

А.П. Сафоник д.т.н., проф.
І.М. Таргоній, аспір.
П.О. Лакус, аспір.

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне

Моделювання та дослідження процесу біологічної очистки води з урахуванням температурного режиму

Побутові стічні води відрізняються від промислових, як за складом, так і за концентрацією залежно від області. Але незалежно від типу всі стічні води потребують обов'язкового очищення, оскільки містять забруднюючі речовини, які значно перевищують допустимі норми концентрації. Незважаючи на велику кількість досліджень відповідних процесів, актуальною проблемою дослідження залишається взаємодія активного мулу з забрудненням під впливом зовнішніх факторів, таких як різна температура тощо. Також важливою задачею є прогнозування параметрів технологічного процесу очищення стічних вод на основі інформації при неповних даних на етапі проектування очисної системи. Автоматизація процесів, що протікають у реакторі, зокрема: використання бактерій з оптимальним віком, створення умов для максимальної поглинаючої здатності активного мулу, мінімізація економічних витрат є невід'ємними складовими сучасних систем.

*Розроблено математичну модель аеробного очищення стічних вод, яка описує процеси, що відбуваються на очисній споруді з урахуванням взаємних впливів характеристик процесу на характеристики середовища. Враховано вплив зовнішніх факторів для температурного розрахунку на основі рівняння теплового балансу та законів термодинаміки. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням м-функції *pde* програмного середовища *Matlab*. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації забруднення та температури протягом часу очистки рідини. Досліджено вплив температури водного середовища, концентрації кисню на поглинаючу здатність активного мулу. Показано залежність активності бактерій від температури води, що дає можливість більш детально та комплексно спрогнозувати та автоматизувати технологічні процеси біологічного очищення стічних вод.*

Ключові слова: математична модель; біологічна очистка; температурний режим; аеробна очистка.

Актуальність теми. Побутові стічні води відрізняються від промислових, як за складом, так і за концентрацією залежно від області. Незалежно від типу всі стічні води потребують обов'язкового очищення, оскільки містять забруднюючі речовини, які значно перевищують допустимі норми концентрації. Щоб запобігти згубному впливу домішок на навколишнє середовище використовують системи фільтрів, які забезпечують допустимі показники концентрацій забруднення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. За останні роки проведено велику кількість наукових досліджень питань моделювання біохімічних очищень стічних вод. Ці дослідження значно розширили уявлення що до очищення вод, тепло-масо-перенесення, впливу змінних параметрів, необхідних для автоматичного керування вихідною інформацією.

Так в одних моделях розглядається очистка стічних вод як технологічний процес з деталями механічних конструкцій та без врахування динаміки змін часу ефективної роботи фільтра, а в інших – взаємозв'язок активного мулу і домішок, не враховуючи систему взаємодіючих параметрів, або ж сукупність рівнянь, що не враховує взаємовплив параметрів між собою, які наглядно викладені в експериментальних дослідках та відіграють важливу роль [1–15].

Крім цього, в роботах такого типу не враховується вплив температури середовища, яка є одним з основних факторів, що впливають на проходження реакцій. Тож метою даної роботи є розробка математичної моделі процесу очищення стічних вод від забруднень, які враховують взаємодію бактерій, активного мулу та домішок, а також температурного режиму. Наступним кроком є дослідження даної моделі за допомогою комп'ютерного моделювання для розрахунку оптимальних параметрів технологічного процесу.

Метою статті є розробка та дослідження математичної моделі процесу біологічної очистки стічних вод, що дає можливість більш глибоко прогнозувати технологічний процес очищення стічних вод з урахуванням температурних режимів, що в подальшому дозволяє здійснити автоматизований контроль процесу ефективного осадження домішок у біологічному фільтрі залежно від вихідних даних водного середовища.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо процес очищення рідин від органічних домішок. Згідно з літературними джерелами, розрізняють такі етапи очищення стічних вод від забруднення:

- розкладання органічного забруднення бактеріями;
- зростання і відмирання бактерій;
- виробництво активним мулом «молодих» бактерій;
- перехід домішок до біологічно неокислювальної речовини.

Для опису динаміки зміни концентрації забруднення з урахуванням впливу активного мулу на поглинання домішок використовується рівняння типу [5, 6]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial \tau} = v_C \frac{\partial c_i}{\partial x} - \beta_i C_i B T + D_C \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де β_i – коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості фільтра, швидкість потоку рідини та поглинання субстрату відповідно до активності бактерій, C_i , мг/л – концентрація 1-го забруднення у воді, T , K – температура аеротенку, v_C , м/год – швидкість руху субстрату, D_C , м²/год – коефіцієнт дифузії.

Враховуючи те, що бактерії рухаються разом із забрудненою речовиною у пористому середовищі, а також осідають в нижній частині фільтра у вигляді активного мулу приходимо до наступного рівняння для росту, відмирання й перенесення бактерій з урахуванням біологічної потреби кисню:

$$\frac{\partial B}{\partial \tau} = v_B \frac{\partial B}{\partial x} + \beta B L T L_B + w_B + D_B \frac{\partial^2 B}{\partial x^2}, \quad (2)$$

де B , мг/л – концентрація активного мулу, L_B – коефіцієнт поглинання кисню та бактерій, w_B , мг/л · год – швидкість накопичення активного мулу відповідно до адекватності моделі, v_B , м/год – швидкість руху активного мулу, D_B , м²/год – коефіцієнт дифузії.

Для покращення ефективності процесу та забезпечення оптимальних умов життєдіяльності бактерій додатково вводиться з забрудненням кисень, рівняння, що описує динаміку даного процесу, і має такий вигляд:

$$\frac{\partial L}{\partial \tau} = v_L \frac{\partial L}{\partial x} + \beta L T + L_K \cdot C \cdot (L_0 - L) + w_L + D_L \frac{\partial^2 L}{\partial x^2}, \quad (3)$$

де L , мг/л – концентрація кисню, необхідна для підтримання найкращого поглинання бактеріями забруднення, L_K – коефіцієнт масопередачі кисню, L_0 , мг/л – концентрація насичення води киснем при заданих температурі та тиску, w_L – швидкість поглинання субстрату кисню, v_L , м/год – швидкість руху кисню, D_L , м²/год – коефіцієнт дифузії.

В основу теплового розрахунку біофільтра покладено рівняння теплового балансу маси його води, в якому враховано такі складові потоків тепла:

1. Надходження тепла у біофільтр з циркуляційною витратою вхідного тепла, з витратою поданого тепла з аераторами.
2. Надходження тепла за рахунок поглинання сумарної сонячної радіації.
3. Витрата тепла з водою, на виході біофільтра.
4. Витрата тепла на випаровування.
5. Витрата тепла на конвективний теплообмін між водою і повітрям.
6. Витрата тепла на ефективне випромінювання водної поверхні.

Оскільки процеси, що протікають в аеротенку, відбуваються з виділенням та поглинанням енергії використаємо закон термодинаміки:

$$Q_{vx} + Q_{tep} + Q_{st} + Q_{ana} + Q_{pov} - Q_{vup} - Q_{vux} = 0, \quad (4)$$

де Q_{vx} – кількість тепла, що надходить із вхідною водою, Q_{tep} – кількість тепла, що віддає теплоносія, Q_{st} – кількість тепла, що втрачається через стіни аеротенка, Q_{ana} – кількість тепла, що віддається нагріванню землі через дно аеротенка, Q_{pov} – кількість тепла, що віддається повітрю на поверхні води в аеротенку.

Для визначення енергії, яка підводиться за рахунок температури вхідної води, використаємо формулу:

$$Q_{in} = c_w \cdot m(T_{in} - T), \quad (5)$$

де T , K – температура води в аеротенку, c_w , Дж/кг · К – питома теплоємність води, m , кг – маса води, в якій відбувається теплообмін, ρ , кг/м³ – густина води, $V = l \cdot h \cdot b$, м³ – об'єм аеротенка, l , м – довжина аеротенка, h , м – висота аеротенка, b , м – ширина аеротенка, T_{in} , K – температура вхідної води в аеротенку.

Кількість тепла, що передається від теплоносія, описує законом Фур'є:

$$Q_{tep} = -\lambda_p \cdot grad T_{tep} \cdot h \cdot b, \quad (6)$$

де λ_p , Вт/м² · К – коефіцієнт теплопровідності повітря, T_{tep} , K – температура повітря, що виконує роль теплоносія. Але оскільки підведення тепла відбувається лише в певних областях аеротенка, функція, якою описується кількість тепла, підведеного ззовні, матиме вигляд (7), де ми додатково множимо на 2 площу взаємодії, оскільки тепло, що віддається воді, знаходиться по обидві сторони від точки підведення:

$$\begin{cases} Q_{tep} = -\lambda_p \cdot grad T_{tep} \cdot h \cdot b \cdot 2, & x = 20 \cdot n; \\ Q_{tep} = 0, & x \neq 20 \cdot n, \end{cases} \quad (7)$$

де x, m – координата вздовж аеротенка до якої підводиться теплоносій, $n = 1, 2, 3, \dots, k$ – числа натурального ряду.

Втрати тепла через стінки аеротенка визначаються рівнянням:

$$Q_{st} = \frac{\lambda_{st}}{\sigma} (T_z - T) S_{st}, \quad (8)$$

де $\lambda_{st}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ – коефіцієнт теплопровідності стінки, σ, m – товщина стінки, $T_z, \text{К}$ – середня температура повітря, яке оточує аеротенк, $S_{st} = 2 \cdot l \cdot h, \text{м}^2$ – площа бічної поверхні аеротенка, через яку втрачається тепло.

Передача тепла через дно аеротенка землі аналогічна (8), з урахуванням, що температура землі менша за температуру повітря.

$$Q_{dna} = \frac{\lambda_{st}}{\sigma} \cdot (T_{zd} - T) \cdot S_{dna}, \quad (9)$$

де $T_{zd}, \text{К}$ – середня температура землі, $S_{dna} = l \cdot b, \text{м}^2$ – площа поверхні дна, через яке віддається тепло на нагрів землі.

Передача тепла від води до повітря через поверхню аеротенка описується законом Ньютона-Ріхмана:

$$Q_{pov} = a \cdot (T_z - T) \cdot F, \quad (10)$$

де $a, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ – коефіцієнт тепловіддачі повітря, $F = l \cdot b, \text{м}^2$ – площа поверхні води через яку віддається тепло на нагрів повітря.

Енергію тепла, яка буде виділятися на випаровування, опишемо рівнянням:

$$Q_{vup} = \alpha_e \cdot (e_s - e_2) \cdot S_{dna} + \frac{1}{\rho \cdot c_w} \frac{\partial I}{\partial x}, \quad (11)$$

де $\alpha_e, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{Па}$ – коефіцієнт тепловіддачі випаровуванням, $e_s, \text{м}^2 \cdot \text{Па}$ – максимальна вологість водяної пари, що відповідає середній температурі поверхні води, $e_2, \text{м}^2 \cdot \text{Па}$ – вологість водяної пари на висоті 2 м над поверхнею води, I – потік сонячної енергії, $\rho, \text{кг/м}^3$ – густина води.

Залишки тепла, які будуть відводитися з вихідною водою, визначаються співвідношенням:

$$Q_{vux} = c_w m (T_{vux} - T), \quad (12)$$

де $T, ^\circ\text{C}$ – температура води в аеротенку, $T_{vux}, ^\circ\text{C}$ – температура води на виході з реактора.

Також частина енергії буде переноситися по довжині фільтра завдяки руху води. Для врахування цього до рівняння тепоперенесення додатково введемо конвективну і дифузійну складові, а також функцію джерела, яка має вигляд:

$$k = \gamma \cdot (T_z - T_{vx}) \cdot x, \quad (13)$$

де $\gamma, 1/\text{м} \cdot \text{К}$ – швидкість перенесення тепла вздовж аеротенка залежно від умов навколишнього середовища.

Беручи до уваги вказані складові потоків тепла, а також відповідні залежності (4)–(13) та провівши відповідні узагальнення, отримаємо таке рівняння перенесення тепла в аеротенку:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_T \frac{\partial T}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + F_T + \frac{1}{\rho \cdot c_w} \frac{\partial I}{\partial x}, \quad (14)$$

де v_T – швидкість руху тепла, D_T – коефіцієнт дифузії, F_T – функція теплообміну.

Сукупність диференціальних рівнянь (1), (2), (3) і (14) описує в комплексі зміну концентрації бактерій, забруднення, кисню і температури в аеротенку. Різноманітні взаємовпливи характеристик середовища та процесу доцільно враховувати шляхом введення у відповідні рівняння коефіцієнтів, що дає можливість аналізувати процеси, які відбуваються в аеротенку, як сукупність взаємопов'язаних впливів. Виходячи з цього, маємо наступну модель задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_i}{\partial t} = v_c \frac{\partial C_i}{\partial x} - \beta_i C_i B T + D_c \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial B}{\partial t} = v_B \frac{\partial B}{\partial x} + \beta B L T L_B + w_B + D_B \frac{\partial^2 B}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial L}{\partial t} = v_L \frac{\partial L}{\partial x} + \beta L T + L_K \cdot C \cdot (L_0 - L) + w_L + D_L \frac{\partial^2 L}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v_T \frac{\partial T}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + F_T + \frac{1}{\rho \cdot c_w} \frac{\partial I}{\partial x}; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} C_i|_{x=0} &= C_i^*(t), \quad B|_{x=0} = B^*(t), \quad L|_{x=0} = L^*(t), \quad T|_{x=0} = T^*(t), \\ \left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=l} &= 0, \quad \left. \frac{\partial B}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{\partial L}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = 0; \end{aligned} \quad (16)$$

де l – довжина фільтра, $C_i^*(t), B^*(t), L^*(t), T^*(t), C_i^*(x), B^*(x), L^*(x), T^*(x)$ – задана достатня кількість раз числа диференціальної функції, узгоджено в кутових точках області $G = \{(x, t): 0 < x < l, 0 < t < t_* < \infty\}$.

Розв'язок задачі. Для розв'язання системи (15) за умов (16) використаємо програмне середовище Matlab, зокрема M-функцію pdepe. На основі експериментальних даних знайдемо залежність зміни температури навколишнього середовища від часу (рис. 1).

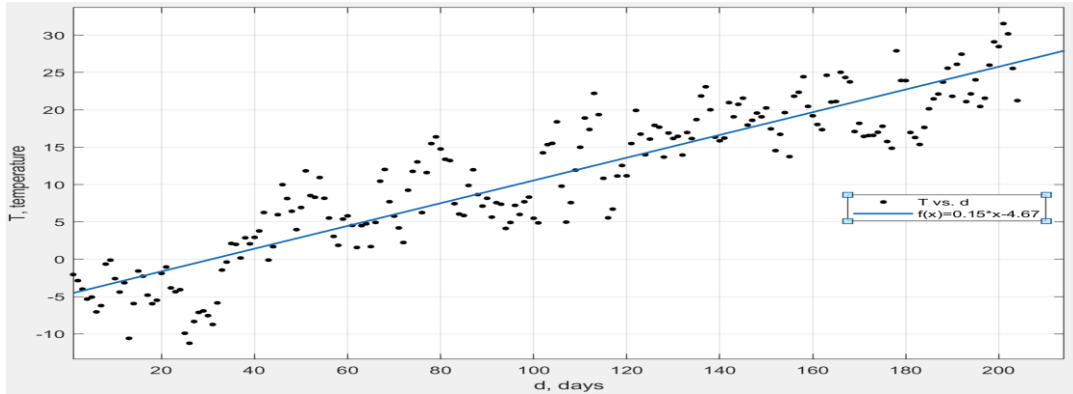


Рис. 1. Динаміка зміни температури повітря біля реактора

Для роботи з М-функцією рдере перетворимо систему (15) у машинний код, а також задамо вихідні дані експерименту:

Команди в Matlab:

```

Q=7.2; ki=10; V=100*5*2; wB=14.72*0.005;
LK=0.001;
LB=10^-9; L0=6; g=Q*(1+ki)/V;
b1=10^-4;
b2=10^-3;
b3=1.2*10^-3;
b4=0.8*10^-3;
D1=1; D12=0.8; D13=0.8; D14=1;
f6=D1*DuDx(6);
f7=D1*DuDx(7);
f8=D1*DuDx(8);
f9=D1*DuDx(9);
f10=D1*DuDx(10);
f11=D1*DuDx(11);
f12=D12*DuDx(12)+V12*u(12);
f13=D13*DuDx(13)+V13*u(13);
f14=D14*DuDx(14);
s12=u(13)*u(12)*g*LB+wB;
s13=u(13)*g+LK*u(12)*(L0-u(13));
Qst=lst*(tz-u(14))*Sst/sg;
Qpov=a*(tz-u(14))*F;
c1=1; c2=1; c3=1; c4=1; c5=1; c6=1; c7=1;
c8=1; c9=1; c10=1; c11=1; c12=1; c13=1; c14=1;
f1=D1*DuDx(1);%+V1*u(1);
f2=D1*DuDx(2);
f3=D1*DuDx(3);
f4=D1*DuDx(4);
f5=D1*DuDx(5);
s14=sg*(Qvx+Qtep+Qst+Qpov-
cv=4.2; rov=1000; l=100; h=2; b=5;
tvx=14;beta=1/40;
tz=0.15*t-4.67;
k=beta*(tz-tvx)*x;
b5=1.1*10^-4;
b6=1.6*10^-4;
b7=1.4*10^-5;
b8=1.3*10^-5;
b11=1.5*10^-4;
V1=0.26; V12=0.092; V13=0.053; V14=0.53;
s1=-b1*u(12)*u(1)+V1*DuDx(1);
s2=-b2*u(12)*u(2)+V1*DuDx(2);
s3=-b3*u(12)*u(3)+V1*DuDx(3);
s4=-b4*u(12)*u(4)+V1*DuDx(4);
s5=-b5*u(12)*u(5)+V1*DuDx(5);
s6=-b6*u(12)*u(6)+V1*DuDx(6);
s7=-b7*u(12)*u(7)+V1*DuDx(7);
s8=-b8*u(12)*u(8)+V1*DuDx(8);
s9=0;
s10=0;
s11=-b11*u(12)*u(11)+V1*DuDx(11);
Qvx=cv*rov*l*h*b*(tvx-u(14));
if x>19 && x<21
    Qtep=lp*ttep*h*b*2;
elseif x>39 && x<41
    Qtep=lp*ttep*h*b*2;
elseif x>59 && x<61
    Qtep=lp*ttep*h*b*2;
elseif x>79 && x<81
    Qtep=lp*ttep*h*b*2;
else
    Qtep=0;
endlst*tzd*Sdna/sg)/lst/Sdna+V14*DuDx(14)+k;
c = [c1; c2; c3; c4; c5; c6; c7; c8; c9; c10; c11; c12;
c13; c14];
f = [f1; f2; f3; f4; f5; f6; f7; f8; f9; f10; f11; f12;
f13; f14];

```

```

lp=0.02*10^6;          s = [s1; s2; s3; s4; s5; s6; s7; s8; s9; s10; s11; s12;
ttep=70; lst=46.5; sg=0.02;          s13; s14];
Sst=2*1*h; tzd=7; Sdna=1*b; a=135; F=1*b;          end

```

Умови (16) запишемо таким чином:

```

function [pl,ql,pr,qr] = pdex2bc(xl,ul,xr,ur,t)
pl = [ul(1)-293;ul(2)-265;ul(3)-159;ul(4)-39.4;ul(5)-7.5;ul(6)-1.52;ul(7)-0.04;ul(8)-0.15; 0; 0;ul(11)-0.78; 0;
0; 0];
ql = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 1; 1; 0; 1; 1; 1];
pr = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
qr = [1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1];
end

```

Як початкового розподі концентрацій прийнемо лінійно спадну концентрацію вздовж очисної системи. У машинному кодї це має такий вигляд:

```

function u0 = pdex2ic(x)          u13=39.4-0.374*x;
u10=293-2.1*x;                  u14=7.5-0.04*x;
u11=265-2.5*x;                  u15=1.52-0.0112*x;
u12=159-1.44*x;                 u16=0.04-0.00006*x;
u17=0.15-0.0001*x;              u30=0.001;
u18=48;                          u40=10.8-5.6425*x/120;
u19=87;                            u0
u191=0.78-0.0038*x;             [u10;u11;u12;u13;u14;u15;u16;u17;u18;u19;u191;u20;u30;u40];
u20=0.1;                          end

```

Для виклику М-функції `pdepe` маємо такий код та використаємо стандартні функції, для побудови відповідних графіків:

```

m = 0;                            u7 = sol(:,7);
x = linspace(0,100,101);           u8 = sol(:,8);
t = linspace(0,206,101);           u9 = sol(:,9);
sol = pdepe(m,@pdex2pde,@pdex2ic,@pdex2bc,x,t); u10 = sol(:,10);
u1 = sol(:,1);                     u11 = sol(:,11);
u2 = sol(:,2);                     u12 = sol(:,12);
u3 = sol(:,3);                     u13 = sol(:,13);
u4 = sol(:,4);                     u14 = sol(:,14);
u5 = sol(:,5);
u6 = sol(:,6);

```

Результати дослідження. Наведемо результати чисельного експерименту при $Q = 7.2 \text{ м}^3/\text{год}$, $V = 1000 \text{ м}^3$, $k_i = 10$, $w_B = 0,0736$, $v_1 = 0.26 \text{ м/год}$, $v_B = 0.092 \text{ м/год}$, $v_L = 0.053 \text{ м/год}$, $v_T = 0.53 \text{ м/год}$, $D_t = D_{C_i} = 1$, $D_B = D_L = 0.8$, $\beta_1 = 10^{-4}$, $\beta_2 = 10^{-3}$, $\beta_3 = 1.2 \cdot 10^{-3}$, $\beta_4 = 0.8 \cdot 10^{-3}$, $\beta_5 = 1.1 \cdot 10^{-4}$, $\beta_6 = 1.6 \cdot 10^{-4}$, $\beta_7 = 1.4 \cdot 10^{-5}$, $\beta_8 = 1.3 \cdot 10^{-5}$, $\beta_{11} = 1.5 \cdot 10^{-4}$, $c_v = 4.2 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$, $l = 100 \text{ м}$, $h = 2 \text{ м}$, $b = 5 \text{ м}$, $t_{vx} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$, $\beta = 0.025$, $\lambda_p = 0.02 \cdot 10^6 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $t_{tep} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_{st} = 46.5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $t_z = 0.15 \cdot t - 4.67$, $\sigma = 0.02 \text{ м}$, $t_{zd} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$, $a = 135 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, $\varepsilon = 0.01$ (рис. 2 – рис. 12).

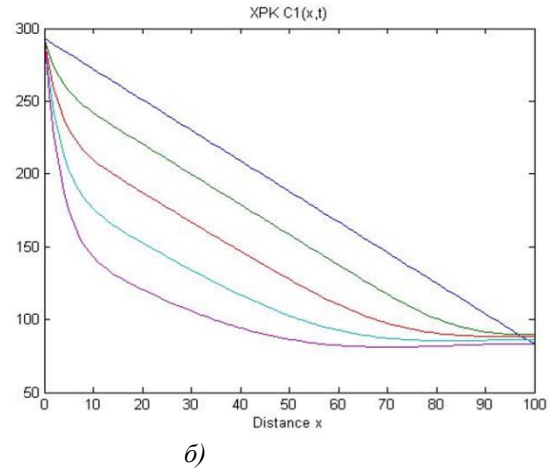
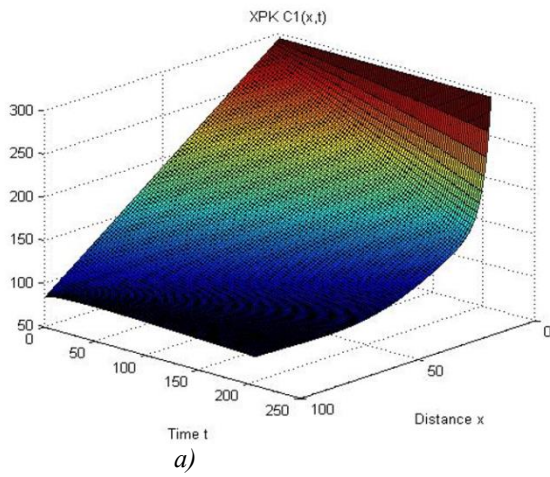


Рис. 2. Розподіл зміни концентрації ХПК:
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

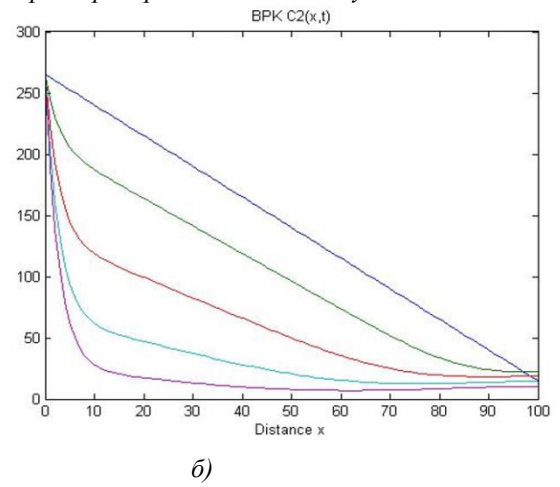
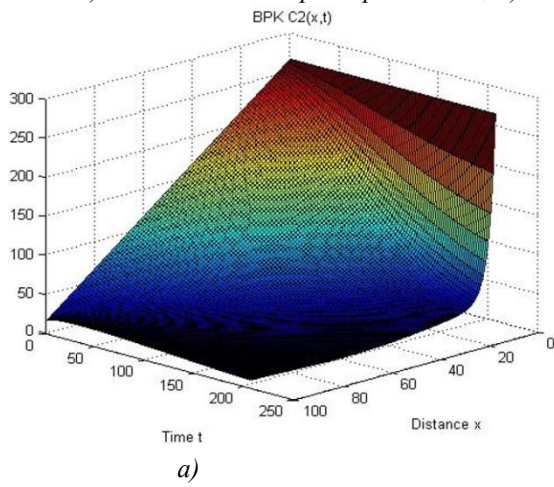


Рис. 3. Розподіл зміни концентрації BPK:
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

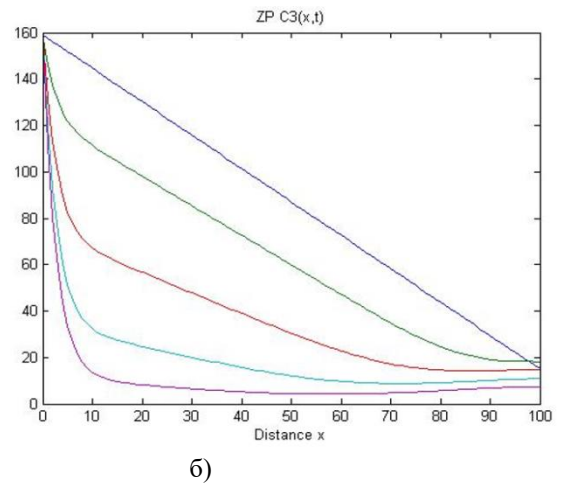
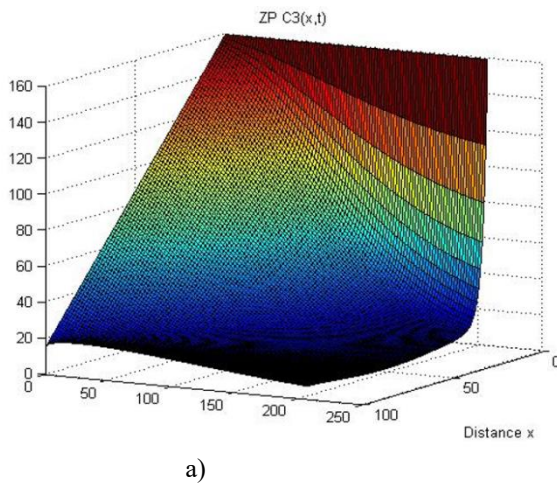
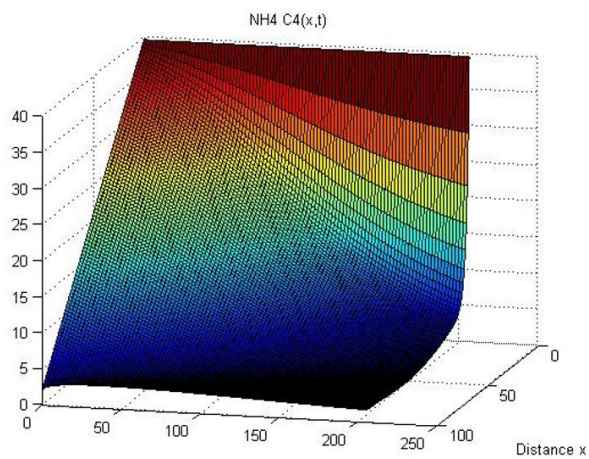
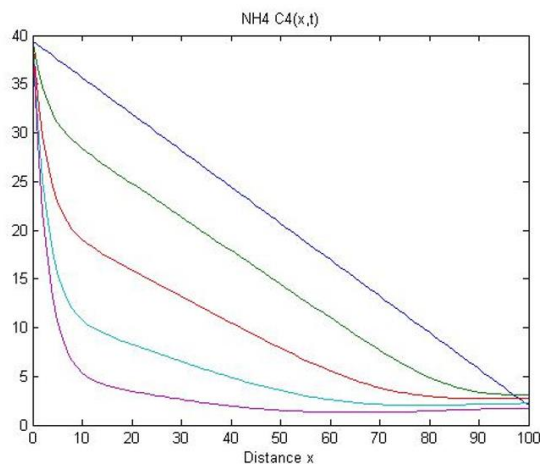


Рис. 4. Розподіл зміни концентрації ЗР:
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

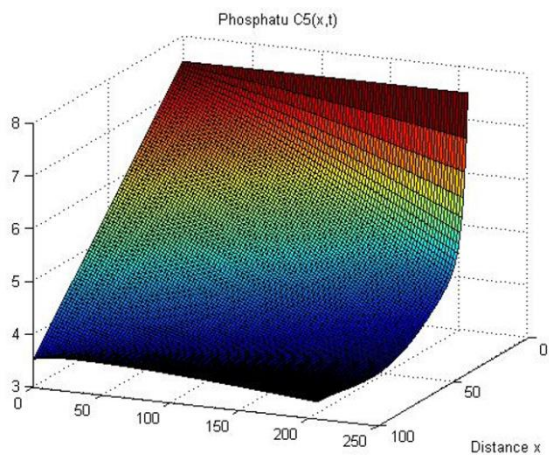


а)

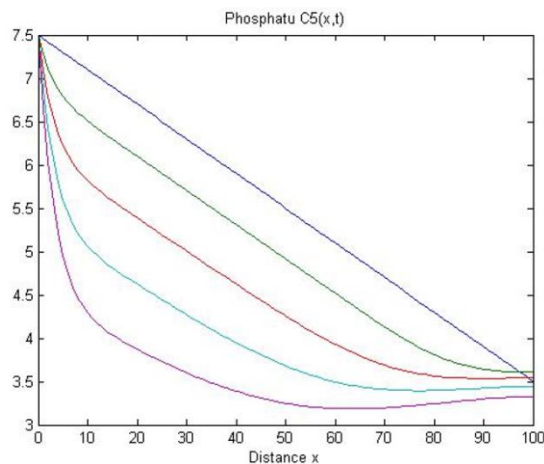


б)

Рис. 5. Розподіл зміни концентрації NH_4 :
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

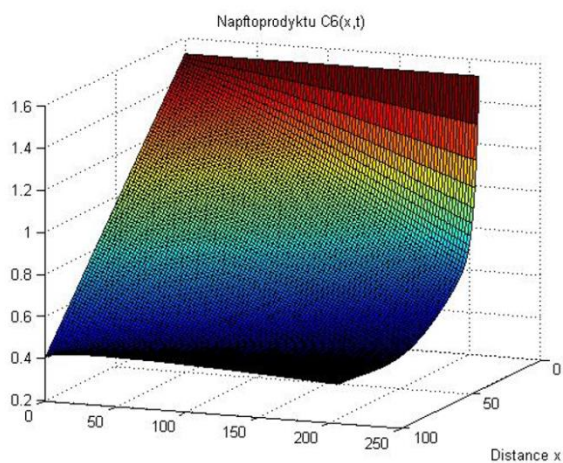


а)

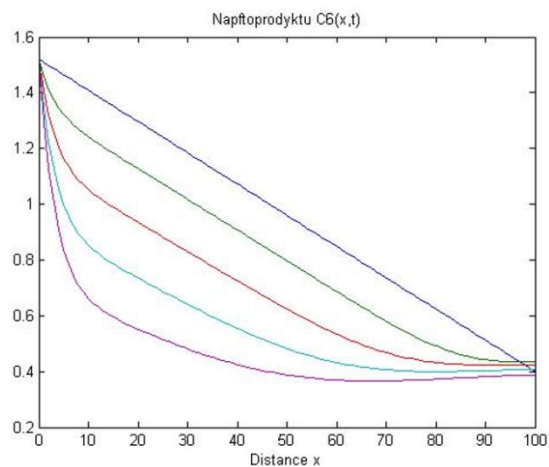


б)

Рис. 6. Розподіл зміни концентрації фосфатів:
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

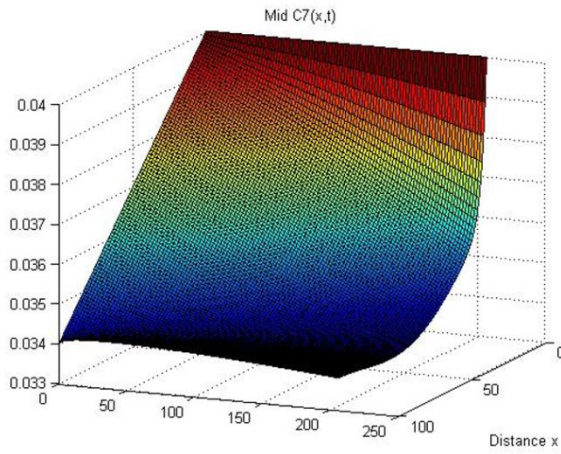


а)

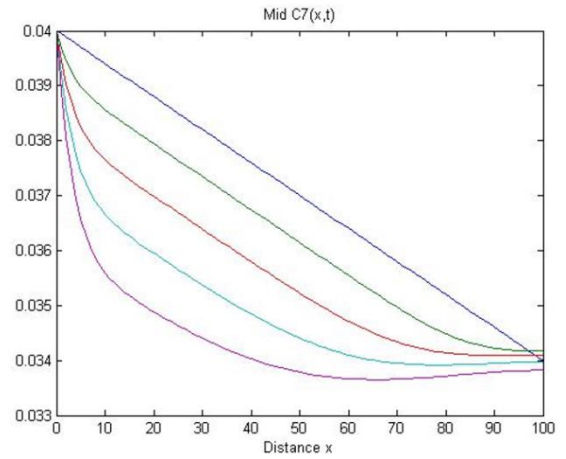


б)

Рис. 7. Розподіл зміни концентрації нафтопродуктів:
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

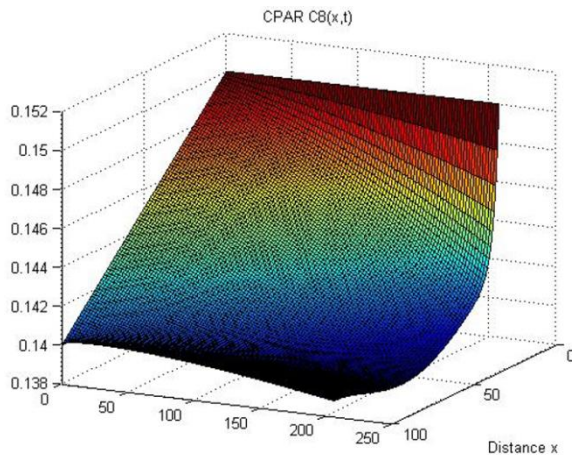


а)

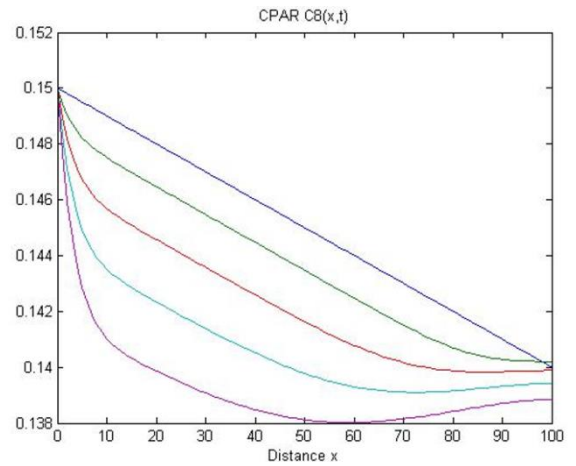


б)

Рис. 8. Розподіл зміни концентрації міді:
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

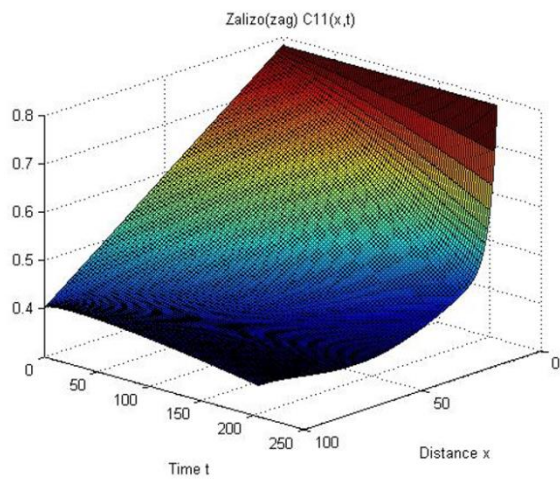


а)

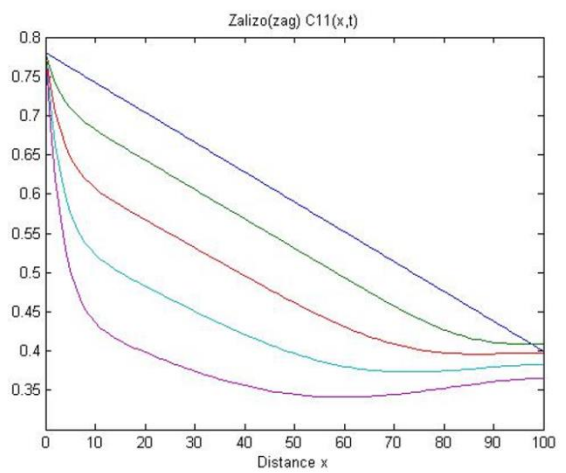


б)

Рис. 9. Розподіл зміни концентрації СПАР:
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу



а)



б)

Рис. 10. Розподіл зміни концентрації заліза (загального):
а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

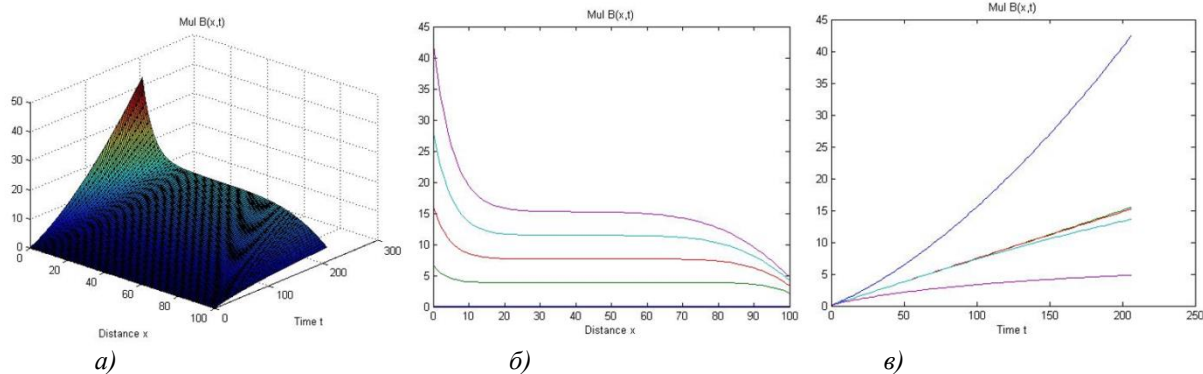


Рис. 11. Розподіл зміни концентрації активного мулу:
 а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу;
 в) з часом в різних точках фільтра

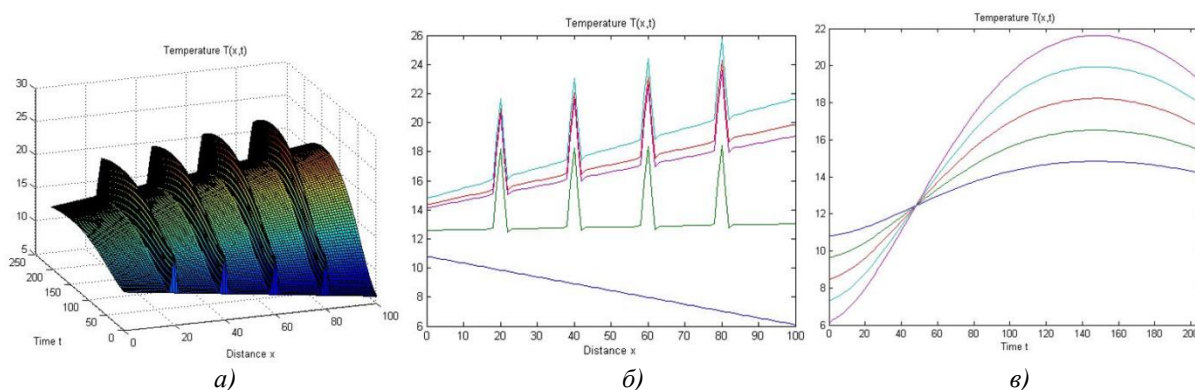


Рис. 12. Розподіл зміни температури:
 а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу;
 в) з часом в різних точках фільтра

Отримані результати комп'ютерного експерименту відображають характер динаміки функцій:

а) в просторі з часом по кожній точці довжини фільтра; б) по довжині фільтра в моменти часу $t = 0$, $t = 50$, $t = 100$, $t = 150$, $t = 200$ днів; в) з часом в точках фільтра $x = 0$, $x = 25$, $x = 50$, $x = 75$, $x = 100$ м. Як видно з рисунків 2-10 бактерії поглинають забруднення найактивніше на початку фільтра і ефективність поглинання для кожної концентрації забруднення різна. З часом в залежності від температури води концентрація домішок на виході фільтра змінюється. Це свідчить про те, що температура води впливає на ефективність поглинання забруднень бактеріями.

З рисунка 11 видно, що найактивніше бактерії розмножуються на початку фільтра. Наявність постійної високої концентрації забруднення, кисню та постійної температури вхідної води сприяють розвитку активного мулу. Проте на виході з фільтра помітно тенденцію до повільнішого розмноження.

На зміну температури води впливає багато факторів, проте підведення тепла за рахунок теплоносія збільшує температуру води лише на 6 градусів, як видно на рисунку 12 б. Це обумовлено тим, що передача тепла від нагрітого повітря до води відбувається повільно і час, за який нагріте повітря проходить від точки підведення до поверхні реактора, дуже малий, а також мала площа взаємодії. Значно більший вплив на нагрів чи охолодження води вносить температура навколишнього середовища, оскільки площі взаємодії на поверхні й через бічні стіни реактора значно більші за площу взаємодії з теплоносієм. Також фактором впливу є швидкість руху води, оскільки при взаємодії з навколишнім середовищем спостерігається ламінарний режим руху води, а при взаємодії з теплоносієм виникають турбулентності, що також впливає на ефективність теплопереносу. Одним з важливих чинників також є температура вхідної води.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Отже побудовано математичну модель процесу аеробного очищення стічних вод з урахуванням взаємодії бактерій, органічних і біологічно неокислювальних речовин в умовах дифузійного і масообмінного збурення та впливу температурних режимів. Запропонований метод і побудований алгоритм розв'язання відповідної нелінійно збуреної задачі «конвекція-дифузія-тепломасообмін». Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням функції рдере середовище Matlab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації забруднення та температури протягом часу очистки рідини. Отримані результати дають можливість більш детально і комплексно спрогнозувати та автоматизувати технологічні процеси біологічного очищення стічних вод.

Список використаної літератури:

1. *Aline Roberta de Pauli* Integrated two-phase purification procedure for abatement of pollutants from sanitary landfill leachates / *Aline Roberta de Pauli, Fernando Rodolfo Espinoza-Quiñones, Daniela Estelita Goes Trigueros* // *Chemical Engineering Journal*. – 2018. – № 335. – P. 19–29.
2. Modeling and simulation of a biological process for treating different COD:N ratio wastewater using an extended ASM1 model / *F.Gao, J.Nan, Sh.Li, Y.Wang* // *Chemical Engineering Journal*. – 2018. – № 332. – P. 671–681.
3. *Ochando-Pulido J.M.* Boundary flux modelling for purification optimization of differently-pretreated agro-industrial wastewater with nanofiltration / *J.M. Ochando-Pulido, M.Stoller, A.Martinez-Ferez* // *Separation and Purification Technology*. – 2018. – № 193. – P. 147–154.
4. *Adetola D.* Adaptive estimation in nonlinearly parameterized nonlinear dynamical systems / *D.Adetola, M.Lehrer*. – San Francisco : American Control Conf., 2011. – P. 31–36.
5. *Dochain D.* Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes / *D.Dochain*. – London : IWA Publishing, 2001. – 342 p.
6. *Henze M.* Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment processes / *M.Henze, G.Grady, W.Gujer* // *Scientific and Technical Report*. – London : IAWPRC, 1987. – № 1. – 243 p.
7. *Ilenze M.* Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 / *M.Ilenze, W.Gujer, T.Mino* // *Scientific and Technical Report*. – London : IWA Publishing, 2000. – № 1. – 122 p.
8. *Knightes G.D.* Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for monod biodegradation kinetics using bivariate data / *G.D. Knightes* // *Biotechnol. Bioeng.* – 2000. – № 2. – P.160–170.
9. *Ghai Q.* Modeling, estimation and control of biological wastewater treatment plants / *Q.Ghai*. – Norwegian : Telemark University College, 2008. – 187 p.
10. Simulation-based Optimization Framework for Integrating Scheduling and Model Predictive Control, and its Application to Air Separation Units / *S.Lisia, C.Dias, P.Tsay, M.Baldea and other* // *Computers and Chemical Engineering*. – 2018.
11. *Safonyk A.* Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient / *A.Safonyk* // *Models and Methods in Appl.* – 2015. – № 9. – P. 189–192.
12. *Bomba A.* Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by using microporous particles / *A.Bomba* // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – P. 1–11 [Electronic resource]. – Access mode : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4964966>.
13. *Bomba A.* Identification of Mass Transfer Distribution Factor and Its Account for Magnetic Filtration Process Modeling / *A.Bomba, A.Safonyk, E.Fursachik* // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2013. – № 45 (4). – P. 16–22.
14. *Orlov V.O.* Simulation the process of iron removal the underground water by polystyrene foam filters / *V.O. Orlov* // *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. – 2016. – № 90 (2). – P. 87–91.
15. Neliniyni zadachi typu philtraciya – konvekciya – dyphuziyya masoobmin za umov nepovnyh danyh / *A.Bomba, V.I. Gavriluk, A.P. Safonyk, O.A. Fursachyk*. – Rivne : NUVGP, 2011. – 276 p.

References:

1. Pauli de, Aline Roberta, Espinoza-Quiñones, Fernando Rodolfo and Goes, Daniela (2018), «Trigueros Integrated two-phase purification procedure for abatement of pollutants from sanitary landfill leachates», *Chemical Engineering Journal*, Vol. 335, pp.19–29.
2. Gao, F., Nan, J., Li, Sh. and Wang, Y. (2018), «Modeling and simulation of a biological process for treating different COD:N ratio wastewater using an extended ASM1 model», *Chemical Engineering Journal*, Vol. 332, pp. 671–681.
3. Ochando-Pulido, J.M., Stoller, M. and Martinez-Ferez, A. (2018), «Boundary flux modelling for purification optimization of differently-pretreated agro-industrial wastewater with nanofiltration», *Separation and Purification Technology*, Vol. 193, pp. 147–154.
4. Adetola, D. and Lehrer, M. (2011), *Adaptive estimation in nonlinearly parameterized nonlinear dynamical systems*, American Control Conf., San Francisco, pp. 31–36.
5. Dochain, D. (2001), *Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes*, IWA Publishing, London, 342 p.
6. Henze, M., Grady, G and Gujer, W. (1987), «Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment processes», *Scientific and Technical Report*, Vol. 1, IAWPRC, London, 243 p.
7. Ilenze, M., Gujer, W. and Mino, T. (2000), «Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3», *Scientific and Technical Report*, Vol. 1, IWA Publishing, London, 122 p.
8. Knightes, G.D. (2000), «Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for monod biodegradation kinetics using bivariate data», *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 2, pp. 160–170.
9. Ghai, Q. (2008), *Modeling, estimation and control of biological wastewater treatment plants*, Telemark University College, Norwegian, 187 p.
10. Lisia, S, Dias, C., Tsay, P., Baldea, M. and other (2018), «Simulation-based Optimization Framework for Integrating Scheduling and Model Predictive Control, and its Application to Air Separation Units», *Computers and Chemical Engineering*.

11. Safonyk, A. (2015), «Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient», *Models and Methods in Appl.*, Vol. 9, pp. 189–192.
12. Bomba, A. (2016), «Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by using microporous particles», *AIP Conf. Proc.*, pp. 1–11, [Online], available at: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4964966>
13. Bomba, A., Safonyk, A. and Fursachik, E. (2013), «Identification of Mass Transfer Distribution Factor and Its Account for Magnetic Filtration Process Modeling», *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 45 (4), pp. 16–22.
14. Orlov, V.O. (2016), «Simulation the process of iron removal the underground water by polystyrene foam filters», *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 90 (2), pp. 87–91.
15. Bomba, A., Gavriluk, V.I., Safonyk, A.P. and Fursachyk, O.A. (2011), *Neliniyni zadachi typu filtraciya – konvekciya – dyfuziyya masoobmin za umov nepovnyh danyh*, NUVGP, Rivne, 276 p.

Сафоник Андрій Петрович – доктор технічних наук, професор, професор Національного університету водного господарства та природокористування.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання природних та технологічних процесів і систем;
- автоматизоване управління технологічними процесами.

Таргоній Іван Миколайович – аспірант Національного університету водного господарства та природокористування.

Наукові інтереси:

- автоматизоване управління технологічними процесами.

Лакус Петро Олександрович – аспірант Національного університету водного господарства та природокористування.

Наукові інтереси:

- моделювання електроенергетичних процесів та систем.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2019.