

УДК 504.5:[628.334.5/6:519.87]

М. В. ЛЕМЕШ^{1*}, М. М. БІЛЯЄВ^{2*}, Л. Г. ТАТАРКО^{3*}, З. М. ЯКУБОВСЬКА^{4*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

^{2*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта larisa.tatarco@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{4*}Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД НА БАЗІ КАМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

Мета. Основною метою статті є розробка багатофакторних камерних моделей для експрес-оцінки ефективності роботи реакторів біологічного очищення стічних вод. **Методика.** Для комп'ютерного моделювання процесу біологічного очищення стічних вод розроблено дві чисельні камерні моделі. В основу моделей покладено закон збереження маси для субстрату та активного мулу. Моделі є нуль-вимірними. У першій камерній моделі процес окислення забруднювача розраховують на базі реакції першого порядку. У другій камерній моделі для розрахунку окислення забруднювача використано модель Monod. Для чисельного інтегрування моделювальних рівнянь використано метод Ейлера. Моделі дозволяють під час розрахунку біореактора, враховувати зміну з часом концентрації активного мулу, субстрату, що потрапляють до реактора для біологічного очищення стічних вод. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію розроблених чисельних моделей. Наведено результати комп'ютерних експериментів із дослідження ефективності очищення стічних вод у реакторах біологічного очищення для різних умов експлуатації споруд. **Наукова новизна.** Розроблено дві комп'ютерні камерні моделі, що дозволяють швидко оцінити ефективність роботи біореактора для очищення стічних вод. **Практична значимість.** Моделі можуть бути корисні під час проведення розрахунків у випадку проектування споруд біологічного очищення або під час реконструкції наявних біореакторів для їх перспективної роботи в нових умовах.

Ключові слова: очищення води; чисельне моделювання; біореактор; водокористування

Вступ

Біологічне очищення стічних вод широко використовують у віх країнах світу, тому що це ефективний спосіб ліквідації органічних забруднень. На етапі проектування споруд біологічного очищення, реконструкції наявних біореакторів виникає потреба швидко оцінити ефективність роботи споруд для нових умов експлуатації [3, 4, 6]. Але для розв'язання таких задач використання фізичного експерименту не є доцільним. Це пов'язано з тим, що фізичний експеримент у цій галузі потребує значного часу (ріст біоплівки триває декілька тижнів). Крім цього, з огляду на сучасні вимоги до результатів експериментальних досліджень слід підкреслити, що експеримент потребує використання

дуже вартісного обладнання, яке практично відсутнє в Україні. Тому особливе значення мають математичні моделі, що дозволяють швидко аналізувати ефективність роботи біореакторів. Для аналізу роботи споруд з очищення стічних вод використовують емпіричні [3–5], аналітичні та чисельні моделі [1, 2, 7–17]. Але в наш час існує певний дефіцит моделей для аналізу ефективності роботи біореакторів для очищення стічних вод. У зв'язку з цим можна говорити, що розробка сучасних методів комп'ютерного моделювання багатофакторного процесу очищення стічних вод у біологічних реакторах є важливою задачею.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Мета

Метою роботи є розробка камерних комп'ютерних моделей для оцінки ефективності очистки стічних вод в біореакторах. Ставиться задача створити багатофакторні моделі, що дозволяють швидко визначати динаміку очистки стічних вод з урахуванням зміни, з часом, концентрації субстрату, що надходить в біореактор.

Методика

Під час побудови моделей біологічного очищення води в умовах нелімітованого кисневого режиму в споруді будемо враховувати такі фактори:

- процес зміни концентрації субстрату в реакторі з часом;
- процес зміни концентрації активного мулу в реакторі з часом;
- процес потрапляння до споруди активного мулу (можливе потрапляння різної кількості в різні моменти часу);
- процес потрапляння до біореактора субстрату (можливе потрапляння різної кількості в різні моменти часу).

Побудуємо математичний опис процесу очищення води в біореакторі, що дозволяє врахувати ці фактори. Для цього будемо використовувати закон збереження маси. Розрахункова схема показана на рис. 1.

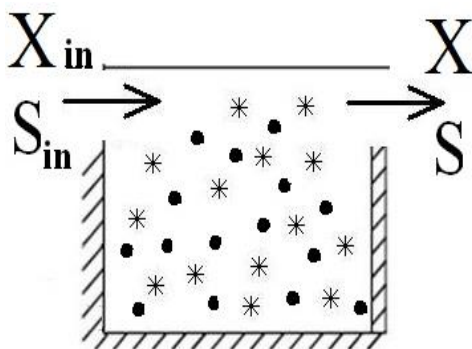


Рис. 1. Розрахункова схема споруди

Fig. 1. Computational scheme of the structure

Рівняння матеріального балансу для субстрату та активного мулу в реакторі, з урахуванням моделі Monod [17], можна записати так:

$$W \cdot dX = dt \cdot Q_x(t) \cdot X_{in}(t) - dt \cdot Q_x(t) \cdot X + dt \cdot \mu \cdot W \cdot X - dt \cdot K_d \cdot W \cdot X; \quad (1)$$

$$W \cdot dS = dt \cdot Q_s(t) \cdot S_{in} - dt \cdot Q_s(t) \cdot S(t) - dt \cdot \frac{\mu}{Y} \cdot W \cdot X; \quad (2)$$

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s}. \quad (3)$$

де $X_{in}(t)$ – концентрація активного мулу, що потрапляє до аеротенка; $S_{in}(t)$ – концентрація субстрату, що потрапляє до споруди; W – об'єм реактора; $Q_s(t)$ – витрата субстрату; $Q_x(t)$ – витрата активного мулу; K_d – коефіцієнт вимирання активного мулу; t – час; X – концентрація активного мулу в реакторі; S – концентрація субстрату в споруді; μ – коефіцієнт; Y – параметр [17].

Рівняння (1) і (2) описують зміну концентрації активного мулу та субстрату в споруді за час dt .

Для системи рівнянь (1) і (2) потрібно задати початкові умови в разі $t = 0$:

$$X = X_0; \quad S = S_0. \quad (4)$$

Поряд із моделлю (1)–(3) розглянемо спрощену модель:

$$W \cdot dS = dt \cdot Q_s(t) \cdot S_{in}(t) - dt \cdot Q_s(t) \cdot S(t) - W \cdot dt \cdot K_1 \cdot S, \quad (5)$$

де K_1 – емпірична константа, що враховує зміну концентрації субстрату внаслідок біологічного очищення [4]. Моделювальне рівняння (5) представляє закон збереження маси субстрату з урахуванням того, що має місце рух стічних вод у реакторі та «перетворення» субстрату зі швидкістю, яка задається параметром K_1 .

Розв'язання моделювальних рівнянь (1) і (2) дозволяє визначати значення концентрації активного мулу та субстрату в аеротенку з часом, тобто прогнозувати ефективність роботи аеротенка. Але ця система є системою нелінійних рівнянь. Тому для чисельного інтегрування не-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

лінійних рівнянь (1), (2) і (5) будемо використовувати метод Ейлера. Тоді розрахункові залежності будуть мати вигляд:

$$X^{n+1} = X^n + dt \cdot Q_{xw}(t^n) \cdot X_{in}^n(t^n) - dt \cdot Q_{xw}(t^n) \cdot X^n + dt \cdot \mu^n \cdot X^n - dt \cdot K_d \cdot X^n, \quad (6)$$

$$S^{n+1} = S^n + dt \cdot Q_{sw}(t^n) \cdot S_{in}^n - dt \cdot Q_{sw}(t^n) \cdot S_{in}^n(t) - dt \cdot \frac{\mu^n}{Y} X^{n+1}, \quad (7)$$

де $Q_{sw} = \frac{Q_s}{W}$, $Q_{xw} = \frac{Q_x}{W}$.

На базі розрахункових залежностей (6) і (7) визначають значення концентрації активного мулу та субстрату в біореакторі на новому часовому кроці ($n+1$). Під час розрахунку використовують параметри з попереднього часового кроку n . Для початку розрахунку використовують значення параметрів за $t=0$, тобто відомі початкові дані. Відзначимо, що розглянуті моделі відрізняють від відомих моделей тим, що в них враховано зміну витрати субстрату та активного мулу з часом, а також зміну з часом концентрації активного мулу та субстрату, що потрапляють до споруди.

Для чисельного розв'язання рівняння (5) використовують залежність (отриману на базі методу Ейлера):

$$S^{n+1} = S^n + dt \cdot Q_{sw}(t^n) \cdot S_{in}^n - dt \cdot Q_{sw}(t^n) \cdot S^n - dt \cdot K_1 \cdot S^n. \quad (8)$$

Для кодування різницевих рівнянь (6) і (7) використано FORTRAN. Створено код «BIO-1», для використання якого потрібно задати такі вхідні дані:

- $X_{in}(t)$ – концентрацію активного мулу, що потрапляє до біореактора;
- $S_{in}(t)$ – концентрацію субстрату, що потрапляє до біореактора;
- W – об'єм біореактора;
- $Q_s(t)$ – витрата з часом субстрату;
- $Q_x(t)$ – витрата з часом активного мулу;
- Y – параметр у моделі Monod.

На базі залежності (8) створено код «BIO-12», для використання якого потрібно задати такі вхідні дані:

- $S_{in}(t)$ – концентрацію субстрату, що потрапляє до біореактора;
- W – об'єм біореактора;
- $Q_s(t)$ – витрату з часом субстрату;
- K_1 – параметр.

Результати

Нижче наведено результати розрахунку зміни концентрації субстрату на виході з аеротенка за таких вхідних даних [5]:

- $S_{in} = 140$ мг/л – концентрація субстрату (БПК_{пов}), що потрапляє до споруди;
- $W = 12\,388$ м³ – об'єм аеротенка;
- $K_1 = 32$ (1/доб) – коефіцієнт швидкості деструкції субстрату в реакторі.

Початкова умова: $S_{in} = 140$ мг/л – концентрація субстрату в реакторі для моменту часу $t=0$.

Було розглянуто три сценарії:

- сценарій № 1: має місце рівномірна подача стічних вод до реактора;
- сценарій № 2: має місце рівномірна подача стічних вод до реактора, але на інтервалі 5–8 год збільшується на 30 % концентрація субстрату в стічних водах (аварійна ситуація);
- сценарій № 3: має місце рівномірна подача стічних вод до реактора, але на інтервалі 5–8 год збільшується на 30 % концентрація субстрату в стічних водах та на 30 % витрата стічних вод (аварійна ситуація).

На рис. 2 показано, як змінюється концентрація субстрату на виході з реактора для розглянутих сценаріїв.

Як бачимо з рис. 2, за рівномірної подачі стічних вод до моменту часу $t=5$ год встановлюється стаціонарний режим, концентрація субстрату на виході з реактора становить 15 мг/л. У випадку сценарію № 2 та № 3 ми бачимо сплеск концентрації субстрату в реакторі й погіршення ефективності його роботи. Але до моменту часу $t=9$ год реактор уже повертає свою ефективність. Тобто протягом 1 год реактор може відновити свою ефективність.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

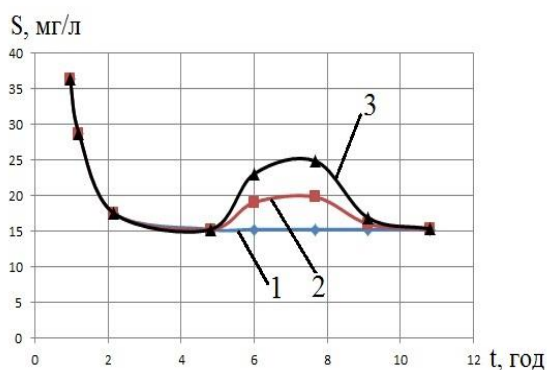


Рис. 2. Зміна концентрації субстрату на виході з реактора:
1 – рівномірна подача субстрату до реактора, сценарій № 1; 2 – сценарій № 2; 3 – сценарій № 3

Fig. 2. Changing substrate concentration at the reactor outlet:

1 – uniform supply to the reactor, scenario no. 1; 2 – scenario no. 2; 3 – scenario no. 3

Нижче наведено результати розв'язання задачі з оцінки ефективності роботи біологічного реактора на базі розроблених моделей (6) і (7), тобто у випадку використання моделі Monod для описання біологічного очищення стічних вод. Розрахунки виконано за таких вхідних даних [17]:

$S_{in} = 160$ мг/л – концентрація субстрату (БПК_{пов}), що потрапляє до біореактора;

$X_{in} = 1,5$ г/л – концентрація активного мулу, що потрапляє до реактора;

$\mu_{max} = 1,4$ – параметр;

$K_s = 100$ мг/л – параметр;

$K_d = 0,055$ 1/доб – коефіцієнт, що враховує загибель мікроорганізмів;

$Y = 0,55$ – параметр.

Початкова умова: $S_{in} = 160$ мг/л,

$X_{in} = 1,5$ г/л – концентрація субстрату та активного мулу в реакторі для моменту часу $t = 0$.

Було розглянуто три сценарії:

– сценарій № 1: немає подачі стічних вод та активного мулу до реактора, тобто йде процес очищення тільки тих стічних вод, що є в початковий момент у споруді;

– сценарій № 2: має місце рівномірна подача стічних вод та активного мулу до реактора.

– сценарій № 3: має місце рівномірна пода-

ча стічних вод та активного мулу до реактора, але на інтервалі 0,0032–0,016 (час безрозмірний) збільшується на 70 % концентрація субстрату в стічних водах, що потрапляють на очищення (аварійна ситуація).

На рис. 3 показано, як змінюється концентрація субстрату на виході з реактора для першого сценарію (час безрозмірний).

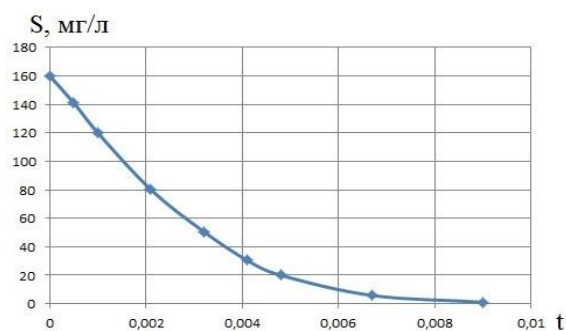


Рис. 3. Концентрація субстрату на виході з реактора (сценарій № 1)

Fig. 3. Substrate concentration at the the reactor outlet (scenario no. 1)

Як бачимо з рис. 3, у біореакторі з часом має місце поступове зниження концентрації субстрату до нуля.

На рис. 4 і 5 показано, як змінюється концентрація субстрату та активного мулу на виході з реактора для другого сценарію. Ці рисунки ілюструють динаміку «виходу» реактора на стаціонарний режим роботи.

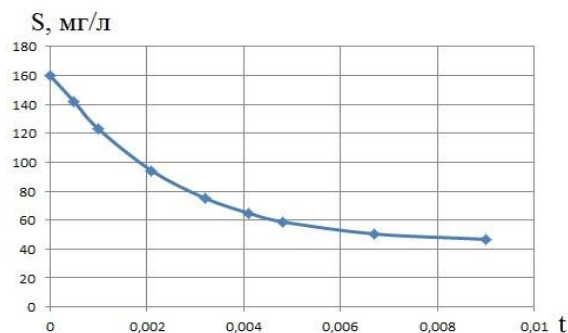


Рис. 4. Концентрація субстрату на виході з реактора (сценарій № 2)

Fig. 4. Substrate concentration at the the reactor outlet (scenario no. 2)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

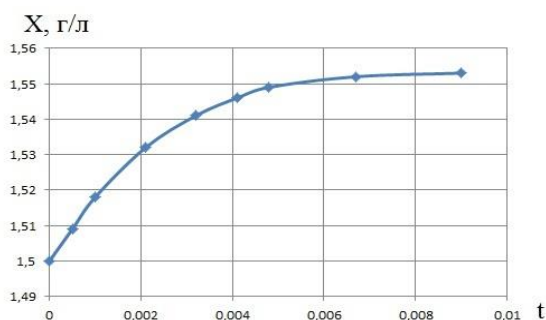


Рис. 5. Концентрація активного мулу на виході з реактора (сценарій № 2)

Fig. 5. Concentration of activated sludge at the reactor outlet (scenario no. 2)

На рис. 6 і 7 показано, як змінюється концентрація субстрату та активного мулу на виході з реактора для сценарію № 3, тобто, у випадку раптового збільшення кількості субстрату в стічних водах унаслідок аварії на об'єкті.

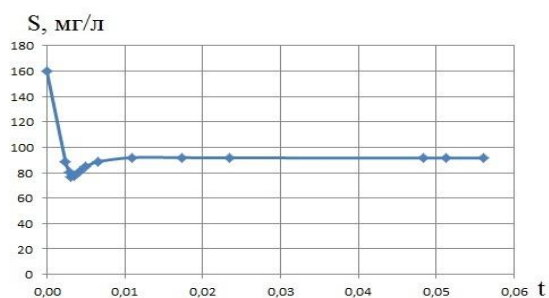


Рис. 6. Концентрація субстрату на виході з реактора (сценарій № 3)

Fig. 6. Substrate concentration at the the reactor outlet (scenario no. 3)

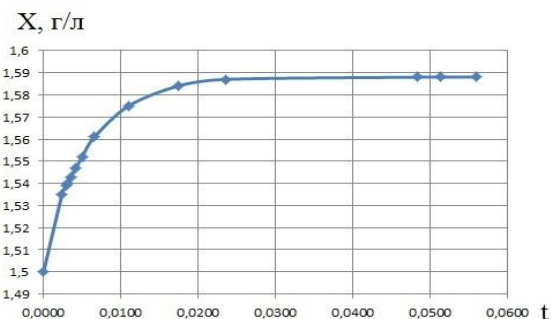


Рис. 7. Концентрація активного мулу на виході з реактора (сценарій № 3)

Fig. 7. Concentration of activated sludge at the reactor outlet (scenario no. 3)

Як бачимо з рис. 6, спочатку має місце зменшення концентрації домішки, що виходить з реактора, але з моменту часу приблизно $t = 0,005$ починається зростання концентрації субстрату на виході з реактора. Це означає погіршення ефективності біологічного очищення стічних вод. Із моменту часу $t = 0,01$ у реакторі встановлюється усталений режим очищення, але на виході з реактора, ми маємо значну концентрацію субстрату, тобто на цьому часовому інтервалі, що розглядається, реактор працює неефективно.

Із рис. 7 бачимо, що концентрація активного мулу спочатку поступово зростає, а далі виходить на стаціонарний режим.

Відзначимо, що час розрахунку кожної задачі на базі розроблених комп'ютерних моделей та програм склав 0,5 с, тобто, розроблені моделі можна використовувати для проведення серійних розрахунків із метою аналізу ефективності роботи реакторів для біологічного очищення стічних вод. Основна вимога до аналізу роботи реакторів на базі побудованих моделей – обґрунтоване визначення вхідних параметрів для них.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано дві камерні чисельні моделі для оцінки ефективності роботи реактора біологічного очищення стічних вод. Особливістю моделей є можливість оцінювати роботу біореакторів за змінних режимів експлуатації споруд. Моделі базуються на фундаментальному законі механіки суцільного середовища – законі збереження маси.

Розроблені чисельні моделі дозволяють швидко визначати концентрацію субстрату та активного мулу на виході з біореактора. Моделі можуть бути корисні під час проведення розрахунків у випадку проектування споруд біологічного очищення або під час реконструкції наявних біореакторів для їх перспективної роботи в нових умовах.

Висновки

У статті розглянуто нові камерні чисельні моделі, що дозволяють визначати ефективність роботи реакторів для біологічного очищення

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

стічних вод. Результати обчислювальних експериментів показують, що запропоновані чисельні моделі дозволяють визначити зміну ефективності роботи реакторів із часом за різних умов експлуатації споруд.

У подальшому цей науковий напрям слід розвивати в галузі розробки багатовимірних чисельних моделей для оцінки ефективності роботи біореакторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения* : монографія. Днепропетровск : Новая идеология, 2012. 112 с.
2. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках* : монографія. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 115 с.
3. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення* : навч. посіб. Київ : ІВНВКП «Укреліотек», 2010. 272 с.
4. Карелин Я. А., Жуков Д. Д., Журов В. Н., Репин Б. Н. *Очистка производственных сточных вод в аэротенках*. Москва : Стройиздат, 1973, 223 с.
5. Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Калицун В. И. *Примеры расчетов канализационных сооружений*. Москва : Высшая школа, 1981. 237 с.
6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделювання очисних стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аэротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповідь НАН України*. 2015. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
7. Alharbi A. O. M. The biological treatment of wastewater : mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2016. Vol. 94. Iss. 2. P. 347–348. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0004972716000411>
8. Amaral A., Gillot S., Garrido-Baserba M., Filali A., Karpinska A. M., Plósz B. G., ... Rosso D. Modelling gas-liquid mass transfer in wastewater treatment : when current knowledge needs to encounter engineering practice and vice-versa. *Water Science & Technology*. 2019. Vol. 80. Iss. 4. P. 607–619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253>
9. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N., Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic bio-film Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20>
10. Bomba A., Klymiuk Y., Prysiazniuk I., Prysiazniuk O., Safonyk A. Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1773. P. 040003-1–040003-11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966>
11. Dapelo D., Bridgeman G. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 81. Iss. 8. P. 1646–1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086>
12. Gao H., Stenstrom M. K. Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades : A review. *Water Environment Research*. 2019. Vol. 92. Iss. 6. P. 796–820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279>
13. Gao H., Stenstrom M. K. Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks : Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*. 2020. Vol. 146. Iss. 5. P. 04020028-1–04020028-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689)
14. Gao H., Stenstrom M. K. Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *Conference : World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. P. 212–224. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.021>
15. Griborio A. *Secondary Clarifier Modeling : A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. University of New Orleans : USA, 2004. 440 p.
16. Mocanu C. R., Mihaillescu R. Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*. 2012. Vol. 74. Iss. 2. P. 191–198.

17. Pereda M., Zamarrero J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis*. 2011. P. 1128–1133.
DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>

М. В. ЛЕМЕШ^{1*}, Н. Н. БЕЛЯЕВ^{2*}, Л. Г. ТАТАРКО^{3*}, З. М. ЯКУБОВСКАЯ^{4*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

^{2*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Каф. «Энергетика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта larisa.tatarco@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{4*}Каф. «Энергетика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА БАЗЕ КАМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Цель. Основной целью статьи является разработка многофакторных камерных моделей для экспресс-оценки эффективности работы реакторов биологической очистки сточных вод. **Методика.** Для компьютерного моделирования процесса биологической очистки сточных вод разработаны две численные камерные модели. В основу моделей положен закон сохранения массы для субстрата и активного ила. Модели ноль-мерные. В первой камерной модели процесс окисления загрязнителя рассчитывают на базе реакции первого порядка. Во второй камерной модели для расчета окисления загрязнителя использовано модель Monod. Для численного интегрирования моделирующих уравнений использован метод Эйлера. Модели позволяют при расчете биореактора учитывать изменение со временем концентрации активного ила, субстрата, попадающих в реактор для биологической очистки сточных вод. **Результаты.** Осуществлена программная реализация разработанных численных моделей. Приведены результаты компьютерных экспериментов по исследованию эффективности очистки сточных вод в реакторах биологической очистки для различных условий эксплуатации сооружений. **Научная новизна.** Разработаны две компьютерные камерные модели, позволяющие быстро оценить эффективность работы биореактора для очистки сточных вод при различных условиях эксплуатации. **Практическая значимость.** Модели могут быть полезными при проведении расчетов в случае проектирования сооружений биологической очистки или во время реконструкции существующих биореакторов для их перспективной работы в новых условиях.

Ключевые слова: очистка воды; численное моделирование; биореактор; водопользование

М. V. LEMESH^{1*}, M. M. BILIAIEV^{2*}, L. H. TATARKO^{3*}, Z. M. YAKUBOVSKA^{4*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

^{2*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail larisa.tatarco@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{4*}Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

MODELING OF THE PROCESS OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT BASED ON CHAMBER MODELS

Purpose. The aim of the work is to develop multifactor chamber models for rapid evaluation of the efficiency of reactors for biological wastewater treatment. **Methodology.** Two numerical chamber models have been developed for computer simulation of the biological wastewater treatment process. The models are based on the law of mass conservation for substrate and activated sludge. The models are zero-dimensional. In the first chamber model, the pollutant oxidation process is calculated based on a first-order reaction. The second chamber model uses the Monod model to calculate pollutant oxidation. Euler's method is used for numerical integration of modeling equations. The models allow, when calculating the bioreactor, to take into account the change over time in the concentration of activated sludge, the substrate entering the reactor for biological wastewater treatment. **Findings.** The software implementation of the developed numerical models is carried out. The results of computer experiments to study the efficiency of wastewater treatment in reactors for biological wastewater treatment for different operating conditions are presented. **Originality.** Two computer chamber models have been developed to quickly evaluate the efficiency of a bioreactor for wastewater treatment under different operating conditions. **Practical value.** The developed computer models can be used to determine the efficiency of biological wastewater treatment in reactors under different operating conditions.

Keywords: water purification; numerical simulation; bioreactor; water use

REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya: monografiya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh: monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkina, H. M., Polishchuk, O. V., & Prohulnyi, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiia i in-tensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
4. Karelin, Ya. A., Zhukov, D. D., Zhurov, V. N., & Repin, B. N. (1973). *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkah*. Moscow: Stroiyzdat. (in Russian)
5. Laskov, Yu. M., Voronov, Yu. V., & Kalicun, V. I. (1981). *Primery raschetov kanalizacionnykh sooruzhenij*. Moscow: Vysshaya Shkola. (in Russian)
6. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
7. Alharbi, A. O. M. (2016). The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 94(2), 347-348. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0004972716000411> (in English)
8. Amaral, A., Gillot, S., Garrido-Baserba, M., Filali, A., Karpinska, A. M., Plósz, B. G., ... & Rosso, D. (2019). Modelling gas-liquid mass transfer in wastewater treatment: when current knowledge needs to encounter engineering practice and vice-versa. *Water Science & Technology*, 80(4), 607-619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253> (in English)
9. Babaei, A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic biofilm Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20> (in English)
10. Bomba, A., Klymiuk, Y., Prysiazhniuk, I., Prysiazhniuk, O., & Safonyk, A. (2016). Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings*, 1773, 040003-1-040003-11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966> (in English)
11. Dapelo, D., & Bridgeman, G. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*, 81(8), 1646-1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

12. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2019). Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*, 92(6), 796-820
DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279> (in English)
13. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks: Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(5), 04020028-1-04020028-12.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689) (in English)
14. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *Conference: World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 212-224.
DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.021> (in English)
15. Griborio, A. (2004). *Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. USA, University of New Orleans Publ. (in English)
16. Mocanu, C. R., & Mihaillescu, R. (2012). Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*, 74(2), 191-198.
17. Pereda M., & Zamarreno J. M. (2011). Agent-based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis*. 1128-1133.
DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.02.2020

Прийнята до друку: 04.06.2020