

УДК 621.187.121

В.І. ГАРАЩЕНКО, канд. техн. наук, доцент, **О.В. ГАРАЩЕНКО**, аспірант
Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП), м. Рівне

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ МАГНІТНОГО ОЧИЩЕННЯ КОНДЕНСАТУ ТЕЦ НА КОЕФІЦІЄНТ ОСАДЖЕННЯ

Наведено результати експериментальних досліджень з визначення величини феромагнітної фракції домішок при магнітному очищенні конденсату ТЕЦ. Досліджено вплив довжини намагніченої феромагнітної фільтруючої загрузки і напруженості магнітного поля на коефіцієнт осадження феромагнітних домішок зворотного виробничого конденсату ТЕЦ.

Ключові слова: магнітне очищення, феромагнітна фільтруюча загрузка.

Одним із головних показників якості технологічних водних систем є ступінь їх чистоти по відношенню до різного роду домішок. Причиною наявності домішок неперервна і прогресуюча в часі корозія, зношення технологічного та комунікаційного обладнання [1–3], наявність застарілих технологій виробництва, які обумовлюють появу забруднюючих домішок. Встановлено, що основна маса цих домішок складається із залізовмісних сполук [1, 3, 4]. У тому випадку, коли вимоги до якості водних середовищ високі, залізовмісні домішки суттєво, а інколи визначально впливають на якість і сортність водних середовищ або на продукцію, що виготовлена з рідких середовищ. При цьому порушуються технологічні процеси, зменшується потенціальний рівень виробництва та надійність і довговічність роботи обладнання. На теплових і атомних електростанціях залізовмісні домішки погіршують якість конденсату та, відповідно, живильної води котельних агрегатів. Досліджено, що навіть при концентрації залізовмісних домішок 0,02–0,2 мг/л на парогенеруючих поверхнях труб котлів та в проточній частині турбін утворюються так звані «залізисті відкладення» [1, 5, 6]. Ці відкладення збіль-

шують термічний та гідравлічний опір, погіршують теплопередачу, призводять до перевитрат палива і теплової енергії, перепалу та розриву труб, зменшенню потужності турбіни, збільшенню часу простою обладнання в ремонті і скороченню вироблення електроенергії. Відкладення на парогенеруючих трубах у кількості всього 200–300 г/м² (це відповідає товщині відкладень не більше 0,3–0,5 мм) обумовлюють додатковий перегрів труб на 50–120°C, а відкладення у кількості майже 1 кг на лопатках турбін високого тиску блоків потужністю 300 мВт викликає зменшення потужності на 5–10 мВт, що еквівалентно недовиробленню 35–70 млн кВт·год/рік електроенергії [1, 5, 6, 7]. Скид конденсатів з високою концентрацією залізовмісних домішок у водойми (особливо в пусковий режим) призводить до забруднення водного басейну, навколишнього середовища та додатковим втратам тепла.

В оборотних (стічних) водах металургійних виробництв концентрація диспергованої окалини сягає ~100 мг/л і більше, що значно перевищує допустиму концентрацію [8, 9]. Оборотні води, які використовуються для гідрозмиву окалини, охолодження рольганга прокат-



ного стану і прокатного листа, збагачені диспергованою окалиною розмірами менше 10–20 мкм [8, 9]. Більш груба фракція часток окалини осаджується у відкритих відстійниках, а порівняно високодисперсна циркулює в оборотній системі, викликаючи зношення обладнання і періодичне закупорювання форсунок. Частки окалини, разом з оборотною водою потрапляючи на поверхню прокатного листа, погіршують його якість і створюють центри майбутньої корозії. Стічні води, збагачені окалиною, забруднюють водний басейн і навколишнє середовище.

Дослідженнями та спостереженнями встановлено, що 70–95 %, а в окремих випадках до 98–100 % залізо-вмісних забруднюючих домішок у зворотних виробничих конденсатах, живильній воді, турбінних конденсатах, оборотних, стічних водах ТЕЦ, ТЕС, АЕС, металургійних виробництв мають феромагнітні властивості [3, 4, 5, 8, 9], тому для їх видалення запропоновано використовувати високошвидкісний і ефективний метод магнітного осадження. Суттєвими перевагами даного методу є можливість очищати рідкі середовища з температурою до 500 °С і швидкістю фільтрування порядку 1000 м/год, у той час як в механічних фільтрах швидкість коливається у межах 5–50 м/год. У тих технологічних процесах, де температура рідини сягає ~100 °С і вище і середовища є хімічно агресивними, метод магнітного очищення майже єдиний, який може забезпечити ефективне очищення від феромагнітних домішок.

Процес очищення рідких (водних) середовищ від феромагнітних домішок найбільш ефективно відбувається в намагнічених пористих загрузках. Для цього необхідне виконання умови $F_m > F_c$ (F_m , F_c – магнітна і гідродинамічна сили).

$$F_m = \mu_0 \chi V_q H \text{grad} H, \quad F_c = 3\pi d_e \eta (v - v_q) K,$$

де χ , V_q , d_e – магнітна сприйнятливості, об'єм і еквівалентний ефективний діаметр часток; H – напруженість магнітного поля між гранулами загрузки; η – динамічна в'язкість рідкого середовища; v, v_q – швидкості рідкого середовища і частки; K – динамічний коефіцієнт форми частки; μ_0 – магнітна константа.

Розрахунки показали, що інерційна і архімедова сили, які діють на ферочастки, у два рази менші за магніт-

ні сили. Дослідами встановлено, що ефективне осадження часток (феромагнітних, феримагнітних, антиферомагнітних) відбувається при значеннях силового магнітного фактору $H \text{grad} H \approx 1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{15} \text{ A}^2/\text{м}^3$.

Дослідження впливу технологічних параметрів на процес магнітного очищення виконувалися з використанням зворотного виробничого конденсату Чимкентської ТЕЦ. Фізико-хімічний склад конденсату наданий в табл. 1.

При допустимій нормі концентрації заліза в конденсаті 50 мкг/кг концентрація заліза в окремих випадках реально перевищує норму більш ніж у 20 разів. Функціональну схему надходження конденсату в котел надано на рис. 1.

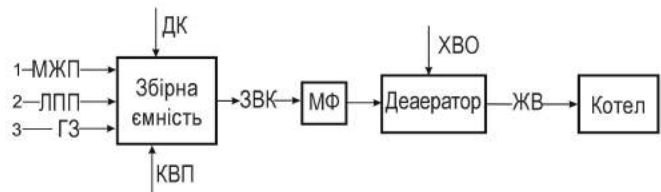


Рисунок 1 – Функціональна схема надходження конденсату в котел:

1 – масложирове підприємство, 2 – льонопаперове підприємство, 3 – гідролізний завод

У збірну ємність надходять зворотний конденсат від підприємств-споживачів, дренажний конденсат (ДК), конденсат вторинного пару (КВП). Суміш цих водних потоків, так званий зворотний виробничий конденсат (ЗВК), надходить у деаератор, в який також надходить хімічно очищена вода (ХВО). Магнітний фільтр (МФ) раціонально поставити перед деаератором для очищення найбільш забрудненого водного потоку (ЗВК). Після видалення кисню конденсат (живильна вода) надходить у котел. У технологічну систему ТЕЦ зворотний виробничий конденсат поступає у кількості ~40 т/год, хімоочищена вода ~360 т/год, дренажний конденсат ~2 т/добу, конденсат вторинного пару ~5 т/добу. Концентрація заліза у ЗВК може сягати ~1200 мкг/кг, у хімоочищеній воді ~50 мкг/кг.

За рік зворотний виробничий конденсат (ЗВК) вносить в котел заліза – $40000 \text{ кг} \cdot 1200 \cdot 10^{-9} \text{ кг/кг} \cdot 24 \cdot 365 = 420,5 \text{ кг}$; хімоочищена вода – $360000 \text{ кг} \cdot 50 \cdot 10^{-9} \text{ кг/кг} \cdot 24 \cdot 365 = 157,7 \text{ кг}$.

Таблиця 1 – Фізико-хімічний склад конденсату Чимкентської ТЕЦ

Дата відбору	Fe	pH	K	Л	Ж	Са	Mg
	мкг/кг	моль/м ³	моль/м ³	моль/м ³	моль/м ³	моль/м ³	моль/м ³
26.10	87,5	7,34	0,13	0,5	0,075	0,0075	0,0075
16.11	250	7,55	0,2	0,8	0,03	0,02	0,03
25.02	1200	6,8	0,2	0,2	0,06	0,05	0,01
22.03	250	6,9	0,1	0,5	0,04	0,025	0,02

Таким чином, за рік зворотний виробничий конденсат обсягом 40 т/год вносить в котел у 2,7 раза більше заліза, ніж хімічищена вода обсягом 360 т/год.

Величину долі феромагнітної фракції λ залізовмісних домішок у конденсаті визначали за методом [4, 10]. Перевагою даного методу є оперативність, маневреність, можливість використання різних видів феромагнітних загрузок, а також використання різних джерел магнітного поля як постійних магнітів, так і соленоїдів або електромагнітів.

Аналітично величину λ можна розрахувати з використанням експериментальної залежності коефіцієнта очищення ψ від довжини фільтруючої загрузки L . Наприклад, для двох фіксованих значень L_1 і L_2 , використовуючи рівняння [5, 10], запишемо

$$1 - \frac{\psi_1}{\lambda} = \left(1 - \frac{\psi_2}{\lambda}\right)^{L_1/L_2} \quad (1)$$

Для розрахунку зручно брати дані ψ_1 і ψ_2 для L_1 і L_2 , що знаходяться у співвідношенні $L_1/L_2=1/2$ або $L_1/L_2=1/3$. Тоді рівняння (1) відносно λ після перетворень має вигляд

$$\lambda = \frac{\psi_1^2}{2\psi_1 - \psi_2} \quad \text{для } L_1/L_2=1/2, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{\psi_1^3} (\sqrt{4\psi_2} - 4,73\sqrt{\psi_1})}{2(3\psi_1 - \psi_2)} \quad \text{для } L_1/L_2=1/3. \quad (3)$$

Враховуючи, що величина коефіцієнта очищення

$$\psi = (C_0 - C) / C_0, \quad (4)$$

де C_0 – концентрація домішок заліза на вході магнітного фільтра, C – на виході фільтра. Величини ψ_1 , ψ_2 в рівняннях (2), (3) можна замінити на величини C_0 , C_1 , C_2 , які визначаються при дослідженні процесу магнітного очищення. Використовуючи співвідношення (4), підставимо в рівняння (2) і (3) та отримаємо розрахункові формули для λ

$$\lambda = \frac{(C_0 - C_1)^2}{C_0(C_0 - 2C_1 + C_2)} \quad \text{для } L_1/L_2 = 1/2, \quad (5)$$

де C_0 – концентрація заліза на вході фільтра; C_1 , C_2 – концентрації заліза, що відповідають L_1 і L_2 .

$$\lambda = \frac{2(2C_0 - 3C_1 + C_2) \cdot (C_0 - C_1)}{C_0(3\sqrt{C_0 - C_1} + \sqrt{C_0 - 4C_2 + 3C_1}) \cdot \sqrt{C_0 - C_1}} \quad (6)$$

для $L_1/L_2 = 1/3$.

З метою визначення λ і дослідження впливу технологічних параметрів процесу магнітного очищення на коефіцієнт осадження використано експериментальну установку (рис. 2).

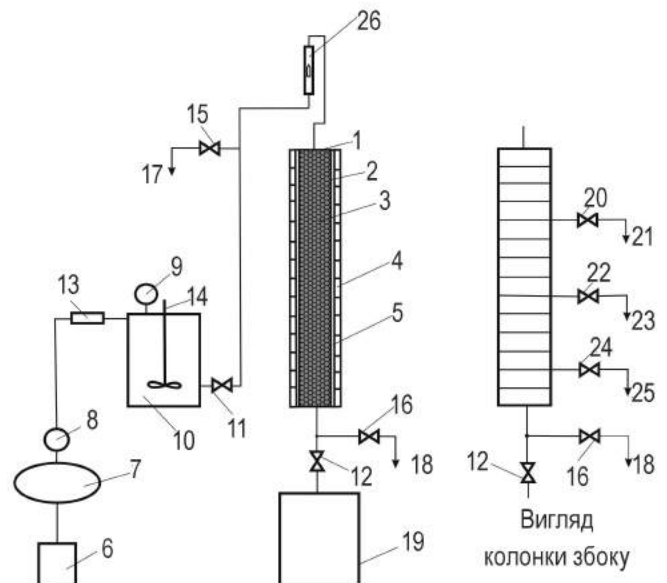


Рисунок 2 – Схема лабораторної установки з дослідження режимів процесу магнітної фільтрації:

- 1 – магнітний фільтр малої продуктивності; 2 – корпус фільтраційної колонки; 3 – загрузка; 4 – секція з самарій-кобальтових магнітів; 5 – прокладка з неферомагнітного матеріалу; 6 – компресор; 7 – ресивер; 8 – редуктор; 9 – манометр; 10 – ємність для конденсату; 11, 12 – вхідний і вихідний вентилі; 13 – фільтр для очищення повітря; 14 – електромеханічний змішувач; 15, 16, 20, 22, 24 – вентилі для відбору проб; 17, 18, 21, 23, 25 – пробовідбірники; 19 – ємність для фільтрату; 26 – ротаметр

Результати дослідження з визначення λ наведені на рис. 3. Необхідну кількість циклів фільтрування визначено за залишковою концентрацією заліза після певного циклу, при якому величина концентрації заліза стабілізується.

Встановлено, що доля феромагнітної фракції залізовмісних домішок у зворотному конденсаті складає 90 %. З рис. 3 видно, що вже після першого циклу ($L = 0,78$ м) концентрація заліза зменшилась з 250 мкг/кг до 60 мкг/кг, після четвертого циклу концентрація зменшилась до 39 мкг/кг. На рис. 4 наведено результати дослідження з впливу довжини намагніченої фільтруючої загрузки на коефіцієнт очищення конденсату.

Як фільтруючу загрузку використовували гранули дробу зі сплаву, що легований хромом і з низьким вмістом вуглецю [1]. При $L=0,5$ м коефіцієнт очищення ψ складає 0,8. При зміні L від 0,5 до 1,38 м величина ψ збільшується всього на 0,057.

Вплив величини напруженості магнітного поля на зменшення концентрації заліза і на коефіцієнт осадження показано на рис. 5.

В одному випадку при магнітному очищенні зворотного конденсату використано як фільтруючу загрузку гра-

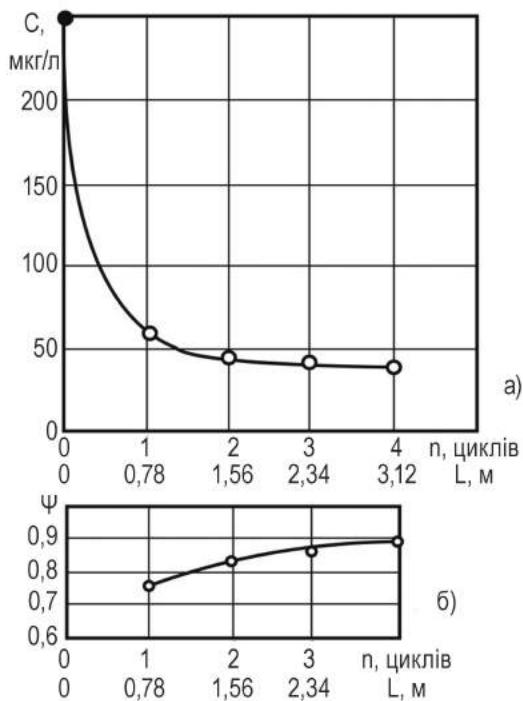


Рисунок 3 – Залежність концентрації заліза С (а) і коефіцієнта очищення ψ (б) від кількості циклів n або довжини фільтруючої заправки L: V=50 м/год, H=40 кА/м
 ● – середнє значення п'яти концентрацій заліза до фільтра;
 ○ – середнє значення п'яти концентрацій заліза після фільтра

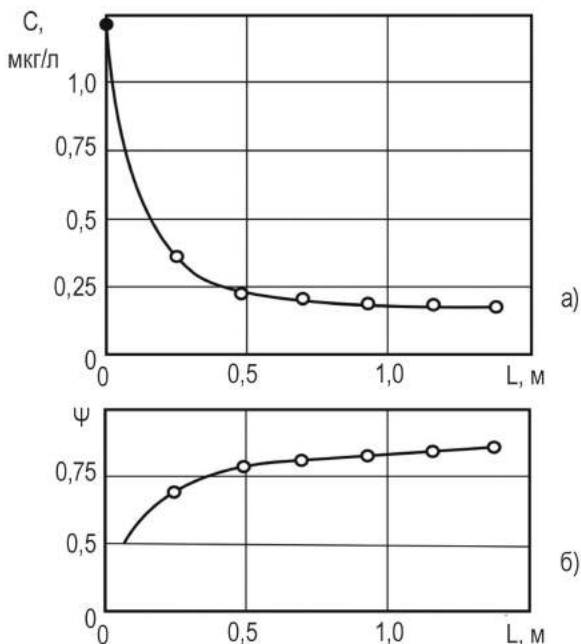


Рисунок 4 – Залежність концентрації заліза С (а) і коефіцієнта очищення ψ (б) від довжини намагніченої заправки L (Чимкентська ТЕЦ): V=50 м/год, H=120 кА/м
 ● – середнє значення п'яти концентрацій заліза до фільтра;
 ○ – середнє значення п'яти концентрацій заліза після фільтра

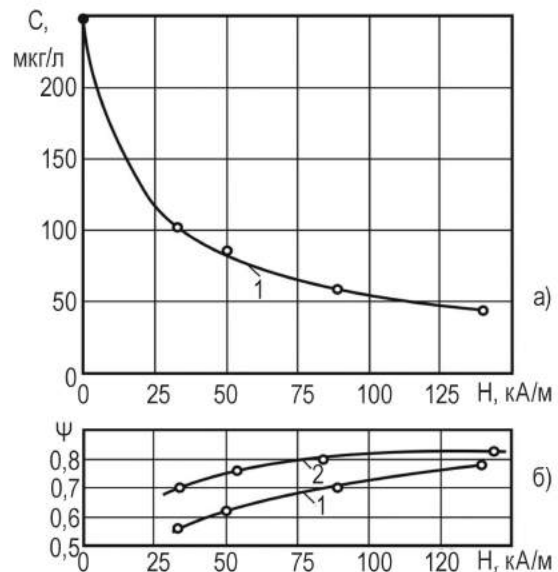


Рисунок 5 – Залежність концентрації заліза С (а) і коефіцієнта очищення ψ (б) від напруженості магнітного поля H (Чимкентська ТЕЦ):
 1 – L=0,78 м; V=50 м/год; загрузка – гранули стружки 40X13;
 2 – L=0,63 м; 50 м/год; загрузка – гранули дробу з хромистого сплаву; вихідна концентрація C₀=1200 мкг/кг
 ● – середнє значення п'яти концентрацій заліза до фільтра;
 ○ – середнє значення п'яти концентрацій заліза після фільтра

нули стружки зі сталі 40X13, які мають форму мініпаралелепіпедів з криволінійною поверхнею, еквівалентним діаметром $d \approx 4-5$ мм. При вихідній концентрації заліза в конденсаті $C_0 = 250$ мкг/л залишкова концентрація за напруженості магнітного поля 140 кА/м складає 45 мкг/л, відповідно коефіцієнт осадження – 0,77. В іншому випадку використано як загрузку гранули кулькоподібного дробу, що легований хромом [1, 2]. При зміні напруженості поля H від 0 до 33 кА/м коефіцієнт осадження ψ становить – 0,56 і 0,7 (рис. 5б, криві 1, 2), при зміні H від 33 до 90 кА/м величина ψ збільшується на 25 % і 17 %. Подальше збільшення H призводить до незначного покращення ψ . Так, при зміні H від 90 до 140 кА/м величина ψ збільшилась всього на 2,5 %. Використовуючи як фільтруючу загрузку гранули стружки і гранули кулькоподібного дробу, зауважимо, що при швидкості фільтрації в діапазоні 0–300 м/год гідравлічний опір указаних загрузок відрізняється на незначну величину (рис. 6).

Для порівняння – гідравлічний опір сульфовугілля при $V = 200$ м/год перевищує опір кулькової і стружкової фільтруючих загрузок в 73–75 разів [11]. Гідравлічний опір стружкової заправки за швидкості фільтрації 300–1000 м/год у 2–3 рази вище кулькової, але він в десятки разів менший, ніж опір сульфовугілля [11]. За даними [11, 12], залізовмісні домішки, що осаджені у феромагнітній фільтруючій загрузці, збільшують опір заправки в 1,2–1,3 раза.

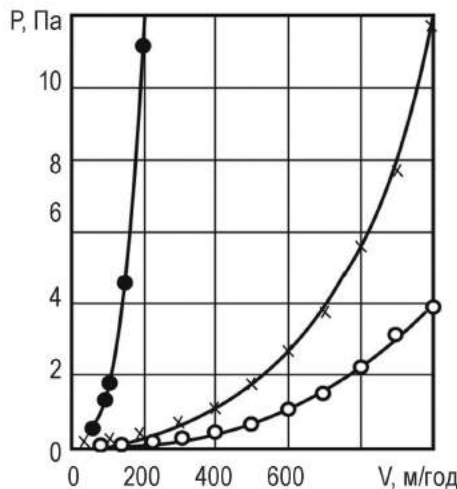


Рисунок 6 – Залежність гідравлічного опору шару сульфовугілля (●), гранул стружки (x), кульок діаметром 6 мм (○) від швидкості фільтрування: висота шару – 1,0 м, діаметр корпусу фільтра – 50 мм

На основі експериментальних залежностей з впливу величини H, L, d, V на величину ψ встановлено рівняння процесу магнітного осадження домішок у феромагнітній фільтруючій загрузці [5, 9, 13]

$$\psi = \lambda [1 - \exp(-\alpha_0 H^{0.75} L / v \cdot d^2)]. \quad (7)$$

Використовуючи залежність $\Delta P = f(R_g)$ [5], перетворимо рівняння (7) для ламінарного режиму у вигляді

$$\psi = \lambda [1 - \exp(-\alpha_0 H^{0.75} \cdot \Delta P \cdot d \cdot \Pi^{4.2} / K_1 \rho_p \cdot R_g \cdot v^2 \cdot v)], \quad (8)$$

для турбулентного режиму

$$\psi = \lambda [1 - \exp(-\alpha_0 H^{0.75} \cdot \Delta P \cdot d \cdot \Pi^{4.2} / K_2 \cdot \rho_p R_g^{1.75} \cdot v^2 \cdot v)]. \quad (9)$$

У формулах (7)–(9) H – напруженість зовнішнього магнітного поля; ΔP – втрати гідравлічного напору у фільтруючих загрузках; d – діаметр гранул; Π – пористість загрузки; ρ_p – густина рідини, що фільтрується; R_g – число Рейнольдса; v – кінематична в'язкість; v – швидкість фільтрування; K_1, K_2 – коефіцієнти пропорційності.

Технологічний параметр α_0 на основі експериментальних даних з визначення впливу довжини фільтруючої загрузки, напруженості магнітного поля, діаметра гранул загрузки на коефіцієнт осадження має значення: для виробничого конденсату ТЕЦ $\alpha_0 = 0,9 - 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; для живильної води ТЕС $\alpha_0 = 0,7 - 0,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; для оборотної води прокатного стану $\alpha_0 = 15 - 20 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ [5].

Для інтервалів $R_g = 10 - 3 \cdot 10^3$ і $\Pi = 0,4 - 0,7$ розрахунками встановлено, що для кулькових загрузок $K_1 = 25 - 30, K_2 = 1,1 - 1,3$. Для загрузки у вигляді гранул стружки

$K_1 = 90 - 110, K_2 = 4,0 - 4,8$; для гранул фериту – $K_1 = 68 - 82, K_2 = 3,0 - 3,6$.

Враховуючи, що $\Delta P \sim 1/\Pi^{4.2}$, слід зауважити, що величина пористості Π фільтруючої загрузки – один із найбільш важливих параметрів, який впливає на величину втрати напору ΔP у фільтруючій загрузці. Так, наприклад, при зміні пористості всього на 0,02, величина ΔP змінюється в 1,23 раза. Це свідчить про те, що таку чутливу залежність $\Delta P = f(\omega)$ можна використати для контролю процесу магнітного осадження феродомішок.

ВИСНОВКИ

Дослідним шляхом встановлено долю феромагнітної фракції забруднюючих домішок у зворотному виробничому конденсаті ТЕЦ ($\lambda = 90 \%$). Показано аналітичний метод розрахунку величини феромагнітної фракції (λ) домішок у водних системах. Досліджено технологічні параметри процесу магнітного осадження домішок у гранульованій феромагнітній фільтруючій загрузці. Наведено залежності гідравлічного опору фільтруючих загрузок від швидкості фільтрації. Запропоновано рівняння процесу магнітного осадження з врахуванням втрати тиску (ΔP), числа Рейнольдса (R_g), пористості загрузки (Π). Показано, що одним із важливих параметрів, що впливає на втрату напору (ΔP), є пористість загрузки.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. **Гаращенко, В.І.** Магніто-сорбційні властивості гранульованих фільтруючих насадок / В.І. Гаращенко, І.Г. Скрипник, О.П. Лук'ячук, О.В. Гаращенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування – 2008. – № 3. – С. 184–191.
2. **Гаращенко, В.І.** Екологічно безпечний метод очистки текучих середовищ в намагнічених поліградієнтних насадках / В.І. Гаращенко // Проблеми фундаментальної і прикладної екології, екологічної геології і раціонального природокористування : IV Міжнар. наук.-практ. конф., 19–21.03.2009 р. : тези доп. – Кривий Ріг, 2009. – С. 125–127.
3. **Сандуляк, А.В.** Електромагнітні фільтр-осадителі / А.В. Сандуляк, В.І. Гаращенко. – Л. : Вища школа, 1982. – 70 с.
4. **Сандуляк, А.В.** Определение магнитных форм соединений железа в водах электростанций / А.В. Сандуляк, Л.Н. Лазаренко, В.И. Гаращенко и др. // Изв. Вузов. Энергетика. – 1979. – № 9. – С. 46–50.
5. **Сандуляк, А.В.** Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов / А.В. Сандуляк. – М. : Химия, 1988. – 132 с.



6. **Гаращенко, В.І.** Магніто-фільтраційні властивості композиційної гранульованої заправки магнітних фільтрів / В.І. Гаращенко, І.М. Астрелін, О.В. Гаращенко // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2011. – № 2. – С. 11–17.
7. **Гаращенко, В.І.** Намагнічування ферито-феромагнітних гранульованих фільтруючих матеріалів / В.І. Гаращенко, О.В. Гаращенко // Вісник Тернопільського Національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2011. – № 3. – С. 85–91.
8. **Сандуляк, А.В.** Магнитная очистка оборотной воды прокатного стана от диспергированной окалины / А.В. Сандуляк, В.И. Гаращенко, В.В. Сандуляк и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1984. – № 4. – С. 64–65.
9. **Гаращенко, В.І.** Очистка оборотных вод металлургических производств от ферропримесей магнитными фильтрами / В.І. Гаращенко, А.В. Гаращенко // Теплотехника и энергетика в металлургии. XVI Междунар. конф., 4–6.10.2011 г., тез. докл. – Д., 2011. – С. 112–113.
10. **Гаращенко, В.І.** Енергоефективна технологія магнітного очищення водних систем від дисперсних феромагнітних забруднень / В.І. Гаращенко, О.В. Гаращенко, О.П. Лук'яничук // Инновационные энерготехнологии. XIV Междунар. науч.-практ. конф., 5–9.09.2011 г., тез. докл. – Одесса, 2011. – С. 115–118.
11. **Сандуляк, А.В.** О выборе фильтрующей насадки электромагнитных фильтров / А.В. Сандуляк, Л.И. Лазаренко, В.И. Гаращенко // Электрические станции. – 1980. – № 8. – С. 38–39.
12. **Heitmann, H.G.** Magnete reinigen Wasser. – Maschinenmarkt / H.G. Heitmann // Industriejournal. Würzburg – 1971. – Vol. 77, № 34. – S. 744–747.
13. **Сандуляк, А.В.** Очистка аммиачной воды «ч.д.а.» магнитным осаждением железосодержащих примесей / А.В. Сандуляк, В.И. Гаращенко, Н.В. Яцков, В.А. Дубчак // Изв. Вузов. Химия и химическая технология. – 1985. – № 10, Т. 28. – С. 80–83.

Поступила в редакцию 09.09.2011

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению величины ферромагнитной фракции примесей при магнитной очистке конденсата ТЭЦ. Исследовано влияние длины намагниченной ферромагнитной фильтрующей загрузки и напряженности магнитного поля на коэффициент осаждения ферромагнитных примесей оборотного производственного конденсата ТЭЦ.

The results of experimental researches on determining ferromagnetic fraction size of impurities at the magnetic purification of runback water of thermal station are given. Influence of a length of the magnetized ferromagnetic filtering load and tension of the magnetic field on the settling coefficient of ferromagnetic impurities of reverse runback water of thermal station was investigated.