

УДК 504.5:[628.3:519.87]

М. М. БЛЯЄВ^{1*}, М. В. ЛЕМЕШ^{2*}, В. О. ЗАДОЯ^{3*}, П. Б. МАШИХІНА^{4*},
Л. Г. ТАТАРКО^{5*}, З. М. ЯКУБОВСЬКА^{6*}

^{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 0000-0002-1531-7882

^{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 0000-0002-1230-8040

^{3*}Каф. «Економіка та менеджмент», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.a.zadova@gmail.com, ORCID 0000-0001-9408-4978

^{4*}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 gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

^{5*}Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта larisa.tatarko@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{6*}Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479

Моделювання біологічного очищення стічних вод в аеротенку з рухомим біоценозом

Мета. Основною метою статті є розробка чисельної моделі для аналізу процесу біологічного очищення стічних вод в реакторі з рухомим біоценозом. **Методика.** Для математичного моделювання процесу біологічного очищення стічних вод в реакторі з рухомим біоценозом використано гідродинамічну модель нев'язкої безвихрової течії. Крайові умови для моделювального рівняння розраховано на поверхнях біореактора, твердих стінках, верхній поверхні; на вхідній границі; на границі витоку зі споруди. Для розрахунку процесу руху активного мулу та субстрату в біореакторі використано модель масопереносу, що враховує конвективно-дифузійний рух. Процес біологічного очищення води в тій частині біореактора, де немає рухомих носіїв біоценозу, розраховано на базі моделі Monod. А процес біологічного очищення води в частині біореактора з рухомими носіями розраховано на базі емпіричної моделі в три етапи. На першому етапі визначено субстрат за допомогою моделі Нагтемоес. На другому етапі розраховано швидкість «споживання» субстрату в біоплівці. На третьому етапі визначено зміну концентрації субстрату в зоні, де розташовані носії біоценозу, за рахунок конвективного руху, дифузії субстрату в потоці та його деструкції в біоплівці на носіях. Хаотичний рух носіїв біоценозу в реакторі змодельовано на базі параболічного рівняння дифузії. Для чисельного інтегрування моделювальних рівнянь використано кінцево-різницевої схеми. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію побудованої чисельної моделі. Проведено обчислювальний експеримент із визначення ефективності біологічного очищення стічних вод у різних частинах біореактора. **Наукова новизна.** Створено ефективну багатofакторну чисельну модель, що дозволяє оперативно аналізувати ефективність біологічного очищення стічних вод в аеротенку з рухомими носіями біоценозу. **Практична значимість.** Створена двовимірна чисельна модель може бути використана для проведення серійних розрахунків на етапі проєктування систем біологічного очищення стічних вод та аналізу ефективності роботи біореакторів за різних умов експлуатації.

Ключові слова: очищення води; біологічне очищення води; математичне моделювання; біореактор; модель Monod; рухомі носії біоценозу

Вступ

Для визначення ефективності біологічного очищення води на стадії проєктування аеротенків потрібно використовувати спеціальні математичні моделі [1, 2, 6, 7]. У наш час для вирі-

шення цієї задачі найчастіше використовують балансові, емпіричні та аналітичні моделі [3–6]. Але в деяких випадках, ці моделі не можуть дати надійного результату, бо вони не враховують у першу чергу геометричну форму реак-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

тора та процес гідродинаміки, а також ряд інших параметрів. У зв'язку з цим актуальною проблемою є розробка математичних моделей, що дозволяють теоретично досліджувати процес біологічного очищення стічних вод в аеротенках з урахуванням найбільш важливих факторів [8–16, 19].

Мета

Основною метою нашої роботи є розробка CFD-моделі процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенках із рухомим біоценозом.

Методика

Розглянемо підхід для моделювання руху носіїв біоценозу в реакторі (рис. 1).

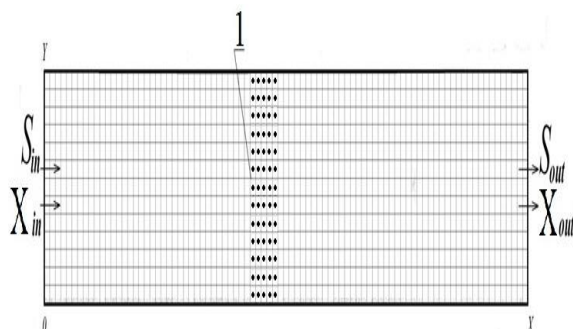


Рис. 1. Схема розрахункової області:
1 – область, де розташований рухомий біоценоз

Fig. 1. Scheme of the calculation area:
1 – area where the mobile biocenosis is located

По-перше, відзначимо, що процес руху носіїв у реакторі є суттєво хаотичний та досить складний із механічної точки зору: має місце взаємодія носіїв один з одним, вплив потоку води на носії, вплив бульбашок повітря на рух носіїв. Урахувати всі види взаємодії неможливо в математичній моделі, тому під час побудови потрібно робити припущення, і досить суттєві.

Із точки зору теорії масопереносу кожен рухомий носій біоплівки можна розглядати як «тверду» домішку, що знаходиться в перемішуванні, у реакторі. Припустимо, що рух носіїв не впливає на гідродинаміку потоку стічних вод у реакторі. Оскільки рух носіїв біоплівки є хаотичним, то для опису цього руху в реакторі будемо використовувати такий підхід хаотичний

рух субстанції моделює друга похідна від концентрації цієї субстанції. Тоді процес хаотичного руху носіїв біоплівки будемо моделювати таким рівнянням:

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = \mu_c \frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} + \mu_c \frac{\partial^2 C_a}{\partial y^2}, \quad (1)$$

де μ_c – коефіцієнт дифузії, C_a – концентрація рухомих носіїв, t – час.

Розглянемо граничні умови для моделювального рівняння:

$$\text{– на твердих поверхнях реактора } \frac{\partial C_a}{\partial n} = 0,$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої стінки;

– на нижній сітці, де потік надходить у зону з носіями, $C_a = 0$;

– на границі витoku скрізь сітку $C_a = C_m$, де C_m – максимально можлива концентрація рухомих носіїв в об'ємі води.

Початкова умова: за $t = 0$ $C_a = C_{00}$, де C_{00} – відома концентрація рухомих носіїв у реакторі.

Таким чином, модель (1) є дифузійною моделлю руху носіїв біоценозу в реакторі. Під час моделювання процесу руху носіїв біоценозу на базі рівняння (1) припустимо, що носії не залишають зону розташування. На практиці це досягається тим, що на границях зони розташовуються сітки, які не дають можливості носіям вийти із зони.

Зміну концентрації рухомих носіїв у різних точках реактора визначаємо шляхом розв'язання рівняння дифузії (1). Оскільки, концентрація носіїв у різних точках реактора змінюється з часом t , то буде змінюватися ефективність очищення води в різних частинах реактора.

Модель гідродинаміки. Для розрахунку нерівномірного поля швидкості потоку стічних вод у біореакторі використовуємо таке рівняння гідродинаміки:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0; \quad (2)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (3)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де P – потенціал швидкості; u, v – компоненти вектора швидкості потоку стічних вод у біореакторі.

Крайові умови для моделювального рівняння такі:

– на поверхнях біореактора, твердих стінках, верхній поверхні $\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \frac{\partial X}{\partial n} = 0$, де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні;

– на вхідній границі: $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n, S = S_{in}, X = X_{in}$, де V_n – швидкість течії; S_{in}, X_{in} – відома концентрація;

– на границі витоку зі споруди: $P = P_0 + const, \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \frac{\partial X}{\partial n} = 0$.

Модель біологічного очищення стічних вод у реакторі. Запропоновані моделювальні рівняння можна поділити на такі групи:

1. Рівняння для розрахунку біологічного очищення стічних вод у тій частині споруди де немає рухомого біоценозу. У цій області використовуємо такі моделювальні рівняння [7, 19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial uX}{\partial x} + \frac{\partial vX}{\partial y} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial X}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - K_d X; \quad (6)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu}{Y} X; \quad (7)$$

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s},$$

де K_d – коефіцієнт вимирання активного мулу; t – час; $X(x, y, t)$ – концентрація активного мулу; $S(x, y, t)$ – концентрація субстрату; $\mu_{x,y,z}(t)$ – параметр в осях x, y, z із плином часу; μ_{\max} – параметр у моделі Monod; Y – емпіричний параметр; K_s – параметр; $u(x, y), v(x, y)$ – компоненти швидкості водного потоку; μ_x, μ_y – коефіцієнти дифузії відповідно в напрямку x, y ; t – час.

2. Рівняння для розрахунку біологічного очищення води в тій частині споруди, де є рухомий біоценоз (рис. 1, позиція 1).

Розрахунок процесу деструкції субстрату в зоні, де розташовані рухомі носії, здійснюємо в три етапи. По-перше, на базі моделі Harremoos визначаємо параметр r [18, 19]:

$$r = k_a \cdot (S)^n, \quad (8)$$

де S – концентрація субстрату, г/м³; параметр k_a – визначається експериментально.

По-друге, розраховуємо швидкість «споживання» субстрату r_r в біоплівці на базі емпіричної моделі [17, 18]:

$$r_r = r \cdot w, \quad (9)$$

де w – активна площа поверхні носіїв.

На третьому етапі визначаємо зміну концентрації субстрату в зоні, де розташовані носії біоценозу, за рахунок конвективного руху, дифузії субстрату в потоці та його деструкції в біоплівці на носіях.

Для опису цих процесів використовуємо такі рівняння:

– для запропонованої моделі потрібно знати кількість рухомих носіїв, які є в контрольному об'ємі, та визначити параметр r на базі інформації про активну площу поверхні взаємодії й k_a ;

– для розрахунку поля швидкості потоку стічних вод у біореакторі (як у зоні, де є рухомі носії в біоплівці, так і в зоні, де їх немає) використовуємо рівняння для потенціалу швидкості.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Постановку крайових умов для моделювальних рівнянь розглянуто в [1, 2].

Таким чином, у рамках запропонованої моделі процес біологічного очищення в реакторі проходить у двох зонах: у зоні, де є рухомі носії, та в зоні, де їх немає.

Для проведення розрахунків потрібно задати чисельність рухомих носіїв у реакторі, площу активної поверхні, що використовується в процесі біологічного очищення.

Чисельне інтегрування моделювальних рівнянь здійснюємо на базі різницевої схем, що розглянуті в [7].

Алгоритм розв'язання задачі з оцінки ефективності роботи реактора з рухомими носіями такий:

1. Розв'язуємо задачу гідродинаміки шляхом визначення поля потенціалу швидкості. Для цього використовуємо рівняння (1).

2. Визначаємо поле швидкості потоку стічних вод у реакторі за залежністю (3).

3. Визначаємо поле концентрації субстрату в реакторі з урахуванням швидкості потоку та дифузії на момент часу t .

4. Визначаємо поле концентрації активного мулу в реакторі з урахуванням швидкості потоку та дифузії на момент часу t .

5. Розраховуємо процес деструкції субстрату в зоні, де немає рухомих носіїв на момент часу t . Для цього використовуємо залежність Monod.

6. Розраховуємо процес руху носіїв у реакторі на момент часу t за рівнянням (1).

7. На основі поля розподілу рухомих носіїв біоценозу в реакторі на момент часу t , розраховуємо параметри, що визначаються залежностями (8), (9).

8. Розраховуємо процес руху та деструкції субстрату в зоні, де є рухомі носії біоценозу на момент часу t . Для цього використовуємо рівняння (3–7).

9. Розрахунок повторюємо, починаючи з п. 3, для визначення нових значень параметрів у реакторі для нового моменту часу.

Результати

Нижче наведено результати обчислювального експерименту, що був проведений на базі розробленої чисельної моделі. Розрахунки виконано за таких вихідних даних [19]:

$S_{in} = 150$ мг/л – концентрація субстрату (БПК_{пов}), що потрапляє в споруду;

$X_{in} = 1200$ мг/л – концентрація активного мулу, що потрапляє в споруду;

розміри біореактора $20 \times 5 \times 5$ м;

$Q_s(t) = 4704$ м³/доб. – витрата стічних вод;

$\mu_x = \mu_y = 3 \cdot 10^{-4}$ м²/доб.;

$\mu_{max} = 1.04$ – параметр;

$K_s = 100$ мг/л – параметр;

$K_d = 0.055$ од./доб. – коефіцієнт, що враховує загибель мікроорганізмів;

$Y = 0.55$ – параметр;

активна площа поверхні носія – $0,001$ м².

максимальна кількість носіїв у реакторі –

$C_m = 120 \cdot 10^3$ шт./м³.

Початкова умова (для моменту часу $t = 0$):
 $S_{in} = 150$ мг/л – концентрація субстрату в реакторі; кількість носіїв у реакторі $C_m = 90 \cdot 10^3$ шт./м³; $X_{in} = 1200$ мг/л – концентрація активного мулу.

На рис. 2 показана схема розрахункової області. Для зручності в ній виділено декілька зон. Зона № 1 розташована в тій частині, де має місце потрапляння субстрату в реактор. У зоні № 2 є рухомі носії біоценозу. Зона № 3 примикає до вихідного отвору з реактора (тут, які в зоні № 1 немає рухомих носіїв біоценозу).

Нижче на рис. 3–8 показано розподіл концентрації субстрату та концентрації рухомих носіїв біоценозу в реакторі для різних моментів часу. Відзначимо, що час – безрозмірний. Концентрація цих величин є усередненою за шириною реактора. Кожне число на наведених рисунках показує концентрацію субстрату та рухомих носіїв у відсотках від максимальної концентрації (для субстрату я концентрація становить $S_{in} = 150$ мг/л, а максимальна концентрація рухомих носіїв біоценозу дорівнює $C_m = 120 \cdot 10^3$ шт./м³).

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

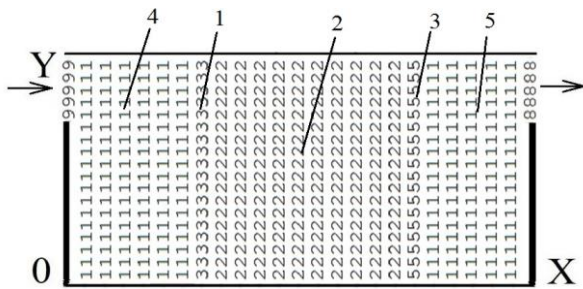


Рис. 2. Схема розрахункової області:
1 – ліва межа зони, де є рухомі носії біоценозу; 2 – зона, де є рухомі носії біоценозу; 3 – права межа зони, де є рухомі носії біоценозу; 4 – перша зона; 5 – третя зона

Fig. 2. Scheme of the calculation area:
1 – left boundary of the zone where there are mobile biocenosis carriers; 2 – zone where there are mobile biocenosis carriers; 3 – right boundary of the zone where there are mobile biocenosis carriers; 4 – first zone; 5 – third zone

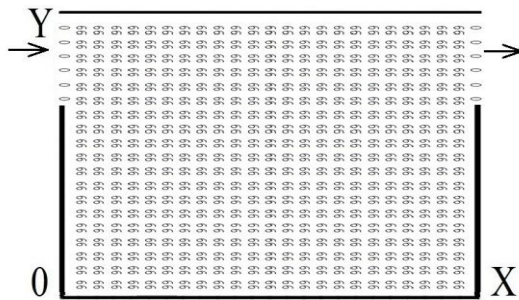


Рис. 3. Розподіл концентрації субстрату в біореакторі на початок розрахунку ($t = 0$)

Fig. 3. Distribution of substrate concentration in the bioreactor at the beginning of the calculation ($t = 0$)

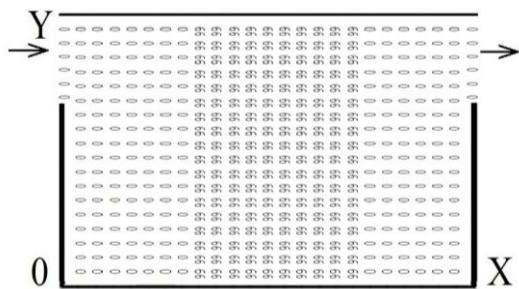


Рис. 4. Розподіл концентрації рухомих носіїв біоценозу в біореакторі на початок розрахунку ($t = 0$, числу «99» відповідає концентрації $C_m = 90 \cdot 10^3$ шт./м³)

Fig. 4. Distribution of the concentration of mobile biocenosis carriers in the bioreactor at the beginning of the calculation ($t = 0$, the number 99 corresponds to the concentration $C_m = 90 \cdot 10^3$ pieces/m³)

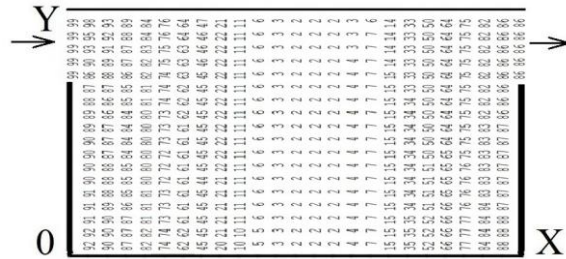


Рис. 5. Розподіл концентрації субстрату в біореакторі ($t = 0,091$)

Fig. 5. Distribution of substrate concentration in the bioreactor ($t = 0.091$)

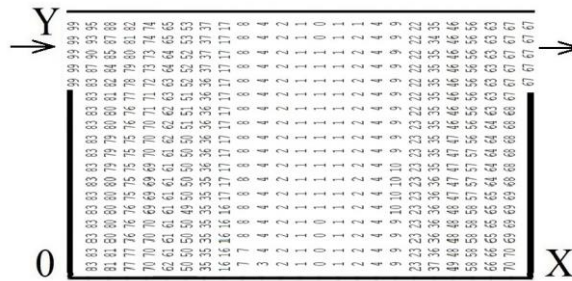


Рис. 6. Розподіл концентрації субстрату в біореакторі ($t = 0,148$)

Fig. 6. Distribution of substrate concentration in the bioreactor ($t = 0.148$)

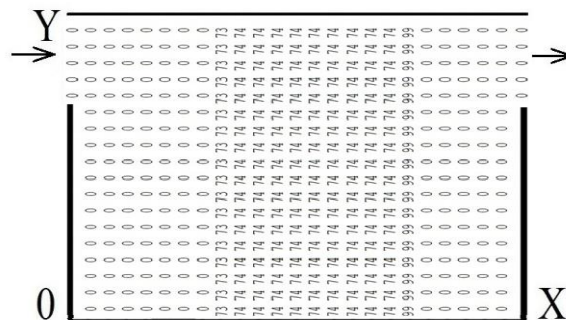


Рис. 7. Розподіл концентрації рухомих носіїв біоценозу в біореакторі ($t = 0,172$, числу 99 відповідає концентрації $C_m = 120 \cdot 10^3$ шт./м³)

Fig. 7. Distribution of the concentration of mobile biocenosis carriers in the bioreactor ($t = 0.172$, the number 99 corresponds to the concentration $C_m = 120 \cdot 10^3$ pieces/m³)

Наукова новизна та практична значимість

Побудовано чисельну модель для аналізу процесу біологічного очищення стічних вод у біореакторі з рухомим біоценозом. Визначення поля швидкості потоку стічних вод у біореакторі здійснюється на базі моделі потенціального руху. Моделювання переносу субстрату, активного мулу в біореакторі, де немає рухомих носіїв, здійснюється на базі рівняння конвективно-дифузійного масопереносу. У цій області процес біологічного очищення здійснюється на базі моделі Monod. Процес біологічного очищення в зоні, де розташовані рухомі носії, розраховується на базі емпіричної моделі.

Розроблена чисельна модель може бути використана на етапі проектування споруд біологічного очищення води.

Висновки

У статті розглянуто нову CFD-модель, що дозволяє аналізувати процес біологічного очищення стічних вод у реакторах із рухомим біоценозом. Модель дає можливість розраховувати процес очищення з урахуванням хаотичного руху носіїв біоценозу. Основу моделі складають фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища.

У подальшому передбачено розробку тривимірної CFD-моделі на базі рівнянь руху в'язкої рідини.

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. Biliaiev M. M., Lemesh M. V., Gunko O. Y., Zadoia V. O., Mashykhina P. B., Yakubovska Z. M. 3D modeling of biological wastewater treatment in aeration tank. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 6 (90). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/224619>
8. 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>
9. 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 viceversa. *Water Science & Technology*. 2019. Vol. 80. Iss. 4. P. 607–619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253>
10. 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>
11. 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/10.1063/1.496496611>
12. 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.2020.08612>

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

13. 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.127913>
14. 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.1943-7870.000168911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.000168911)
15. Gao H., Stenstrom M. K. Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. P. 212–224. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.02115>
16. Griborio A. *Secondary Clarifier Modeling : A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. University of New Orleans : USA, 2004. 440 p.
17. Pereda M., Zamarrero J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Med-iterranean Conference on Control and Automation Aquis*. 2011. P. 1128–1133. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>
18. Rusten B., Ødegaard H., Lundar A. Treatment of dairy wastewater in a novel moving bed biofilm reactor. *Water Science and Technology*. (1992), Vol. 26. Iss. 3–4. P. 703–711. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0451>
19. Trojanowicz K., Wójcik W. Dimensioning of aerated submerged fixed bed biofilm reactors based on a mathematical biofilm model applied to petrochemical wastewater – the link between theory and practice. *Water SA*. 2014. Vol. 40, No. 2. P. 323–330. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v40i2.14>

M. M. BILIAIEV^{1*}, M. V. LEMESH^{2*}, V. O. ZADOIA^{3*}, P. B. MASHYKHINA^{4*},
L. H. TATARKO^{5*}, Z. M. YAKUBOVSKA^{6*}

^{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 0000-0002-1531-7882

^{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 0000-0002-1230-8040

^{3*}Dep. «Economics and Management», 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 v.a.zadoya@gmail.com, ORCID 0000-0001-9408-4978

^{4*}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 gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

^{5*}Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail larisa.tatarko@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{6*}Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479

Simulation of Biological Wastewater Treatment in Aerotanks with Moving Biocenosis

Purpose. The main purpose of the article is to develop a numerical model for the analysis of the process of biological wastewater treatment in a reactor with a mobile biocenosis. **Methodology.** For mathematical modeling of the process of biological wastewater treatment in a reactor with a moving biocenosis, a hydrodynamic model of a non-viscous vortex-free flow is used. We calculated the boundary conditions for the modeling equation on the surfaces of the bioreactor, solid walls, and the upper surface; at the inlet boundary; at the outlet boundary from the building. To calculate the process of movement of activated sludge and substrate in the bioreactor, a mass transfer model is used, which takes into account the convective-diffusion movement of the substrate and activated sludge. The process of biological water purification in that part of the bioreactor where there are no mobile biocenosis carriers will be calculated based on the Monod model. The process of biological water purification in the part of the bioreactor where there are mobile carriers is calculated on the basis of an empirical model in three stages. The first stage is

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

determined using the Harremoes model. At the second stage, the rate of substrate «consumption» in the biofilm is calculated. At the third stage, the change in the substrate concentration in the zone where the biocenosis carriers are located is determined due to convective movement, substrate diffusion in the flow and its destruction in the biofilm on the carriers. The chaotic motion of biocenosis carriers in the reactor is modeled based on the parabolic diffusion equation. Finite-difference schemes are used for numerical integration of modeling equations. **Findings.** The software implementation of the constructed numerical model is carried out. A computational experiment to determine the efficiency of biological wastewater treatment in different parts of the bioreactor was conducted. **Originality.** An effective multifactorial numerical model has been created, which allows quick analysis of the efficiency of biological wastewater treatment in an aeration tank with mobile biocenosis carriers. **Practical value.** The created two-dimensional numerical model can be used for serial calculations at the stage of designing biological wastewater treatment systems and analysis of the efficiency of bioreactors under different operating conditions.

Keywords: water treatment; biological water treatment; mathematical modeling; bioreactor; Monod model; mobile biocenosis carriers

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. Vasilenko, O. A., Grabovskiy, P. O., Larkina, G. M., Polishchuk, O. V., & Progulny, V. Y. (2010). *Rekonstrukciya i intensyfikaciya sporud vodopostachannya ta vodovidvedennya*: navchalyy posibnyk. Kiev: IVNVKP «Ukrgeiotek». (in Ukrainian)
4. Karelin, Ya. A., Zhukov, D. D., Zhurov, V. N., & Repin, B. N. (1973). *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkah*. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
5. Laskov, Yu. M., Voronov, Yu. V., & Kalitsun, V. I. (1981). *Primery raschetov kanalizatsionnykh sooruzheniy*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
6. Olynyk, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutants 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. Biliaiev, M. M., Lemesh, M. V., Gunko, O. Y., Zadoia, V. O., Mashykhina, P. B., Yakubovska, Z. M. (2020). 3D modeling of biological wastewater treatment in aeration tank. *Science and transport progress*, 6(90), 5-14. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/224619> (in English)
8. 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)
9. 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 and Technology*, 80(4), 607-619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253> (in English)
10. Babaei, A. A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and kinetic evaluation of upflow anaerobic biofilm reactor for nitrogen removal from wastewater by Anammox process. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20> (in English)
11. Bomba, A., Klymiuk, Y., Prisyazhniuk, I., Prisyazhniuk, O., & Safonyk, A. (2016). Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1773, pp. 040003-1-040003-11). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966> (in English)
12. Dapelo, D., & Bridgeman, J. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 81(8), 1646-1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086> (in English)
13. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2019). Development and applications in computational fluid dynamics 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)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

14. 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)
15. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 212-224.
DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.021> (in English)
16. Griborio, A. (2004). *Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach*. Dissertation and Theses. University of New Orleans: USA. (in English)
17. Pereda, M., & Zamarreno, J. M. (2011). Agent-based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterrian Conference on Control and Automation Aquis* (pp. 1128-1133).
DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)
18. Rusten, B., Ødegaard, H., & Lundar, A. (1992). Treatment of Dairy Wastewater in a Novel Moving Bed Biofilm Reactor. *Water Science and Technology*, 26(3-4), 703-711. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0451> (in English)
19. Trojanowicz, K., & Wójcik, W. (2014). Dimensioning of aerated submerged fixed bed biofilm reactors based on a mathematical biofilm model applied to petrochemical wastewater-the link between theory and practice. *Water SA*, 40(2), 323-330. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v40i2.14> (in English)

Надійшла до редколегії: 05.10.2020

Прийнята до друку: 04.02.2021