

РОЗРАХУНОК ВТРАТИ ГІДРАВЛІЧНОГО НАПОРУ У ФІЛЬТРУЮЧИХ ЗАГРУЗКАХ МАГНІТНИХ ФІЛЬТРІВ

В.І. Гаращенко, О.В. Гаращенко, Є.З.Маланчук

Національний університет водного господарства та природокористування, м.Рівне
e-mail: v.i.harashchenko@nuwm.edu.ua

Обґрунтовано, що для глибокого очищення технологічних вод теплоенергетики раціональне використання магнітних фільтрів з феромагнітними гранульованими фільтруючими загрузками, які дозволяють очищати технологічні води з температурою до 500°C та швидкістю фільтрування до 1000 м/год. В процесі роботи фільтра гранульована загрузка при проходженні через неї потоку водного середовища створює гідравлічний опір, який характеризується втратою гідравлічного напору та коефіцієнтом гідравлічного опору. На основі великої кількості дослідних даних отримано удосконалений вираз для коефіцієнта гідравлічного опору гранульованої фільтруючої загрузки, що складається з кулькових гранул, при значеннях числа Рейнольдса >10 та аналітичне рівняння для визначення втрати гідравлічного напору ΔP . Встановлені аналітичні залежності величини ΔP для фільтруючої загрузки, гранули якої виготовлені як у вигляді кульок, так і у вигляді мініпаралелепіпедів (гранули подрібненої стружки зі сталі 0X13-40X13). Порівняльні розрахунки показують, що коефіцієнт гідравлічного опору стружкової загрузки в три рази вище кулькової. Дослідами встановлено, що для кульок $d=3,1$ мм, пористістю $\varepsilon=0,4$ і швидкістю $V=(0,4-2)$ м/с величина втрати напору ΔP в 5-6 разів більша в порівнянні з гранулами $d=6$ мм, $\varepsilon=0,42$, $V=(0,3-1,25)$ м/с та майже в 10 разів більша в порівнянні з кульками $d=7,9$ мм, $\varepsilon=0,43$, $V=(0,3-0,8)$ м/с. Аналізуючи залежності ΔP від V при різних d можна зробити висновок, що збільшення ΔP при менших d пояснюється геометрією "вікна" (повітряного прошарку) між кульковими гранулами. Розмір "вікна" при менших d буде меншим, тоді швидкість проходження водного потоку збільшується, а, відповідно, збільшується ΔP .

Ключові слова: магнітне очищення, фільтруюча загрузка, гідравлічний опір.

Вступ. Підприємства теплоенергетики є одними з найбільших споживачів води в промисловості як України, так і інших країн. Один сучасний енергоблок теплової електростанції споживає біля 30000м³/добу води. Для водопостачання підприємств теплоенергетики використовують природну воду, як з поверхневих (річки, озера), так і з підземних (артезіанські свердловини) джерел. Природні води є складними системами, що містять розчинні сполуки у вигляді іонів і молекул, мінеральні і органічні сполуки у формі колоїдів, суспензій і емульсій.

Після глибокого очищення природна вода потрапляє в замкнену систему теплової електростанції. Вода (конденсат) проходить тисячі метрів по металевим трубам та комунікаційному обладнанню. Така циркуляція води відбувається неперервно, внаслідок чого технологічна вода збагачується домішками продуктів корозії. Причиною наявності цих домішок є неперервна і прогресуюча в часі корозія, зношення в результаті експлуатації технологічного і комунікаційного обладнання. Дослідженнями встановлено, що основна

маса цих домішок складається з залізовмісних сполук, з яких 70-95% мають феромагнітні властивості.

Існуючі апарати і пристрої для очищення (механічні фільтри, відстійники, осаджувачі) громіздкі, дорогі, мають низьку швидкість фільтрування (15-25м/год), не достатньо ефективно очищують води теплових електростанцій, особливо якщо вони мають температуру 100°C і вище. Крім того процес регенерації механічних фільтрів довготривалий і вимагає використання хімічних реагентів, що призводить до забруднення навколишнього середовища. Враховуючи, що технологічні води теплоенергетичних підприємств забруднені домішками, що мають феромагнітні властивості, актуальним є використання технології магнітного очищення, яка базується на використанні магнітних фільтрів з феромагнітною пористою фільтруючою загрузкою.

Типовий магнітний фільтр складається з немагнітного циліндричного корпусу, заповненого феромагнітною фільтруючою загрузкою. Навколо корпусу розміщена намагнічуюча система у вигляді соленоїда, електромагнітів чи постійних магнітів. В процесі очищення намагнічуюча система створює між гранулами фільтруючої загрузки магнітне поле високої інтенсивності, де безпосередньо і проходить осадження феромагнітних забруднюючих домішок. При досягненні певного часу, який характеризується ємністю поглинання фільтруючої загрузки, магнітний фільтр виводять на регенерацію. Для цього відключають зовнішню намагнічуючу систему та протитоком промивають фільтр водоповітряною сумішшю, після чого знову включають його у роботу. Особливістю використання магнітних фільтрів є можливість очищати технологічні водні середовища з температурою до 500° С та швидкістю фільтрування до 1000м/год.

Методика розрахунків. В процесі роботи фільтра гранульована загрузка, при проходженні через неї потоку водного середовища, створює гідравлічний опір. Він характеризується втратою гідравлічного напору ΔP і коефіцієнтом гідравлічного опору λ . Експериментальними дослідженнями встановлено, що величини ΔP і λ залежать від швидкості фільтрування V , діаметра гранул загрузки d (або еквівалентного діаметру d_e , якщо гранули не кулькоподібної форми), пористості загрузки ε , висоти шару загрузки L , густини водного (рідкого) середовища ρ_p , кінематичної в'язкості середовища ν , числа Рейнольдса Re .

Число Рейнольдса характеризує режим руху рідкого середовища: ламінарний чи турбулентний.

Число Рейнольдса розраховується:

$$Re = v \cdot d / \nu. \quad (1)$$

Різні дослідники вкладають різний зміст в такі загальні поняття як критерій Рейнольдса, еквівалентний діаметр гранул загрузки, швидкість потоку. Тому до цього часу не існує єдиної методики розрахунку ΔP . Перехід ламінарного режиму руху в турбулентний оцінюється різними авторами по різному. Так, наприклад, за даними Міліонщикова [9] ламінарний режим здійснюється при $Re_{кр} = 0,022-0,29$, в роботах Жаворонкова [10] $Re_{кр} = 50-60$, по Карману [1] $Re_{кр} = 20-40$. Автори [1,9,10] при цьому використовують різні формули для розрахунку числа Re .

Гідравлічний опір гранульованої загрузки в умовах ламінарного режиму розраховується за рівнянням Козені-Кармана [1]:

$$\frac{\Delta P}{L} = K \frac{\mu \cdot v_0 (1 - \varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3}, \quad (2)$$

де K -стала Козені (за експериментальними даними Козені рівна 180); μ – динамічна в'язкість потоку; v_0 – швидкість з розрахунку на поперечний переріз пустого корпуса фільтра; d – діаметр гранул; ε – пористість загрузки, L - висота гранульованої загрузки.

Рівняння (2) наведено для шару однорідних кулькових гранул. Для гранул не кулькоподібної (довільної) форми рівняння (2) враховує фактор форми φ [1].

$$\frac{\Delta P}{L} = K \frac{\mu \cdot v_0}{\varphi^2 \cdot d^2} \frac{(1 - \varepsilon^2)}{\varepsilon^3}. \quad (3)$$

Для турбулентного режиму втрату напору розраховуємо за рівнянням:

$$\frac{\Delta P}{L} = \lambda' \frac{1}{\varphi \cdot d} \frac{\rho \cdot v_0^2}{2} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}, \quad (4)$$

де λ' - модифікований коефіцієнт опору; φ – фактор форми.

За даними Кармана $\lambda' = f(R_e)$, де:

$$R_{\dot{a}} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \frac{\varphi}{1 - \varepsilon}, \quad (5)$$

Як видно з рівняння (5), модифікований критерій R_e враховує фактор форми φ та пористість шару загрузки ε .

Для кулькової (в тому числі некулькової) гранульованої загрузки величину коефіцієнта гідравлічного опору за скорегованої формули Ергана розраховуємо [2]:

$$\lambda \cong \frac{\Delta P}{\rho v^2 / 2} = \left[\frac{360(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 R_e} + \frac{B'(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \right] \cdot \frac{L_0}{d_e} = \xi \frac{L_0}{d_e}, \quad (6)$$

$$\text{де } \xi = \frac{\Delta P}{\rho v^2 / 2 L_0 / d_e} = \frac{360(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot R_e} + \frac{B'(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} = \frac{A_1}{R_e} + B_1, \quad (7)$$

$$A_1 = 360(1 - \varepsilon)^2 / \varepsilon^3, \quad (8)$$

$$B_1 = B'(1 - \varepsilon) / \varepsilon^3. \quad (9)$$

Залежність A_1 від ε наведена на рис.1, крива 1.

Користуючись формулами 6-9 та діаграмою (рис.1) розраховували коефіцієнт гідравлічного опору λ та величину ΔP . Розраховані значення λ та ΔP порівнювали з експериментальними даними, наведеними в [3]. Розбіжність значень складала 15-25%. Це пояснюється формулою, яка була використана при розрахунку критерію R_e та точністю розрахунку величини ε в [2].

В [4] запропонований вираз для розрахунку втрати напору ΔP в товщі кускової загрузки з частинок одного розміру:

$$\Delta P = \frac{1}{\varepsilon^{4.2}} \left(\frac{120}{R_e} + \frac{23}{R_e^{0.5}} + 1,5 \right) \frac{\rho \cdot v^2 L}{2d}. \quad (10)$$

Для кулькової загрузки значення ΔP розрахованого за формулою (10) в порівнянні з дослідними даними дає похибки $\approx 15-20\%$.

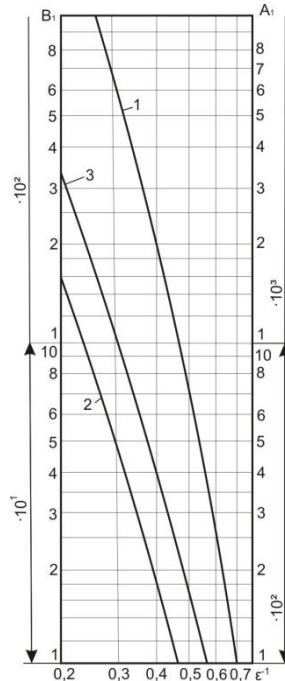


Рис.1 Діаграма для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору

На основі великої кількості дослідних даних в [5] отриманий удосконалений вираз для коефіцієнта гідравлічного опору λ гранульованої загрузки, що складається з кулькових частинок при значеннях числа Рейнольдса $R_e > 10$ [3,5].

$$\lambda = \frac{4}{\varepsilon^{4.2}} \left(\frac{10}{R_e} + \frac{1}{\ln R_e} \right). \quad (11)$$

Величина R_e розраховувалась за формулою (11). Розрахунок дослідних даних λ для отримання (11) виконаний за формулою [5]:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot d}{\rho_p \cdot v^2 \cdot L}. \quad (12)$$

Використовуючи (11) і (12), отримаємо [3,6]

$$\Delta P = \frac{4 \rho_p \cdot L \cdot v^2}{2 \varepsilon^{4.2} \cdot d} \left(\frac{10}{R_e} + \frac{1}{\ln R_e} \right) \quad (13)$$

і з врахуванням (1) рівняння (13) модифікується

$$\Delta P = \frac{2\rho \cdot v^2 \cdot L}{\varepsilon^{4.2} \cdot d^3} \left(10R_e + \frac{R_e^2}{\ln R_e} \right). \quad (14)$$

Вираз в дужках запишемо через параметр K_{Re} [3,6]

$$K_{Re} = 10R_e + \frac{R_e^2}{\ln R_e}. \quad (15)$$

В логарифмічних координатах, в діапазоні $R_e=100\dots3000$, коефіцієнт K_{Re} лінеаризується

$$K_{Re} = 3,5 \cdot R_e^{1.75}. \quad (16)$$

В такому випадку формула (14) для ΔP гранульованої кулькової загрузки після перетворень матиме вигляд:

$$\Delta P = 1,75 \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L \cdot R_e^{1.75}}{\varepsilon^{4.2} \cdot d^3}. \quad (17)$$

Використовуючи (1), формулу (17) запишемо

$$\Delta P = 1,75 \frac{\rho \cdot v^{0.25} \cdot L}{\varepsilon^{4.2} \cdot d^{1.25}} \cdot v^{1.75}. \quad (18)$$

Результати розрахунків та їх аналіз. Відоме широке використання в якості гранульованої фільтруючої загрузки гранул стружки з спеціальних корозійностійких феромагнітних сталей, наприклад 0X13-40X13 [7,8]. Використовуючи формули (17) та (18) та виконуючи нескладні перетворення, отримаємо величину ΔP для стружкової гранульованої загрузки [6]

$$\Delta P = 5,4 \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L}{\varepsilon^{4.2} \cdot l^3} \cdot R_e^{1.75} \quad (19)$$

$$\text{або} \quad \Delta P = 5,4 \frac{\rho \cdot v^{0.25} \cdot L}{\varepsilon^{4.2} \cdot l^{0.25}} \cdot v^{1.75}. \quad (20)$$

Розрахунки показують, що коефіцієнт гідравлічного опору стружкової загрузки в три рази вище кулькової.

Залежність втрати напору ΔP від швидкості фільтрування в кульковій загрузці наведена на рис.2.

Видно, що для кульок $d=3,1$ мм, $\varepsilon=0,4$, $v=(0,4-2)$ м/с величина ΔP більша в 5-6 разів в порівнянні з кульками $d=6,0$ мм, $\varepsilon=0,42$, $v=(0,3-1,25)$ м/с, та майже в 10 разів більша в порівнянні з кульками $d=7,9$ мм, $\varepsilon=0,43$, $v=(0,3-0,8)$ м/с. Зі збільшенням швидкості в

кулькових загрузках ($v > 2 \text{ см/с}$) різниця між значеннями величини ΔP для різних загрузок зменшується.

Аналізуючи залежності $\Delta P = f(v)$ при різних d і ϵ , можна зробити висновок. Збільшення ΔP при менших d пояснюється геометрією „вікна” (повітряного прошарку) між кульковими гранулами. Розмір „вікна” при менших d буде також меншим, відповідно, швидкість проходження водного потоку збільшується, а відповідно, і ΔP . Крім того, кількість гранул в одиниці об’єму збільшується і сила лобового опору також збільшується, що також впливає на ΔP .

На рис.3 наведені залежності втрати напору ΔP від пористості і характерного розміру гранул. Збільшення пористості з 0,45 до 0,7 (рис.3) для гранул стружки $d=6-7$ мм супроводжується зменшенням втрат напору з 3 до 0,5 кПа, для гранул, $d=3-4$ мм збільшення пористості з 0,5 до 0,64 призводить до зменшення втрати напору з 4,5 до 1,5кПа. В першому випадку ($\epsilon=0,45-0,7$) збільшення пористості в 1,55 раза призводить до втрати напору в 6 разів ($\Delta P=3-0,5$), в другому випадку ($\epsilon=0,5-0,64$) збільшення пористості в 1,28 раза призводить до втрати напору в 3 рази.

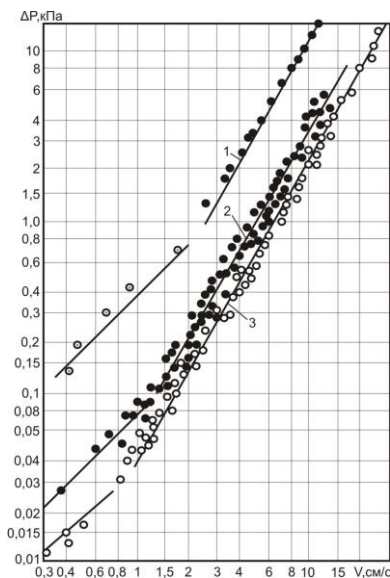


Рис.2 Залежність втрати напору в кульковій загрузці від швидкості фільтрування ($L=0,24\text{м}$):

- 1 – $d=3,1\text{мм}$, $\epsilon=0,4$;
- 2 – $d=6,0\text{мм}$, $\epsilon=0,42$;
- 3 – $d=7,9\text{мм}$, $\epsilon=0,43$;

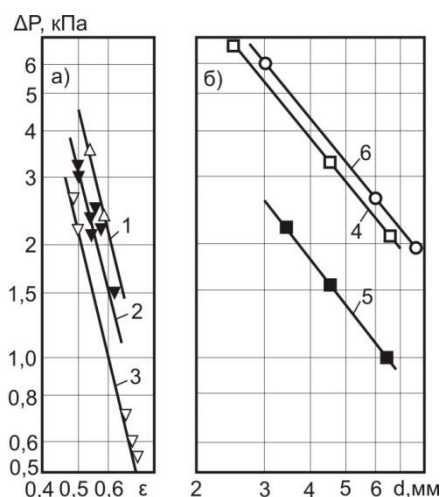


Рис.3 Залежність втрат напору від пористості (а) та характерного розміру (б) гранул ($v=5,6\text{ м/с}$, $L=0,24\text{ м}$, 1-5 загрузка з гранул стружки, 6 - кульки): 1 - $d=3\text{--}4\text{ мм}$; 2 - $d=4\text{--}5\text{ мм}$; 3 - $d=6\text{--}7\text{ мм}$; 4 - $\varepsilon=0,5$; 5 - $\varepsilon=0,6$; 6 - $\varepsilon=0,36$.

Аналіз графічних залежностей $\Delta P=f(\varepsilon)$ засвідчує, що величина пористості фільтруючої заправки є одним з важливих параметрів, який визначає втрату напору та величину коефіцієнта гідравлічного опору.

Порівнюючи залежності 4 і 5 (рис.3, б), засвідчуємо, що зміна діаметра гранул з 3 мм до 7 мм для заправки з пористістю $\varepsilon=0,5$ зменшує втрату напору ΔP з 5,3 до 1,85 кПа, для заправки з $\varepsilon=0,6$ зменшує втрату напору з 2,7 до 0,9 кПа. Видно, що збільшення діаметра гранул в 2,33 рази призводить до зменшення втрати ΔP в 2,85 та 3 рази.

Висновки:

- гідравлічний опір гранульованої фільтруючої заправки магнітних фільтрів залежить від швидкості потоку води, діаметра гранул, динамічної в'язкості, пористості заправки, числа Рейнольдса;
- для гранул фільтруючої заправки діаметром $d=3,1\text{ мм}$, пористістю $\varepsilon=0,4$ і швидкістю $V=(0,4\text{--}2)\text{ м/с}$ величина втрати напору ΔP в 5-6 разів більша в порівнянні з гранулами $d=6\text{ мм}$, $\varepsilon=0,42$, $V=(0,3\text{--}1,25)\text{ м/с}$;
- величина втрат напору ΔP залежить від пористості і характерного розміру гранул. Так збільшення пористості з 0,45 до 0,7 для гранул стружки $d=6\text{--}7\text{ мм}$ супроводжується зменшенням втрат напору з 3 до 0,5 кПа.
- збільшення ΔP при менших d пояснюється геометрією "вікна" (повітряного прошарку) між кульковими гранулами. Розмір "вікна" при менших d буде меншим, тоді швидкість проходження водного потоку збільшується, а, відповідно, збільшується ΔP .

РАСЧЕТ ПОТЕРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО НАПОРА В ФИЛЬТРУЮЩИХ ЗАГРУЗКАХ МАГНИТНЫХ ФИЛЬТРОВ

В.И. Гаращенко, А.В. Гаращенко, Е.З.Маланчук

Национальный университет водного хозяйства и природопользования
e-mail: v.i.harashchenko@nuwm.edu.ua

Обосновано, что для глубокой очистки технологических вод теплоэнергетики рационально использование магнитных фильтров с ферромагнитными гранулированными фильтрующими загрузками, которые позволяют очищать технологические воды с температурой до 500°C и скоростью фильтрования до 1000 м/ч. В процессе работы фильтра гранулированная загрузка при прохождении через нее водного потока создает гидравлическое сопротивление, которое характеризуется потерей гидравлического напора и коэффициентом гидравлического сопротивления. На основе большого количества опытных данных получено усовершенствованное уравнение для коэффициента гидравлического сопротивления гранулированной фильтрующей загрузки, состоящей из шариковых гранул, при значениях числа Рейнольдса > 10 и аналитическое уравнение для определения потери гидравлического напора ΔP . Установлены аналитические зависимости величины ΔP для фильтрующей загрузки, гранулы которой изготовлены как в виде шариков, так и в виде минипараллелепипедов (гранулы измельченной стружки из стали 0X13-40X13). Сравнительные расчеты показывают, что коэффициент гидравлического сопротивления стружечной загрузки в три раза выше шариковой. Опытами установлено, что для шариков $d = 3,1$ мм, пористостью $\varepsilon = 0,4$ и скоростью $V = (0,4-2)$ м/с величина потери напора ΔP в 5-6 раз больше по сравнению с гранулами $d = 6$ мм, $\varepsilon = 0,42$, $V=(0,3-1,25)$ м/с, и почти в 10 раз больше по сравнению с шариками $d = 7,9$ мм, $\varepsilon = 0,43$, $V=(0,3-0,8)$ м/с. Анализируя зависимости ΔP от V при различных d можно сделать вывод, что увеличение ΔP при меньших d объясняется геометрией "окна" (воздушной прослойки) между шариковыми гранулами. Размер "окна" при меньших d будет меньше, тогда скорость прохождения водного потока увеличивается, а, соответственно, увеличивается ΔP .

Ключевые слова: магнитная очистка, фильтрующая загрузка, гидравлическое сопротивление.

CALCULATION OF HYDRAULIC PRESSURE LOSS IN FILTERING NOZZLES OF MAGNETIC FILTERS

V.I.Garashchenko, O.V.Garashchenko, E.Z.Malanchyk

National University of Water and Environmental Engineering
e-mail: v.i.harashchenko@nuwm.edu.ua

It was proved that use of magnetic filters with ferromagnetic granular filtering masses for deep purification of technological water of heat power engineering is rational. This allows purification of the technological waters with temperature up to 500°C and velocity of filtration up to 1000 m/h. During operation of filter the granulated medium creates hydraulic resistance when a stream of water passes through it, which is characterized by a loss of hydraulic pressure and hydraulic resistance coefficient. Based on the large amount of experimental data the improved equation for the coefficient of hydraulic resistance for granular filtering mass, in the form of ball pellets, at values of Reynolds coefficient more than 10 and analytical equations to determine the loss of hydraulic pressure ΔP were obtained. The analytical dependence of ΔP value for filtering materials both in the form of balls and mini parallelepipeds (pellets of

crushed steel chips 0X13-40X13) were determined. Comparative calculations show that the coefficient of hydraulic resistance of chip mass is three times higher than that of the ball mass. Experiments found that for balls mass with diameter $d=3,1\text{mm}$, porosity $\varepsilon=0,4$, and velocity $V=(0,4-2)\text{ m/s}$ the value of pressure loss ΔP is 5-6 times higher compared to granules with $d=6\text{ mm}$, $\varepsilon=0,42$, $V=(0,3-1,25)\text{ m/s}$, and almost 10 times higher than for the ball granules with $d=7,9\text{mm}$, $\varepsilon=0,43$, $V=(0,3-0,8)\text{ m/s}$. After analyzing of the ΔP dependence on V for different diameters a conclusion can be drawn that the increase of ΔP at smaller diameters is explained by "window" geometry (air layer) between granules. The size of "window" with smaller diameters is less, so velocity of the water flow increases and ΔP value increases too.

Keywords: magnetic purification, filtering mass, hydraulic resistance.

Список використаної літератури

1. P.G.Romankov, M.I.Kuročkina, Gidromehaničeskie processy himičeskoj tehnologii // Leningrad, Himiâ, 1974, 288 p.
2. Pod. red. M.O.Štejnberga, I.E.Idel'čika, Spravočnik po gidravličeskim soprotivleniâm // Moskva, Mašinstroenie, 1992, 672 p.
3. A.V.Sandulâk, Magnito-fil'tracionnaâ očistka židkostej i gazov // Moskva, Himiâ, 1988, 132 p.
4. S.S.Kutateladze, V.M.Borišanskij, Spravočnik po teploperedache // Moskva, Gosenergoizdat, 1958, 568p.
5. V.M.Borišanskij, O.S.Vinogradov, I.P.Luzin, Gidravličeskie soprotivleniâ zasipok iz sferičeskih častic // Moskva, Teploenergetika, 1980, №1, P.61-64.
6. A.V.Sandulâk, Očistka židkostej v magnitnom pole / L'vov, Viša škola, 1984, 166p.
7. V.I.Garašenko, I.G.Skripnik, O.P.Luk'ânčuk, O.V.Garašenko, Magnito-sorbcijni vlastivosti granul'ovanih fil'truičih nasadok // Visnik Nacional'nogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodokoristuvannâ, 2008, № 3, P.184-191.
8. O.V.Garašenko, Intensifikaciâ procesu očistki vodnih sistem z feromagnetnoû komponentoû // Ekologični problemi prirodokoristuvannâ ta effektivne energozberežennâ: mižnarodna naukovo – praktična konferenciâ molodih včeni i studentiv. tezi dopovidi, Kyiv, 2010, P.138-139.
9. Millionšikov M.D. Turbulentnye tečeniâ v pograničnom sloe i v trubah. //Moskva, Nauka, 1969, 43 p.
10. Žavoronkov N.M. Gidravličeskie osnovy skrubbernogo processa i teploperedacha v skrubberah. //Moskva, Sovetskaâ nauka, 1944, 224 p.