

А. П. Сафоник, канд. техн. наук
І. М. Таргоній

Національний університет
водного господарства та природо-
користування, м. Рівне,
e-mail: safonik@ukr.net,
tamplier.targoniy.93@ukr.net

УДК 519.63:532.5

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АЕРОБНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Побудовано математичну модель процесу аеробного очищення стічних вод, що враховує взаємодію бактерій, органічної і біологічно неокисної речовин. Розроблено алгоритм розв'язання відповідної модельної задачі, на основі якого проведений комп'ютерний експеримент засобами пакета прикладних програм MatLab. Розглянуто вплив основних параметрів на ефективність біологічного очищення. Показано вплив концентрації кисню та активного мулу на якість процесу очищення.

Ключові слова: математична модель, аеробне очищення, зворотний вплив, асимптотика, стічні води, активний мул.

Вступ

Промисловість – один з напрямів індустрії, який інтенсивно розвивається протягом багатьох останніх десятиліть, проте зі збільшенням чисельності харчових, мікробіологічних, фармацевтичних та багатьох інших виробництв щоденно зростають обсяги стічних вод, забруднених органічними речовинами, які несуть негативний вплив на екосистеми.

Побутові стічні води містять забруднення мінерального і органічного походження, тоді як промислові відрізняються, як за складом, так і за концентрацією залежно від галузі. Незалежно від типу всі стічні води потребують обов'язкового очищення, оскільки в них містяться забруднюючі речовини, які значно перевищують допустимі концентрації [1].

Для запобігання згубному впливу домішок на довкілля використовують системи магнітних, механічних, біологічних та інших фільтрів, які забезпечують допустимі показники концентрацій забруднення. Різноманіття забруднених стічних вод і природа їх походження при проектуванні визначають, використовуючи результати вітчизняного та закордонного досвіду [1–15], бажаний ступінь та тип системи очищення забрудненої води.

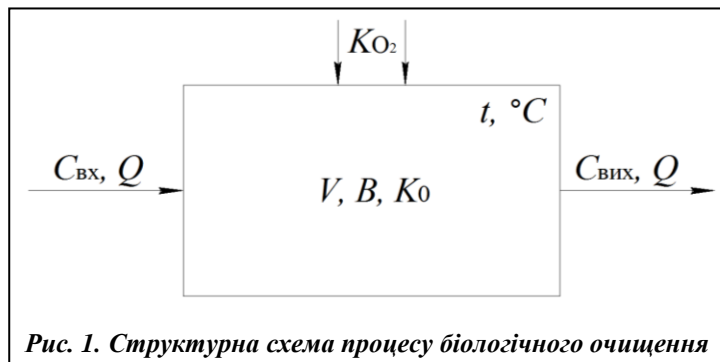
Одним з найчастіше застосовуваних методів є біологічне очищення [3]. Розрізняють процеси аеробної очистки, коли додатково вводять кисень і анаеробної очистки.

Розглянемо процес аеробної очистки, в якому для стимулювання активності бактерій використовують додаткове добавляння повітря та підтримання оптимальної температури середовища. При такій очистці стічних вод мікроорганізми розмножуються в активному мулі, поглинаючи забруднення та кисень. Проте з часом поглинаючи здатність бактерій падає, і вони осідають у вигляді твердого субстрату, який необхідно забирати. Підтримуючи сукупність цих параметрів на відповідному рівні, можна забезпечити оптимальні умови для ефективної очистки стічних вод.

Основним питанням автоматизації аеротенків є розробка схеми автоматичної підтримки в оптимальних межах співвідношення між кількістю стічної води, яка надходить і концентрацією забруднень в них з кількістю введеного в аеротенки повітря та активного мулу. Підтримання цього співвідношення в оптимальних межах є основною умовою високоєфективної роботи аеротенків в санітарному та техніко-економічному відношеннях. Автоматичні пристрої можуть бути використані для рівномірного розподілу стічних вод між окремими аеротенками, суворої підтримки за заданою програмою кількості повітря, що добавляється, та активного мулу, що вводиться в різних точках кожного аеротенку. Також системи автоматизації застосовують для найбільш економічного регулювання турбоповітрянодувних установок при їх спільній роботі з повітропроводами і змінній потребі в кількості стисненого повітря, надійного безперервного контролю якісних і кількісних показників роботи аеротенків.

В останні роки проведено значні наукові дослідження питань автоматизації біохімічної очистки стічних вод в аеротенках. Ці дослідження розширили уявлення про динаміку процесів в аеротенках, вплив окремих змінних параметрів, необхідної для автоматичного керування вихідної інформації, а також визначили деякі принципи побудови схем і засобів автоматизації.

© А. П. Сафоник, І. М. Таргоній, 2016



Так, в [1] розглядається очистка стічних вод як технологічний процес з деталями механічних конструкцій, проте хоча запропоновані математичні параметри дозволяють розрахувати оптимальні параметри аеротенка, відстійника для відповідного процесу, але не враховують динаміку зміни часу ефективної дії фільтра залежно від вхідної концентрації забруднення, потреби в кисні та віку активного мулу, що осідає.

Взаємодію активного мулу та домішок враховує математична модель, запропонована в [3], що є досить загальною моделлю, оскільки система взаємодіючих параметрів, яка детально описує технологічний об'єкт керування (рис. 1), запропонована в [4].

Описана в роботі [4] сукупність рівнянь не враховує взаємного впливу параметрів між собою. Відповідно метою даної роботи є розробка математичної моделі процесу очищення стічних вод від забруднення, що враховує взаємодію бактерій, активного мулу і домішок в пористому середовищі, дослідження запропонованої системи за допомогою комп'ютерного моделювання для розрахунку оптимальних параметрів технологічного процесу.

На рис. 1 зображено структурну схему біологічного очищення, тут: $C_{вх}$ – концентрація домішок в стічній воді, яка надходить, мг/л; $C_{вих}$ – концентрація забруднення на виході з системи, мг/л; V – об'єм реактора м³; Q – витрата води, яка надходить, м³/год; B – концентрація активного мулу в реакторі, г/л.

1. Постановка задачі

Розглянемо процес очищення рідин від органічних забруднень шляхом внесення біологічних бактерій. Згідно з літературними джерелами (теоретичними і експериментальними даними) [1, 2] розрізняють такі етапи очищення стічних вод від забруднення: розкладання органічного забруднення бактеріями, ріст і відмирання бактерій, вироблення активним мулом «молодих» бактерій, перехід домішок до біологічно неокисної речовини.

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = v_c \frac{\partial C}{\partial x} - \beta C B + w_c + D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де $\beta = \frac{Q \cdot (1 + k_i)}{V}$ – коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості фільтра та швидкість потоку рідини; C – концентрація забруднення в воді; V – об'єм фільтра; k_i – коефіцієнт рециркуляції активного мулу; w_c – швидкість поглинання субстрату відповідно до адекватності моделі; v_c – швидкість руху субстрату; D_c – 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 рівняння для росту, відмирання й перенесення бактерій з урахуванням біологічної потреби кисню

$$\frac{\partial B}{\partial t} = v_B \frac{\partial B}{\partial x} + \beta B K \cdot K_B + w_B + D_B \frac{\partial^2 B}{\partial x^2}, \quad (2)$$

де B – концентрація активного мулу; K_B – коефіцієнт поглинання кисню та бактерій; w_B – швидкість накопичення активного мулу відповідно до адекватності моделі; v_B – швидкість руху активного мулу; D_B – коефіцієнт дифузії.

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


```

wC=0.01;
wB=14.72;
wK=0.01;
KK=0.001;
KB=100;
K0=6;
b=Q*(1+ki)/V;
V1=1.26; V2=1.92; V3=1.53;
D1=0.721; D2=10^-5; D3=10^-5;

f1=D1*DuDx(1);
f2=D2*DuDx(2);
f3=D3*DuDx(3);
s1=V1*DuDx(1)-u(1)*u(2)*b+wC;
s2=V2*DuDx(2)+u(3)*u(2)*b*KB+wB;
s3=V3*DuDx(3)+u(3)*b+wK+KK*u(1)*(K0-u(3));
c = [c1;c2; c3];
f = [f1; f2; f3];
s = [s1; s2; s3];
    
```

Для виклику функції *pdepe* маємо такий код та використовуємо стандартні функції для побудови відповідних графіків:

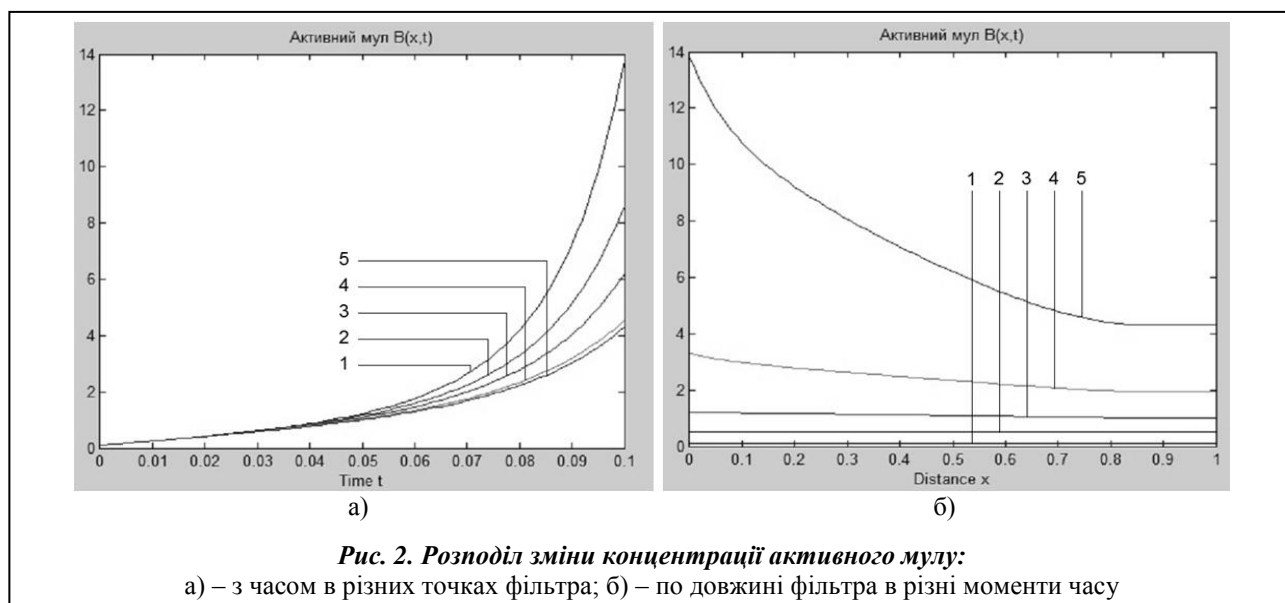
```

m = 0;
x = linspace(0,1,100);
t = linspace(0,0.1,100);
sol = pdepe(m,@pdex2pde,@pdex2ic,@pdex2bc,x,t);
u1 = sol(:,:,1);
u2 = sol(:,:,2);
u3 = sol(:,:,3);
    
```

3. Результати числових розрахунків

В результаті комп'ютерного моделювання (за наведених вхідних даних: $L|_{t=0} = 50 - 15 \cdot e^x$ г/л, $X|_{t=0} = 0,1$ г/л, $L|_{t=0} = 0,001$ г/л, $Q = 7,2$ м³/год, $V = 0,7$ м³, $w_L = 0,01$ мг/л-год, $w_X = 14,72$ мг/л-год, $w_C = 0,01$ мг/л-год, $K_C = 0,001$ год⁻¹, $K_X = 100$ год⁻¹, $C_0 = 6$ мг/л, $v_C = 1,26$ м/год, $v_B = 1,92$ м/год, $v_K = 1,26$ м/год, $D_C = 0,721$, $D_B = 10^{-5}$, $D_K = 10^{-5}$) отримали такі результати (див. рис. 2–4):

Ці результати відображають характер динаміки функцій а) з часом в різних точках фільтра: 1 – при $x = 0,1$ м, 2 – при $x = 0,3$ м, 3 – при $x = 0,5$ м, 4 – при $x = 0,7$ м, 5 – при $x = 0,9$ м; б) по довжині фільтра в різні моменти часу. Як видно з рис. 2, концентрація активного мулу вздовж фільтра з часом зростає. Це пояснюється тим, що створюються сприятливі умови для розмноження бактерій, а саме: постійно надходить забруднення у вигляді домішок і відбувається регулювання подачі кисню, як показано на рис. 3 відповідно до зміни концентрації залізовмісних частинок, які при взаємодії між собою осідають в нижніх шарах фільтра у вигляді активного мулу. На рис. 4 відображено зміну концентрації домішок, яка з часом спадає, що підтверджує ефективну роботу фільтра, проте на ранньому етапі очищення на виході з фільтра не досягнуто потрібної кількості бактерій і кисню, що зумовлює збільшення концентрації забруднення, які визначено початковими умовами.



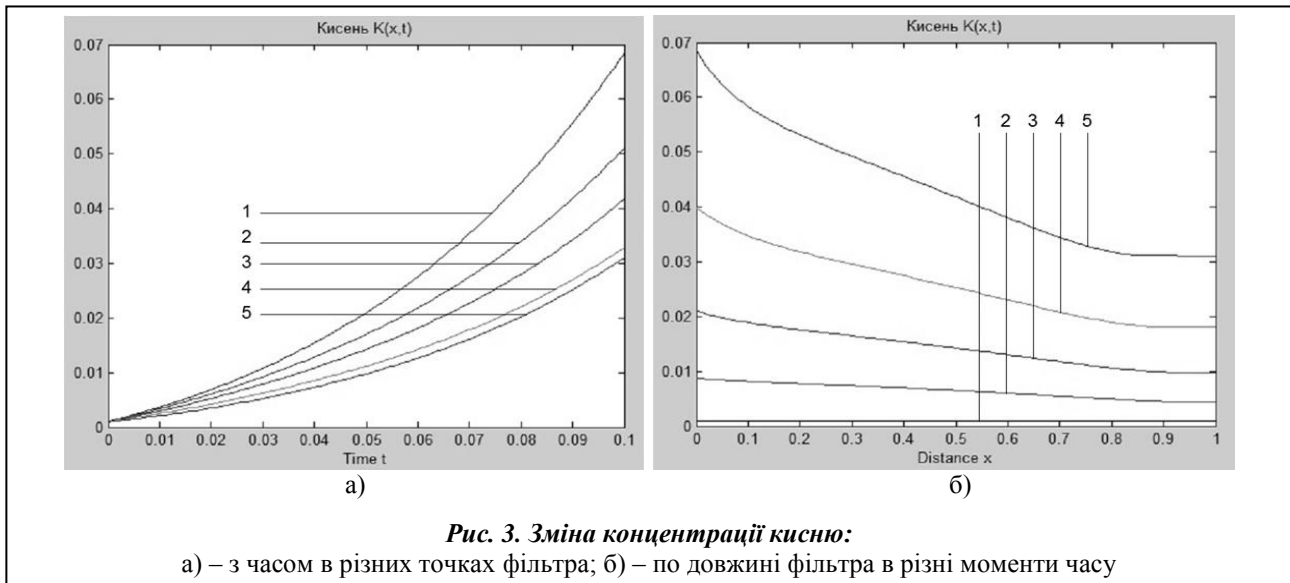


Рис. 3. Зміна концентрації кисню:

а) – з часом в різних точках фільтра; б) – по довжині фільтра в різні моменти часу

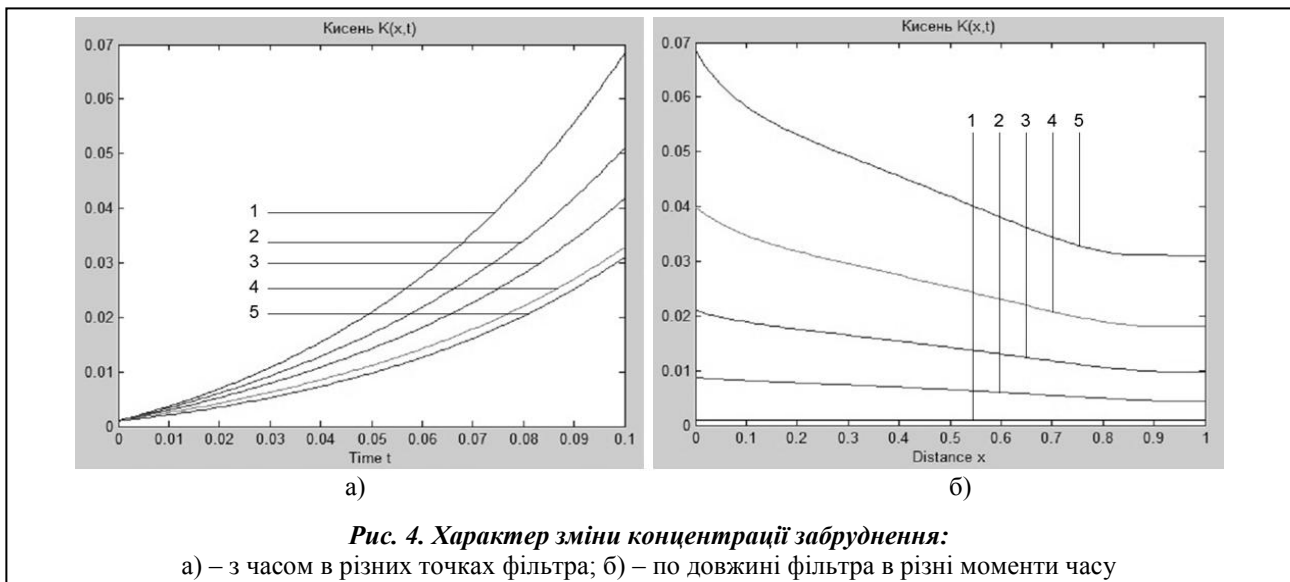


Рис. 4. Характер зміни концентрації забруднення:

а) – з часом в різних точках фільтра; б) – по довжині фільтра в різні моменти часу

Висновок

Побудована математична модель, що описує закономірності процесів зміни концентрацій забруднення, активного мулу і кисню в регенераторі аеротенка, тобто в першій фазі процесу очищення. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням функції *pdepe* середовище MatLab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації забруднення, бактерій та кисню протягом часу очистки рідини. В перспективі пропонується розробити математичну модель, яка враховуватиме вік активного мулу, а також такі параметри середовища, як кислотність, температура та ін.

Література

1. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод : Учеб. для вузов. – 4-е изд., доп. перераб. / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – М. : Изд-во АСВ. – 2006. – 702 с.
2. Святенко, А. І. Розрахунок процесу біологічного очищення міських стічних вод за допомогою математичних моделей з урахуванням структури потоків / А. І. Святенко, Л. М. Корнійко // Екологічна безпека. – 2009. – Т. 3(7). – С. 77–80.
3. Козачек, А. В. Исследование математической модели процесса аэробной очистки сточных вод как стадия оценки качества окружающей водной среды / А. В. Козачек, И. М. Авдашин, В. А. Лузгачев // Вестн. Тамбов. техн. ун-та. – 2014. – Т. 19, вып. 5. – С. 1683–1685.

4. *Математическое* моделирование и управление качеством очистки сточных вод / С. А. Понкратова, В. М. Емельянов, А. С. Сироткин, М. В. Шулаев // Вестн. Казан. технолог. ун-та. – 2010. – № 5–6. – С. 76–85.
5. *Нелінійні* задачі типу фільтрація-конвекція-дифузія-масообмін за умов неповних даних / А. Я. Бомба, В. І. Гаврилюк, А. П. Сафоник, О. А. Фурсачик. – Рівне : Нац ун-т водного госп-ва та природокористування. – 2011. – 276 с.
6. *Bomba, A.* Mathematical modeling of aerobic wastewater treatment in porous medium / Andrij Bomba, Andrij Safonyk // *Zeszyty Naukowe WSIInf Vol.* – 2013. – Vol. 12, № 1. – P. 21–29.
7. *Adetola, V.* Adaptive estimation in nonlinearly parameterized nonlinear dynamical systems / V. Adetola, D. Lehrer, M. Guay // *American Control Conf. on O'Farrell Street.* – San Francisco, USA, 2011. – P. 31–36.
8. *A nonlinear* observer for an activated sludge wastewater treatment process / B. Boulkroune, M. Darouach, S. Gille et al. // *USA, American Control Conf.* – 2009. – P. 1027–1033.
9. *Practical* identifiability of ASM2d parameters - systematic selection and tuning of parameter subsets / R. Brun, M. Kiihni, W. Gujer et al. // *Water Research.* – 2002. – № 36. – P. 4113–4127.
10. *Brune, D.* Optimal control of the complete-mix activated sludge process / D. Brune // *Environmental Technology.* – 1985. – №6:11. – P. 467–476.
11. *Dochain, D.* Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes / D. Dochain, P. Vanrolleghem. – London: IWA Publishing, 2001. – 342 p.
12. *Task group* on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment processes / M. Henze, G. P. L. Grady, W. Gujer et al. // *Activated sludge model no. 1. Scientific and Technical Report 1, IAWPRC.* – London, 1987. – 243 p.
13. *Task group* on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment. / M. Henze, W. Gujer, T. Mino et al. // *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report 9, IWA, London: IWA Publishing, 2000.* – 122 p.
14. *Knights, G. D.* Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for monod biodegradation kinetics using bivariate data / G. D. Knights, G. A. Peters // *Biotechnol. Bioeng.* 69. – 2000. – № 2. – P. 160–170.
15. *Ghai, Q.* Modeling, estimation and control of biological wastewater treatment plants / Q. Ghai // *Doctoral Theses at NTNU 2008:108 at IIT, Porsgrunn. Telemark University College.* – 2008. – 187 p.

Поступила в редакцію 02.04.16