальну котушку і вимірюють частоту. Оскільки, в одній пробі води до очистки буде підвищена концентрація феромагнітних домішок, а в другій пробі, після очистки, зменшена концентрація, то відносна зміна частоти електричної вимірювальної котушки з пробю води після  $f_2$  і до очистки  $f_1$  відповідає відносній зміні концентрації домішок, яка характеризує ефективність процесу магнітної очистки  $\varepsilon = (f_2 - f_1) / f_2$ .

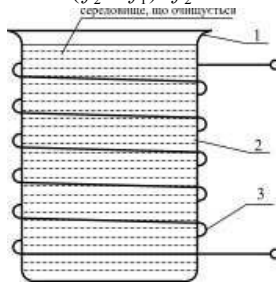


Рис. 4. Скляна ємність з пробю води, що розміщена в електричній вимірювальній котушці (індуктивному давачі): 1 – скляна ємність; 2 – вода, яка очищується; 3 – вимірювальна котушка

Для визначення кількісної характеристики ефективності процесу магнітної очистки виконуються контрольні вимірювання концентрації феромагнітних домішок паралельно з вимірюванням частоти електричної котушки і будується залежність  $\varepsilon_x = (f_2' - f_1') / f_2' = \varphi(C_x)$ , де  $C_x$  – змінна концентрація феромагнітних домішок,  $f_2'$  – частота електричної вимірювальної котушки без проби води,  $f_1'$  – частота електричної вимірювальної котушки з пробю води, яка містить домішки. В наступних вимірюваннях визначають величину  $f_1'$  і визначають за графічною залежністю  $\varepsilon_x = \varphi(C_x)$  величини  $\varepsilon_x$  для різних значень  $f_1$ , як до очис-

тки, так і після очистки. За значенням величин  $\varepsilon_x$  і  $f_l$  визначають безпосередньо концентрації феромагнітних домішок до очистки  $C_0$  і після очистки  $C$ , і за значеннями цих величин розраховують ефективність процесу очистки.

Виконували контрольні вимірювання з визначення зміни частоти  $f$  соленоїда (рис. 4), в який почергово розміщували проби водного середовища зі змінною концентрацією  $C$  залізовмісних домішок. Частота пустого соленоїда складала  $f_0=34,430$  кГц. Концентрацію домішок для контролю визначали хімічним методом. Результати вимірювання наведені в таблиці.

Таблиця

$f_0/f$	1,0002	1,00069	1,0009	1,0017	1,0022	1,0029	1,0034
$C$ , г/дм <sup>3</sup>	1,0351	4,3474	6,3141	11,593	15,112	18,424	22,875

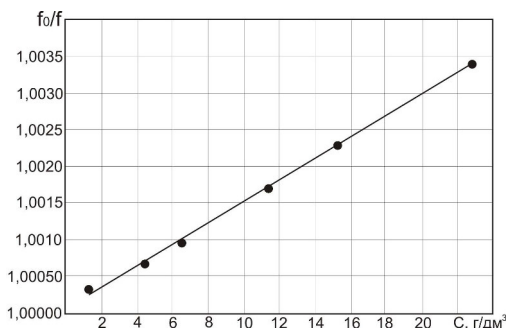


Рис. 5. Залежність відносної частоти індуктивного давача від концентрації домішок заліза

В подальшому виконували повторні контрольні вимірювання. Розміщували проби води з невідомою концентрацією в соленоїд і визначали  $C$ . В даному випадку відношення  $f_0/f$  складало 1,0020, що за графічною залежністю (рис. 5) побудованою за даними табл. 1 відповідало концентрації 13 г/дм<sup>3</sup>. Для контролю цю концентрацію перевіряли хімічним методом. Вона складала 13 г/дм<sup>3</sup>. Графіки можуть бути побудовані для різних концентрацій. Так, розміщуючи проби водного середовища, які відібрані до фільтра та після фільтра, в соленоїд за величиною  $f_0/f$  визначають  $C_0$ ,  $C$  – концентрації феромагнітних домішок до та після фільтра, і, відповідно, визначали ефективність процесу очистки  $\psi=(C_0-C)/C$ .

Враховуючи, що вимірювання частоти котушки давача, що розташована на корпусі фільтра, заповненого гранулами фільтр-матриці, здійснюється в зовнішньому магнітному полі намагнічуючої системи фільтра, проведені дослідження з визначення впливу напруженості зовнішнього магнітного поля на величину відносної частоти вимірювальної котушки (давача) при різних значеннях щільності пакування гранул.

В соленоїд порціями завантажували гранули фериту марки 2000 НМС, при цьому вимірювали щільність пакування гранул в об'ємі соленоїда. Величину щільності змінювали від 0,1 до 0,48, величину напруженості (Н) зовнішнього магнітного поля від 62 до 115 кА/м.

Залежність  $f/f_0 - f(\text{Щ})$  наведена на рис. 6, де  $f$  – частота соленоїда заповненого гранулами фериту.

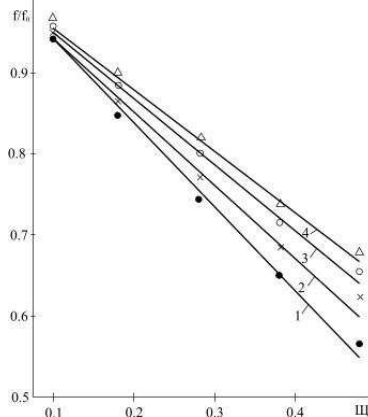


Рис. 6. Залежність відносної зміни частоти індуктивного давача від щільності пакування феритової гранульованої матриці: 1 – при відсутності зовнішнього магнітного поля; 2 – при напруженості зовнішнього магнітного поля  $H=62\text{кА/м}$ ; 3 –  $H=95,5\text{кА/м}$ ; 4 –  $115\text{кА/м}$

Частота пустого соленоїда складала  $f_0=34,483$  кГц. При  $\text{Щ}=0,1$  і  $H=62$  кА/м, величина  $f/f_0$  складала 0,95; при  $\text{Щ}=0,28$ ,  $H=62$  кА/м,  $f/f_0=0,77$ ; при  $\text{Щ}=0,48$ ,  $H=62$  кА/м,  $f/f_0=0,62$ . При тих же значеннях Щ, але при  $H=115$  кА/м, величина  $f/f_0$  складала 0,96; 0,82; 0,68.

Видно, що при щільності  $\text{Щ}=0,02-0,2$ , при різних значеннях напруженості поля, значення величини  $f/f_0$  відрізняється не суттєво (на 5-8%), а при  $\text{Щ}\geq 0,3$  величина  $f/f_0$  відрізняється на 10-12%.

Для феромагнітних кульок зі сталі ШХ-15, при завантаженні їх в соленоїд і виконанні аналогічних вимірювань спостерігаємо (рис. 7), що зміна напруженості зовнішнього магнітного поля практично не



впливає на значення відносної частоти  $f/f_0$  вимірювальної котушки (контуру).

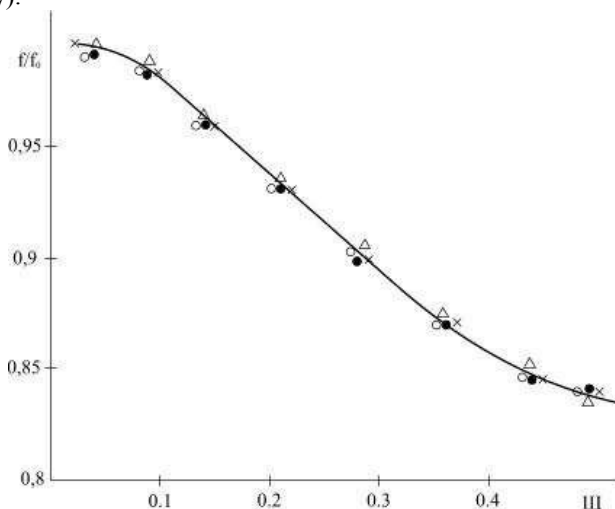


Рис. 7. Залежність відносної зміни частоти індуктивного датчика від щільності пакування феромагнітної кулькової матриці зі сталі ШХ-15: • – при відсутності зовнішнього магнітного поля; ×, ○, Δ – при напруженості поля 62; 95,5; 115 кА/м

Так, при зміні щільності (Щ) від 0,013 до 0,088 для всіх величин напруженостей зовнішніх полів величина  $f/f_0$  змінилась на 1,5-1,7%. При зміні Щ від 0,088 до 0,36 величина  $f/f_0$  зменшилась на 14%.

Використовуючи сучасні мікроконтролери, наприклад, K561ЛЕ5 або інші, можна сконструювати вимірювальні LC генератори і здійснювати автоматичний контроль за процесом магнітної очистки технологічних вод від феромагнітних домішок.

1. Гарашенко В. І. Енергоефективна технологія магнітного очищення водних систем від дисперсних феромагнітних забруднень / Гарашенко В. І., Гарашенко О. В., Лук'янчук О. П. // Інноваційні енерготехнології: XIV Міжнародна науково-практична конференція, 2011 р.: тези доповіді. – Одеса, 2011. – С. 25–28.
2. Гарашенко В. І. Дослідження впливу технологічних параметрів процесу магнітного очищення конденсату ТЕЦ на коефіцієнт осадження / Гарашенко В. І., Гарашенко О. В. // Екологія і промисловість. – 2011. – № 4. – С. 78–83.
3. Магніто-сорбційні властивості гранульованих фільтруючих насадок / В. І. Гарашенко, І. Г. Скрипник, О. П. Лук'янчук, О. В. Гарашенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2008. – № 3. – С. 184–191.
4. Заявка на видачу патенту України на винахід

«Спосіб контролю процесу магнітної очистки рідких, газоподібних і сипучих середовищ» / В. І. Гаращенко, О. В. Гаращенко, В. В. Мельник, О. О. Лебедь // Позитивне рішення про видачу патенту № 201508435 від 28.08.2015 р. 5. Патент України на корисну модель № 100708 МПК В03С 1/00, В01Д 35/06. Спосіб контролю процесу магнітного очищення / Гаращенко В. І., Гаращенко О. В., Мельник В. В. // Бюл. № 8, 10.08.2015 р. 6. Гаращенко В. І. Визначення часу захисної дії магнітного фільтра індуктивним методом / Гаращенко В. І., Гаращенко О. В., Лебедь О. О., Мельник В. В. // Тези III міжнародної науково-практичної конференції «Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу», 12-14 лютого 2014 р., м. Рівне. – С. 327–330. 7. Гаращенко В. І. Новый метод контроля плотности упаковки гранул фильтционной ферромагнитной загрузки / Гаращенко В. И., Гаращенко А. В., Мельник В. В. // Тезисы XVII международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии», 7-9.10.2014 р., – Днепропетровск, 2014. – С. 37–38. 8. Гаращенко В. І. Намагнічування ферито-феромагнітних гранульованих фільтруючих матеріалів / Гаращенко В. І., Гаращенко О. В. // Вісник ТНТУ ім. І. Пулюя. – 2011. – № 3. – Т. 16. – С. 62–69. 9. Гаращенко О. В. Індуктивно-магнітний метод контролю щільності поліградієнтної насадки магнітних фільтрів / Гаращенко О. В. // Тези студентської наукової конференції, присвяченої 85-річчю НУВГП. – 2007 р. – № 2. – С. 177–178. 10. Гаращенко О. В. Метод контролю щільності насадки магнітних фільтрів / Гаращенко О. В. // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: науково-практична конференція студентів і молодих учених, 25-26 листопада 2009 р.: тези доповіді. – Івано-Франківськ, 2009. – С. 28–29.

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

---

**Harashchenko V. I., Candidate of Engineering, Associate Professor,**  
**Harashchenko O. V., Candidate of Engineering** (National University of  
Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

## **FREQUENCY-MAGNETIC CONTROL METHOD OF LIQUID MEDIA MAGNETIC PURIFICATION PROCESS**

**It was proposed a new method of control of liquid media magnetic purification process, which based on identifying and controlling the relative frequency of sensors placed on the body of the filter.**

**Keywords:** magnetic purification, filtering matrix, magnetic filter, efficiency of purification.

---

**Гаращенко В. И., к.т.н., доцент, Гаращенко А. В., к.т.н.**

(Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

### **ЧАСТОТНО-МАГНИТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА МАГНИТНОЙ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД**

**Разработан новый метод контроля процесса магнитной очистки водных сред, который заключается в определении и контроле относительной частоты датчиков, размещенных на корпусе фильтра, заполненного гранулированной фильтр-матрицей.**

***Ключевые слова:* магнитная очистка, фильтрующая матрица, магнитный фильтр, эффективность очистки.**

---