

УДК 519.63:532.5:004.942:681.518.5



А.П. Сафоник¹, І.М. Таргоній²

Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна, safonik@ukr.net

Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна, tamplier.targoniy.93@ukr.net

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МАГНІТНОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

Розв'язано модельну задачу типу „конвекція-масообмін” для процесу очищення водних середовищ у зернистому намагніченому фільтруючому матеріалі. Виконано математичний аналіз параметрів і моделі процесу магнітного осадження домішок. Розроблено систему автоматизації процесу постійного очищення води від магнітних домішок.

МАГНІТНЕ ОСАДЖЕННЯ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ
ФІЛЬТРУВАННЯ

Вступ

Технологічні водні системи багатьох галузей промисловості, як відомо, забруднені різного роду домішками. Гостро ця проблема стоїть в тепловій і атомній енергетиці (ТЕЦ, ТЕС, АЕС), хімічній, металургійній, скляній, спиртовій, керамічній, авіаційній промисловостях. Основною причиною наявності домішок у водних технологічних системах є неперервна корозія технологічного та комунікаційного обладнання. В оборотних (стічних) водах металургійних виробництв концентрація диспергованої окалини сягає 100 мг/л, при нормі 10 мг/л. Така висока концентрація окалини призводить до швидкого зносу технологічного обладнання, погіршення якості продукції, що випускається. Для видалення феромагнітних домішок з технологічних водних систем запропоновано використовувати метод магнітного осадження домішок в намагніченому зернистому фільтруючому матеріалі. Перевагами даного методу є можливість очищення водного середовища з температурою до 500 °С, швидкістю фільтрування до 1000 м/год, можливість очищати хімічно агресивні середовища. Регенерація зернистих феромагнітних фільтруючих матеріалів не потребує хімічних реагентів, що робить метод магнітного очищення екологічно безпечним.

1. Аналіз досліджень і публікацій

Численними дослідженнями встановлено, що основна маса домішок є залізовмісними з феромагнітними властивостями [1, 2, 4, 7]. Відкладення домішок на парогенеруючих поверхнях котлів теплових станцій в кількості всього 200-300 г/м², що відповідає товщині відкладень 0,3-0,5 мм, обумовлює додатковий перегрів труб на 50-120 °С, що в окремих випадках призводить до перепалів та розривів труб.

Відомі експериментальні дослідження з визначення впливу параметрів процесу магнітного очищення на коефіцієнт магнітного осадження,

концентрацію залізовмісних домішок, період фільтроциклу [1, 2, 7]. Актуальною задачею є математичний аналіз параметрів та моделювання процесу магнітного осадження домішок при очищенні як багатоконцентрованих, так і малокоцентрованих водних систем та автоматизація відповідного процесу очищення.

2. Постановка задачі

Розглянемо просторово-одновимірний процес очищення рідини шляхом фільтрування у шарі зернистого фільтруючого матеріалу товщиною L (що ототожнюється з відрізком $[0, L]$ осі $0x$). Припускаємо [3, 5], що частинки забруднення (домішки) можуть переходити з одного стану в інший (процеси захоплення-відриву) і, при цьому, має місце зворотній вплив відповідних концентрацій на характеристики розглянутого шару. Відповідний процес фільтрування з урахуванням зворотного впливу характеристик процесу (концентрації забруднення рідини й захоплених частинок) на характеристики середовища (коефіцієнти пористості, фільтрації, масообміну, напруженості магнітного поля) за аналогією з [2-5]) опишемо наступною модельною задачею:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sigma(\rho)c(x,t))}{\partial t} + \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + v \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = \beta(H, v, d)c(x,t) - \epsilon \alpha(\rho)\rho(x,t), \end{cases} \quad (1)$$

$$c|_{x=0} = c^*(t), \quad c|_{t=0} = 0, \quad \rho|_{x=0} = 0, \quad \rho|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

$$v = \kappa(\rho) \cdot \text{grad } p, \quad (3)$$

де $c(x,t)$ – концентрація домішок в рідкому середовищі, що фільтрується; $\rho(x,t)$ – концентрація домішок, осаджених у зернистому фільтруючому матеріалі; β – коефіцієнт, що характеризує масові обсяги осадження домішкових частинок за одиницю часу

$(\beta(H, v, d) = \frac{\beta_0 H^{0.75}}{vd^2}$ [7], де β_0 – вільний параметр, H – напруженість магнітного поля, v – швидкість

фільтрування, d – діаметр гранул фільтруючого матеріалу), $\alpha(\rho, H)$ – коефіцієнт, що характеризує масові обсяги відірваних за той же час від гранул фільтруючого матеріалу домішкових частинок;

$$\alpha(\rho) = \alpha_0 + \varepsilon \alpha_* \rho(x, t), \quad (4)$$

$c^*(t)$ – концентрація домішкових частинок на вході фільтра, $\sigma(\rho)$ – пористість фільтруючого матеріалу (σ_0 – вихідна пористість фільтруючого матеріалу),

$$\sigma(\rho) = \sigma_0 - \varepsilon \sigma_* \rho(x, t), \quad (5)$$

$\kappa(\rho)$ – коефіцієнт фільтрування, $\rho_0 = \rho(L, \tau_7)$,

$$\kappa(\rho) = \begin{cases} \kappa_0 - \varepsilon \gamma \rho(x, t), & \rho < \rho_0, \\ \kappa_0 - \varepsilon \gamma \rho(x, \tau_7), & \rho \geq \rho_0, \end{cases} \quad (6)$$

$\alpha_0, \alpha_*, \sigma_*, \kappa_0, \gamma, \varepsilon$ – жорсткі параметри (вони характеризують відповідні коефіцієнти) $\alpha(\rho), \sigma(\rho), \kappa(\rho)$ – змінні параметри (знаходяться дослідним способом), ε – малий параметр, p – тиск. При цьому зазначимо, що на відміну від [3,5], в більш загальному випадку тиск $p = p(x, t)$ раціонально було б визначити в результаті розв’язання рівняння

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(\rho) \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial \sigma(\rho) p}{\partial t},$$

яке отримане на підставі записаного вище рівняння руху і рівняння стану: $div v = \frac{\partial \sigma(\rho) p}{\partial t}$ при крайових

$p(0, t) = p^*(t)$, $p(L, t) = p^*(t)$ ($0 < t < \infty$) і початкових $p(x, 0) = p^*(x)$ ($0 < x < L$) умовах ($p^*(t)$, $p^*(x)$) – задані досить гладкі й погоджені в кутових точках області $G = \{(x, t) : 0 < x < L, 0 < t < \infty\}$ функції. При цьому, у процесі розв’язання задачі, можемо визначити відповідне значення $grad p$, зокрема – різницю тисків $\Delta P = p^*(t) - p_*(t)$ на вході й виході з фільтра.

3. Розв’язок задачі

Розв’язки системи (1) за умов (2) шукаємо у вигляді асимптотичних рядів [3, 4]:

$$c(x, t) = c_0(x, t) + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i c_i(x, t) + R_c(x, t, \varepsilon),$$

$$\rho(x, t) = \rho_0(x, t) + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \rho_i(x, t) + R_\rho(x, t, \varepsilon), \quad (7)$$

де R_c, R_ρ – залишкові члени, $c_i(x, t)$, $\rho_i(x, t)$ ($i = \overline{0, n}$) – члени регулярних частин асимптоти.

Аналогічно до [6], після підстановки (7) в (1) та застосування стандартної “процедури прирівнювання”, для знаходження функцій c_i і ρ_i ($i = \overline{0, n}$) приходимо до таких задач:

$$\begin{cases} \sigma_0 \frac{\partial c_0}{\partial t} + v \frac{\partial c_0}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0}{\partial t} = 0, & \frac{\partial \rho_0}{\partial t} = \frac{\beta_0 H^{0.75}}{v d^2} c_0, \\ c_0|_{x=0} = c^*(t), & c_0|_{t=0} = 0, \rho_0|_{x=0} = 0, \rho_0|_{t=0} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sigma_* \rho_{i-1} \frac{\partial c_i}{\partial t} + v \frac{\partial c_i}{\partial x} + \sigma_* \frac{\partial \rho_{i-1}}{\partial t} c_i + \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \frac{\beta_0 H^{0.75}}{v d^2} c_i - g_i, \\ c_i|_{x=0} = 0, c_i|_{t=0} = 0, \rho_i|_{x=0} = 0, \rho_i|_{t=0} = 0, i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (9)$$

де $g_i(x, t) = \sum_{j=1}^i \rho_{j-1} \left(\alpha_0 + I(i, j) \sum_{j=2}^i (\alpha_* \rho_{i-2}) \right)$.

Моделювання проводимо в програмному середовищі Matlab, зокрема М-функцію *pdepe*. Для роботи з даною функцією перетворимо системи (8), (9) у машинний код:

$$\begin{cases} \sigma_0 \frac{\partial c_0}{\partial t} + v \frac{\partial c_0}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial \rho_0}{\partial t} = \beta \cdot c_0. \end{cases} \Leftrightarrow c(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} =$$

$$= x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} (x^m f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})) + s(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}),$$

Команди в Matlab:

```
function [c,f,s] = pdex2pde(x,t,u,DuDx)
S=200;
V=200;
B=6.1;
c = [S; 1];
f = [0; 0];
s = [-V*DuDx(1)-u(2); B*u(1)];
```

Початкові умови

$$\begin{cases} c_0(x, t_0) = 2, \\ \rho_0(x, t_0) = 0. \end{cases} \Leftrightarrow u(x, t_0) = u_0(x)$$

Команди в Matlab:

```
function u0 = pdex2ic(x)
u0 = [2; 0];
```

Граничні умови

$$\begin{cases} c_0(x_L, t) = 2, & \frac{\partial c_0(x_R, t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \rho_0(x_L, t)}{\partial x} = 0, & \rho_0(x_R, t) = 0. \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow p(x, t, u) + q(x, t) \cdot f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) = 0$$

Команди в Matlab:

```
function [pl,ql,pr,qr] = pdex2bc(xl,ul,xr,ur,t)
pl = [0; 0];
ql = [1; 1];
pr = [0; 0];
qr = [1; 1];
```

Для виклику функції *pdepe* маємо наступний код:

```
m = 0;
sol = pdepe(m,@pdex2pde,@pdex2ic,@pdex2bc,
x,t);
u1 = sol(:,1);
u2 = sol(:,2);
figure
```

```
surf(x,t,u1)
title('c0(x,t)')
xlabel('Distance x')
ylabel('Time t')
shading flat
figure
surf(x,t,u2)
title('p0(x,t)')
xlabel('Distance x')
ylabel('Time t')
shading flat
```

В результаті комп'ютерного моделювання (при наступних вхідних даних: $c^*(t) = 2$ мг/л, $L = 1$ м, $v = 200$ м/год, $\beta_0 = 0.9 \cdot 10^{-9}$ м²/с, $H = 80$ кА/м, $d = 5$ мм, коефіцієнти $\alpha_0 = 0.28 \cdot 10^{-13}$ м²/с, $\alpha_* = 0.65$, $\epsilon = 0.01$, $\sigma_0 = 0.5$, $k_0 = 1$) отримали наступні результати (див. рис. 1–4).

Час захисної дії фільтра визначається в момент мінімального відхилення тиску (див. рис. 1) для розглянутого процесу він дорівнює 76 год.

З рис. 2 видно, що фільтр захоплює частинки протягом певного часу, а далі ефективність його дуже мала і концентрація часток на виході фільтра

з часом падає, що підтверджує ефективність даного фільтра як показано на рис. 3.

Згідно з рис. 4 час очистки фільтра значно перевищує час роботи фільтра, тому для ефективної автоматизації достатньо системи із 2 фільтрів.

Для автоматизації процесу магнітного очищення води розроблено функціональну схему автоматизації представлено на рис. 5, згідно якої керування системою відбувається переведенням потоку фільтруючої рідини між двома фільтрами. Під час фільтрування робочим фільтром інший «забруднений» автоматично проводить регенерацію.

Всі функції регулювання та контролю основних параметрів у проектованій системі автоматизації виконує програмований логічний контролер МІК-51 вітчизняного підприємства «Мікрол» з модулем розширення МР-07, який при даній конфігурації має чотири аналогові входи, три дискретних входи і чотири аналогові виходи, п'ять дискретних виходів, яких достатньо для керування даною системою.

Для регулювання концентрації домішок у рідкому середовищі використовується система, яка складається з 2 фільтрів, 4 датчиків тиску, програмованого логічного контролера МІК-51 з модулем розширення МР-07 та 8 регулюючих клапанів.

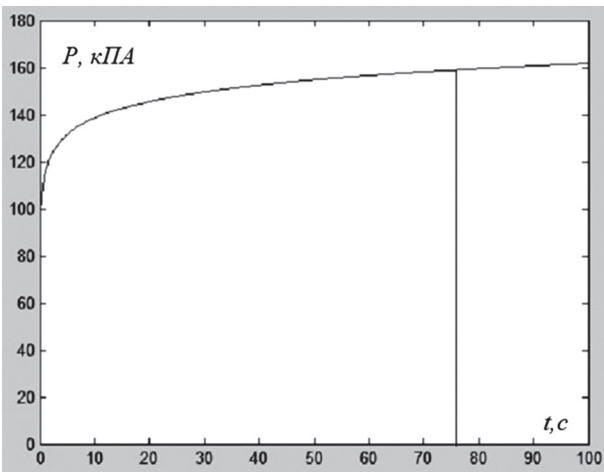


Рис. 1. Зміна різниці тисків

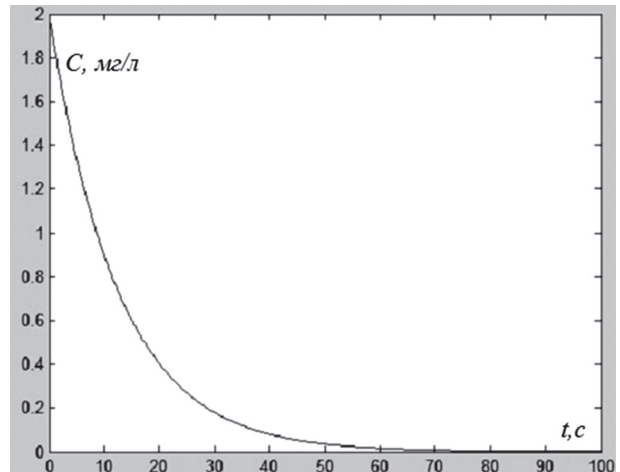


Рис. 3. Зміна концентрації частинок у розчині

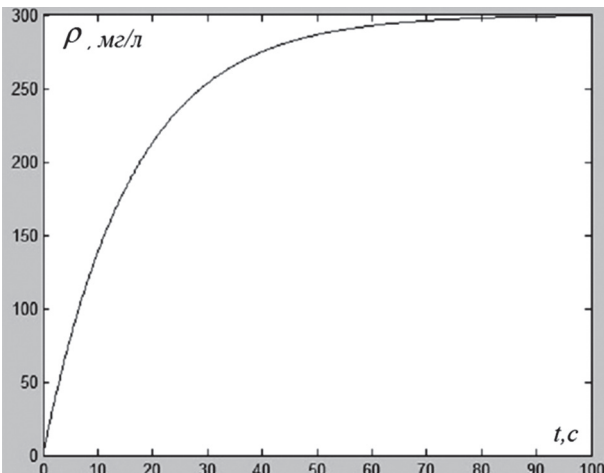


Рис. 2. Зміна концентрації частинок, що захопилися в фільтрі

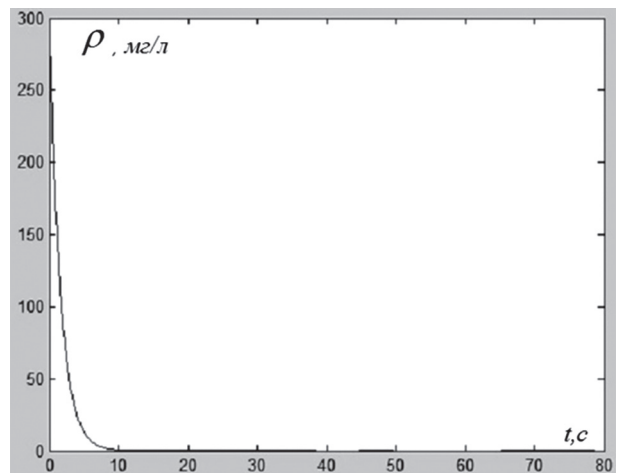


Рис. 4. Зміна концентрації частинок при очистці фільтра

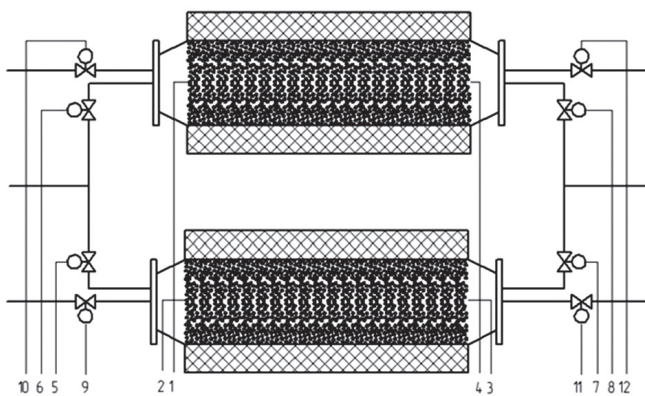


Рис. 5. Функціональна схема автоматизації

Програма керування працює наступним чином: сигнали з аналогових входів (AIN-1, AIN-2) надходять на суматор (SUMM-6) де від величини 1 аналогового входу віднімається значення 2 аналогового входу і ця різниця надходить на блок порівняння (CMP-7), де порівнюється з заданим значенням. Коли різниця величин 1 і 2 аналогового входів досягла заданого значення на виході блока порівняння з'являється логічна "1", яка надходить на RS-тригер (TRIG-9) встановлює його вихід в "1" і міняє стани дискретних виходів (DOT-10, DOT-11, DOT-12, DOT-13), що здійснюють припинення подачі води через 1 фільтр і переведення потоку рідини на 2 фільтр. Сигнал з виходу RS-тригера паралельно надходить на таймер (TIMER-14), який запускається, коли на вході логічна "1" і відразу на його виході з'являється логічний "0", який встановлює дискретні виходи (DOT-16, DOT-17) в "1", оскільки їхні входи є інвертовані, то здійснюється очистка фільтра 1. Після досягнення заданого часу (порядку 2 год.) даним на виході таймера (TIMER-14) з'являється логічна "1", яка міняє стани дискретних виходів (DOT-16, DOT-17), що припиняє очистку 1 фільтра.

Контролер згідно програми керує подачею води через один або інший фільтр, зокрема переключення відбувається наступним чином: сигнали з датчиків тиску 1,2 і 3,4 після попереднього перетворення надходять на контролер, де віднімаються між собою і порівнюються з заданим значенням, після чого якщо фільтр вже не затримує частинок (досягнуто відповідне значення різниці тисків), подається сигнал закриття на регулюючі клапани 6 і 8, а також паралельно сигнал на відкриття на регулюючі клапани 5 і 7 або навпаки. В результаті чого відбувається переведення потоку рідини з одного фільтра на інший. Для подальшого використання попереднього фільтра необхідно його очистити, тому після переведення потоку рідини подається сигнал на відкриття на регулюючі клапани 10 і 12, як наслідок фільтр очищається потоком рідини, аналогічно для очистки іншого фільтра після переведення потоку рідини подається сигнал на відкриття на регулюючі клапани 11 і 9. В системі

також наявне блокування подачі потоку рідини, яке відбувається тоді, коли тиск перед фільтром перевищує допустиме значення, що може відбуватися з різних причин: збільшення тиску рідини в трубопроводі, потрапляння предметів великого діаметру, які не проходять через фільтр, таким чином «забиваючи» його, що збільшує тиск в системі. Система блокування використовується тільки для датчиків тиску, що знаходяться перед фільтром, оскільки в них тиск природно є більший. Дана система працює наступним сигналі з аналогових входів (AIN-1, AIN-3) порівнюються з заданим значенням і якщо тиск знаходиться в допустимих межах, то система працює до тих пір поки тиск не досягне задане значення. Якщо ж тиск досяг заданого значення, то контролер надсилає сигнали на закриття для регулюючих клапанів 5,6 і сигнал на відкриття для 7,8, що припиняє подачу потоку рідини в фільтр і зливає залишок води з фільтра.

Аналогічним чином працює 2 частина програми: сигнали з аналогових входів (AIN-3, AIN-4) надходять на суматор (SUMM-5) де від величини 1 аналогового входу віднімається значення 2 аналогового входу і ця різниця надходить на блок порівняння (CMP-8), де порівнюється з заданим значенням. Коли різниця величин 3 і 4 аналогового входів досягла заданого значення, то на виході блока порівняння з'являється логічна "1", яка надходить на RS-тригер (TRIG-9) і встановлює його вихід в "0" і міняє стани дискретних виходів (DOT-10, DOT-11, DOT-12, DOT-13), що здійснюють припинення подачі води через 2 фільтр і переведення потоку рідини на 1 фільтр. Сигнал з виходу RS-тригера паралельно надходить на таймер (TIMER-15), який запускається, коли на вході є логічний "0" і відразу на його виході з'являється логічна "1", яка встановлює дискретні виходи (DOT-18, DOT-19) в "1", оскільки їхні входи є інвертовані, що здійснюють очистку 2 фільтра. Коли даний час досягає заданий, то на виході таймера (TIMER-15) з'являється логічна "1", яка міняє стани дискретних виходів (DOT-18, DOT-19), що припиняє очистку 2 фільтра. Для того щоб при кожному новому переведенні потоку таймер знову відраховував новий час, а не продовжував рахувати таймер сам себе скидає. Це реалізується наступним чином: на вхід dRST таймера під'єднується вихід dOUT. Для того щоб таймер почав новий відлік треба на вхід dRST подати логічну «1», яка на виході dOUT з'являється при досягненні часу, який відраховує таймер.

Висновки

В результаті роботи отримано розв'язок модельної задачі процесу очищення водних середовищ у зернистому намагніченому фільтруючому матеріалі, проведено автоматизацію системи для постійної очистки води з врахуванням зміни параметрів потоку, яка керує двома фільтрами з постійним

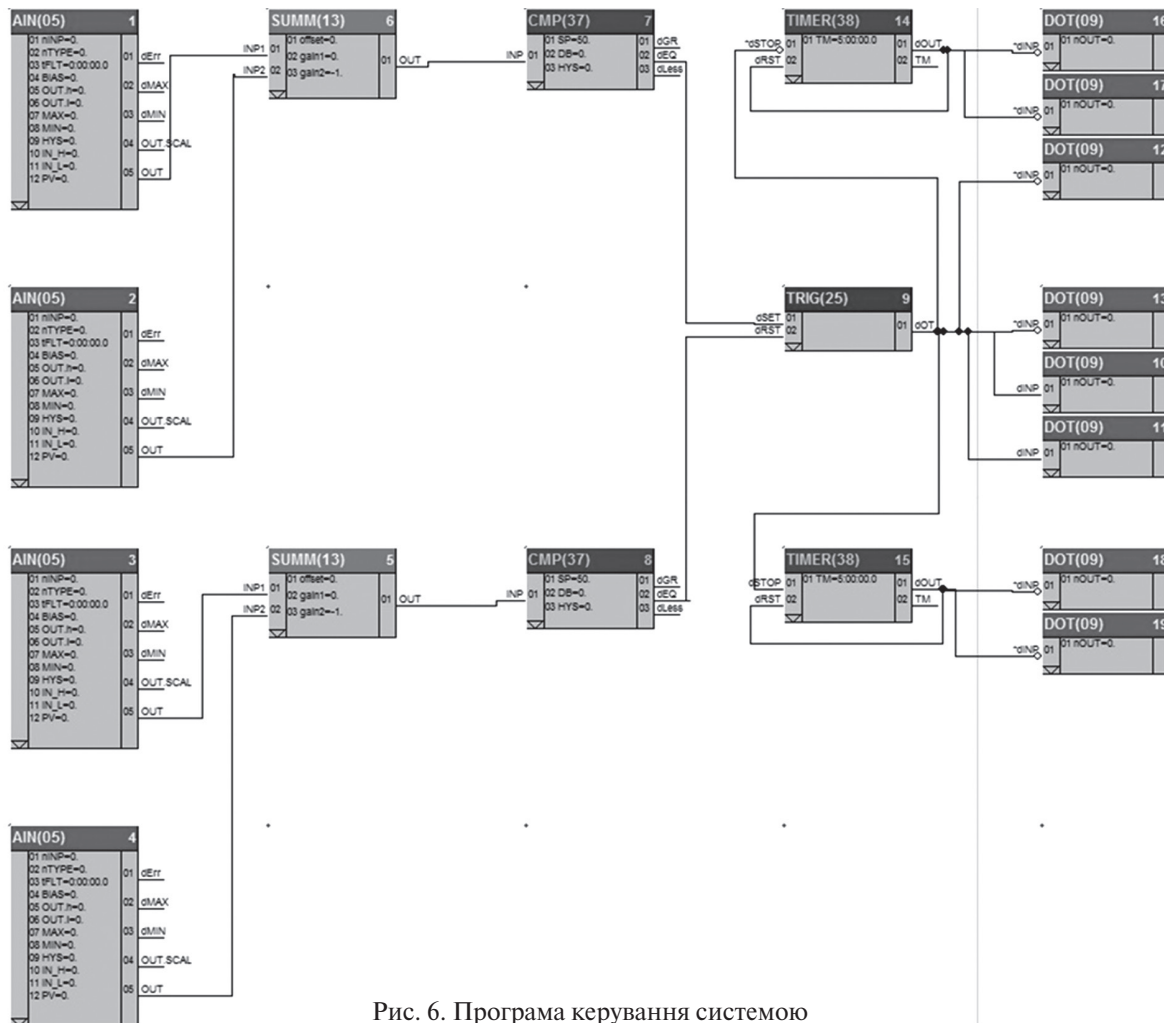


Рис. 6. Програма керування системою

переведенням потоку рідини і регенерацією попереднього фільтра, а також визначено часи ефективної очистки та регенерації фільтра.

Список літературних джерел: 1. *Гарашенко В.І.* Магнітосорбційні властивості гранулованих фільтруючих насадок / В.І. Гарашенко, І.Г. Скрипник, О.П. Лук'яничук, О.В. Гарашенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування – 2008. – №3. – С.184–191. 2. *Бомба А.Я.* Математичне моделювання процесу магнітного очищення рідин від багатоконпонентного забруднення / Бомба А.Я., Сафоник А.П. // Вісник Харківського національного університету серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2012. – №1037. – Вип. 20 – С. 18–27. 3. *Бомба А.Я.* Нелінійне математичне моделювання процесу магнітного осадження домішок / А.Я. Бомба, В.І. Гарашенко, А.П. Сафоник, О.В. Гарашенко // Вісник ТНТУ ім. І. Пулюя. – 2009. – №3. – С.118–123. 4. *Бомба А.Я.* Математичне моделювання процесу магнітного очищення рідин від багатоконпонентного забруднення / Бомба А.Я., Сафоник А.П. // Проблеми машиностроєння. – Т. 15 – 2012. – №5-6. – С. 49–55. 5. *Бомба А.Я.* Нелінійні задачі типу фільтрація-конвекція-дифузія-масообмін за умов неповних даних / Бомба А. Я., Гаврилюк В.І., Сафоник А.П., Фурсачик О.А. // Монографія. – Рівне : НУВГП, 2011. – 276 с. 6. *Сандуляк А. В.* Магнітне обезжелезивання конденсата / А. В. Сандуляк, И. М. Федоткин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

– 88 с. 7. *Сандуляк А. В.* Очистка жидкостей в магнитном поле / А. В. Сандуляк. – Львів: Вища школа, 1984. – 168 с.

Надійшла до редколегії 20.06.2014

UDC 519.63:532.5:004.942:681.518.5

Компьютерное моделирование и автоматизация процесса магнитной очистки воды / А. П. Сафоник, И. Н. Таргоний // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2014. – № 2 (83). – С. 117–121.

Решена модельная задача типа «конвекция-масообмен» для процесса очистки водной среды зернистым намагнитченным фильтрующим материалом. Выполнен математический анализ параметров и модели процесса магнитного осаждения примесей. Разработана система автоматизации процесса постоянной очистки воды от магнитных примесей.

Табл. 4. Ил. 8. Библиогр.: 5 назв.

UDC 519.63:532.5:004.942:681.518.5

Computer modeling and automation of the process of magnetic cleaning / A. Safonyk, I. Targoniyy // Bionics of Intelligence: Sci. Mag. – 2014. – № 2 (83). – P. 117–121.

The article is devoted to analysis of existing methods of water transfer coefficient's calculation in non-saturated part of soil and to development of alternative methods on the base of neural networks, which are taught on experimental data. Neural networks of different architecture have being used. It was made a comparative analysis of calculations' results, carried out by different methods.

Tab. 4. Fig. 8. Ref.: 5 items.