

УДК 628.35

О. Я. ОЛІЙНИК¹, Т. С. АЙРАПЕТЯН^{2*}, С. М. КУРГАНСЬКА³

¹Відділ прикладної гідродинаміки, Інститут гідромеханіки НАН України, вул. Желябова, 8/4, Київ, Україна, 03057, тел. +38 (050) 559 72 89, +38 (044) 459 65 10, ел. пошта Oleyunik2019AI@gmail.com, ORCID 0000-0002-9110-1709

^{2*}Каф «Водопостачання, водовідведення і очищення вод», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 33 40, +38 (057) 707 31 06, ел. пошта Tamara.Ayrapetyan@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-8834-5622

³Відділ прикладної гідродинаміки, Інститут гідромеханіки НАН України, вул. Желябова, 8/4, Київ, Україна, 03057, тел. +38 (063) 917 87 84, ел. пошта kurganska@ukr.net, ORCID 0000-0002-7593-6458

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АЕРОТЕНКІВ ЗА РАХУНОК ДОДАТКОВОГО ВЛАШТУВАННЯ ЗАКРІПЛЕНОГО БІОЦЕНОЗУ

Мета. Дослідження передбачає виконання порівняльних розрахунків для оцінки ефективності роботи аеротенків із додатковим закріпленим біоценозом (біоплівкою). **Методика.** Для підвищення ефективності роботи аеротенків за рахунок упровадження додаткового завантаження із закріпленим біоценозом (біоплівкою) побудовано математичні моделі, що враховують одночасне окислення органічних забруднень завислим і закріпленим біоценозом. На основі цих моделей розроблено методи розрахунку параметрів очищення. З'ясовано вплив різних факторів на очищення в аеротенках, установлено, що інтенсивність очищення підвищується за рахунок додаткових елементів із закріпленим біоценозом. При цьому розглянуто можливі технологічні й конструктивні схеми аеротенків, коли елементи завантаження (насадки, сітки тощо) розташовані по всьому їх об'єму або більш щільно й компактно тільки на окремих ділянках. **Результати.** Визначені за допомогою чисельних методів параметри очищення стічних вод від органічних забруднень і побудовані графіки показують значну ефективність роботи аеротенків за рахунок упровадження додаткового завантаження із закріпленим біоценозом (біоплівкою). Виконані розрахунки впливу додаткового завантаження на ефективність роботи аеротенків-змішувачів та аеротенків-витискувачів показали, що використання іммобілізованого біоценозу дозволяє підвищити якість видалення органічних забруднень у 2–5 разів. **Наукова новизна.** Науково обгрунтовано вплив різних факторів на очищення стічних вод в аеротенках, ефективність якого підвищується за рахунок додаткових елементів із закріпленим біоценозом. **Практична значимість.** У разі впровадження результатів досліджень на підприємствах з очистки стічних вод може бути значно підвищена якість видалення органічних забруднень біологічними методами. Реалізація методів розрахунку за запропонованими залежностями дозволяє більш повно й обгрунтовано врахувати важливі процеси, які значно впливають на утилізацію органічних забруднень та ефективність роботи аеротенків із додатковим залученням для очищення стічних вод закріпленого біоценозу.

Ключові слова: аеротенки-реактори; закріплений біоценоз (біомаса); біоплівка; активний мул; реакції очищення

Вступ

Серед найважливіших екологічних проблем сучасності питання охорони природних джерел водопостачання має першорядне значення. Скидання неочищених і недостатньо очищених стічних вод у поверхневі водойми постійно погіршують їхній стан. Ці джерела забруднень, як правило, мають у своєму складі сполуки азоту й фосфору. Тому глибоке очищення стічних вод є однією з найважливіших проблем на сьогоднішній день.

Накопичений досвід і наукові дослідження багатьох поколінь фахівців доводять пріорите-

тність біологічних методів очищення. Нині більшість стічних вод, які централізовано відводять, очищають на станціях аерації в аеротенках [1, 2, 4, 5, 12]. Однак така традиційна технологія біологічного очищення характеризується недостатньою ефективністю (особливо щодо видалення сполук фосфору) і не завжди здатна забезпечити встановлені нормативи [3, 7, 14, 16, 19, 23].

Тому на очисних спорудах, де біологічне очищення стічних вод здійснюють за традиційною схемою, важливим практичним завданням є вдосконалення наявних технологій очищення,

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

підвищення ефективності роботи очисних споруд.

Загалом для підвищення ефективності роботи аеротенків застосовують наступні рішення: створення ділянок з аеробними й анаеробними умовами окислення [2, 13, 21]; застосування нерівномірного розосередженого впуску стічних вод [2]; подача технічного кисню [2, 15]; додавання реагентних препаратів [2, 15] та ін. Зрозуміло, що вдосконалення конструкцій і технологій затримують економічні фактори. Також останнім часом в очищенні стічних вод одержали поширення процеси сумісного одночасного вилучення органічних забруднень (ОЗ) та азоту завислим і закріпленим біоценозом [20, 22]. За своєю активністю іммобілізовані біоценози значно перевищують окисну здатність вільноплаваючого активного мулу. При цьому елементи завантаження (насадки, сітки тощо) можуть бути розташовані по всьому об'єму аеротенка або більш щільно й компактно тільки на його окремих ділянках.

Однак для оцінки ефективності роботи аеротенків за рахунок упровадження додаткових елементів із закріпленим біоценозом (біоплівкою) необхідні більш повні й досконалі математичні моделі. Моделі, які будуть урахувати процеси одночасного окислення ОЗ завислим і закріпленим біоценозом, дозволять обґрунтовано оцінити вплив різних факторів очищення в аеротенках. Ці процеси пов'язані з утворенням біоплівки різної товщини й структури на поверхні додаткового завантаження (сітки) в об'ємі аеротенка [13, 21].

Визначені за допомогою чисельних методів параметри очищення стічних вод з урахуванням впливу різних факторів очищення дадуть можливість одержати надійні й достовірні результати. За отриманими результатами можна оцінити ефективність роботи аеротенків за рахунок упровадження додаткових елементів із закріпленим біоценозом (біоплівкою).

Мета

Основною метою є розрахунок і порівняльна оцінка ефективності роботи аеротенків-змішувачів та аеротенків-витискувачів. При цьому очищення стічних вод відбувається за рахунок додаткового влаштування в їх об'ємі завантаження із закріпленим біоценозом (біо-

масою) у вигляді біоплівки з високою концентрацією мікроорганізмів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- навести розрахункові залежності й математичні моделі, що дозволяють оцінити вплив різних факторів на сумісне вилучення ОЗ завислим і закріпленим біоценозом в аеротенках різних конструкцій, а саме аеротенках-змішувачах та аеротенках-витискувачах;

- на підставі запропонованих моделей і методів розрахунку проаналізувати вплив основних факторів, виявити параметри постачання необхідної кількості кисню в місце проведення реакцій і утилізації ОЗ;

- розглянути конкретні приклади для різних технологічних схем розташування реактора із закріпленою біомасою й навести порівняльні результати досліджень сумісного очищення від ОЗ;

- обґрунтувати підвищення ефективності очищення стічних вод за рахунок улаштування закріпленого біоценозу в об'ємі аеротенків.

Методика

Для оцінки спільного вилучення органічних забруднень завислим і закріпленим біоценозом в аеротенках різних конструкцій було побудовано математичні моделі й на їх основі розроблено методи розрахунку параметрів очищення [6, 7, 11, 17, 18]. У нашому випадку для різних гідродинамічних схем аеротенків, а саме аеротенків-змішувачів та аеротенків-витискувачів. На конкретних прикладах показано й обґрунтовано значне підвищення ефективності очищення за рахунок улаштування закріпленого біоценозу.

Спочатку розглянемо найбільш доцільну з практичної точки зору технологічну схему аеротенка-змішувача, яка складається з двох частин (реакторів 1 і 2) [7]. У реакторі 1 вилучення ОЗ відбувається тільки за рахунок завислого біоценозу (активного мулу), тобто він працює як звичайний аеротенк-змішувач. У другій частині (реакторі 2) вилучення ОЗ відбувається переважно закріпленим біоценозом, який формується на встановленому завантаженні з можливим урахуванням, за необхідності, дії активного мулу. При цьому вважають, що процес біохімічного окислювання в достатній кіль-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

кості забезпечений киснем, тобто надходження кисню не буде лімітувати кінетику окислювання як завислого, так і закріпленого біоценозу. Розглянемо також найбільш поширений на практиці випадок, коли вилучення ОЗ активним мулом відбувається за реакцією нульового порядку, а в біоплівці – за реакцією першого порядку. Тоді згідно з [7] для визначення концентрації ОЗ на виході із 2-го реактора (аеротенка) L_{a2} запропонована така загальна залежність:

$$L_{a2} = \frac{L_0 - T_{a1} w_{a1} - T_{a2} w_{a2}}{1 + \frac{F_{a2}}{Q_a} K_L (1-A)}, \quad (1)$$

де

$$w_a = \frac{\mu_{ma} X_a}{Y_a}, \quad T_{a1} = \frac{W_{a1}}{Q_a},$$

$$T_{a2} = \frac{W_{p2}}{Q_a} = \frac{\varepsilon W_{a2}}{Q_a}, \quad T_a = T_{a1} + T_{a2}. \quad (2)$$

Для 1-го реактора об'єм рідини беремо рівним об'єму реактора $W_{p1} = W_{a1}$. Для реактора 2 необхідно врахувати об'єм завантаження з біоплівкою $W_{\delta 2}$, тому маємо:

$$W_{p2} = \varepsilon W_{a2}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{W_{\delta 2}}{W_{a2}}. \quad (3)$$

Питому площу завантаження з біоплівкою в реакторі 2 визначаємо за формулою:

$$F_{\delta n2} = \frac{F_{\delta 2}}{W_{a2}}, \quad (4)$$

де $F_{\delta 2}$ – загальна площа поверхні завантаження (біоплівки) в реакторі 2 об'ємом W_{a2} .

Рекомендації для визначення параметра $A = \frac{L_{\delta 2}}{L_{a2}}$ за умови, що швидкість реакції в біоплівці взято першого порядку, наведені в роботах [7, 9]. Тут L_{a2} і $L_{\delta 2}$ – відповідно концентрації ОЗ в реакторі 2 й на поверхні біоплівки.

Для подальшого аналізу залежність представимо у вигляді:

$$\frac{L_{a2}}{L_0} = \frac{1-\tau}{1+\gamma}, \quad (5)$$

де

$$\tau = \frac{T_a w_a}{L_0}, \quad \gamma = \frac{F_{a2}}{Q} K_L (1-A). \quad (6)$$

На рис. 1 подано графіки функції $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\tau, \gamma)$, побудовані за залежністю (5).

При цьому беремо, що об'єми 1 й 2-го реакторів співпадають $W_{a1} = W_{a2}$ і що $w_{a1} \approx w_{a2} = w_a$. Результати, представлені на рис. 1, показують, що використання закріпленої біомаси дозволяє значно поліпшити якість очищення стічних вод. Проте, як свідчить рис. 2, зі збільшенням параметра γ , який залежить від потоку N і питомої площі завантаження $F_{\delta n}$, тобто від щільності розташування елементів завантаження, це поліпшення значно уповільнюється. Тому в цьому випадку, як і в інших технологічних схемах аеротенків із закріпленим біоценозом, важливим питанням є вибір найбільш доцільної площі завантаження F_{δ} на основі проведення додаткового аналізу.

На рис. 3 представлено графіки функції $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\tau, \gamma)$, побудовані за умови, що очищенням у 2-ому реакторі за рахунок завислого біоценозу (активного мулу) можна знехтувати, тобто $T_{a2} = 0$ ($\tau = T_{a1}$).

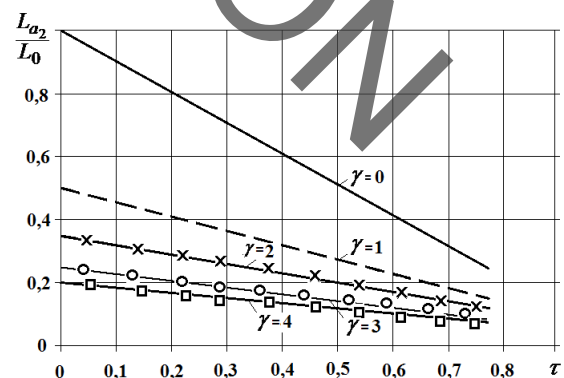
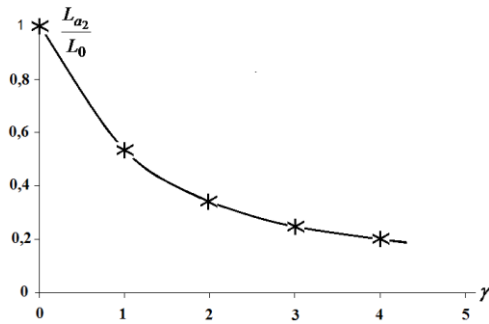
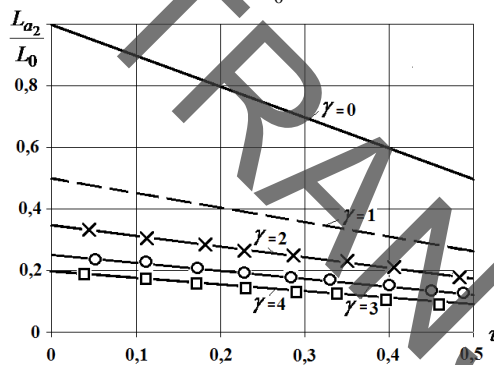


Рис. 1. Графік залежності $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\tau, \gamma)$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Рис. 2. Графік залежності $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\gamma)$ за $\tau = 0$ Рис. 3. Графік залежності $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\tau, \gamma)$

Як видно із рис. 1 і 3, активний мул у 2-ому реакторі за однакових значень параметра τ не дуже впливає на загальний ефект очищення. Однак очищення у вільному об'ємі 2-го реактора дозволяє дещо збільшити величину параметра τ й, відповідно, якість вилучення органічних забруднень.

У роботі [10 (рис. 2, 3)] наведено порівняльні результати досліджень сумісного очищення від ОЗ в аеротенку-змішувачі, у якому рівномірно розташовані елементи додаткового завантаження. Під час побудови цих графіків також використано залежність (5), у якій параметри τ й γ взято згідно з технологічною схемою аеротенку-змішувача, а саме:

$$\tau = \frac{T_a W_a}{L_0}, \quad \gamma = \frac{F_{\delta l}}{Q_a} K_L (1 - A),$$

$$T_a = \frac{W_{pa}}{Q_a}, \quad W_{pa} = \varepsilon W_a, \quad (7)$$

де $F_{\delta l}$ – загальна площа елементів завантаження в аеротенку-змішувачі довжиною l та об'ємом W_{al} . Згідно з [10 (рис. 2, 3)], тільки за значних

значень параметра τ й незначних значень γ необхідно також урахувувати вилучення ОЗ за рахунок активного мулу.

Отримані залежності й виконані розрахунки дозволяють обґрунтувати підвищення ефективності роботи аеротенка за допомогою розташування в другій половині його об'єму елементів завантаження із закріпленим біоценозом.

У роботах [7, 10] наведено методи розрахунку параметрів біологічного очищення стічних вод від ОЗ в аеротенках-витискувачах за умови сумісного очищення завислим і закріпленим біоценозом. Для оцінки ефективності роботи таких аеротенків розглянемо схему їх роботи із завислим і закріпленим біоценозом, коли елементи завантаження (насадки, сітки й т. п.) рівномірно розташовані по всій довжині l [10].

У результаті проведених теоретичних досліджень, виконаних за умови, що вилучення ОЗ завислим і закріпленим біоценозом відбувається за реакцією першого порядку, одержано наступну залежність для визначення зміни концентрації L_a по довжині аеротенка X :

$$L_a(X) = L_0 \tilde{x} = e^{-B\tilde{x}}, \quad (8)$$

$$\tilde{x} = (A_* + k_{a*})x = B\tilde{x}, \quad B = (A_* + k_{a*})l, \quad \tilde{x} = \frac{x}{l}, \quad (9)$$

де

$$A_* = \frac{\lambda_0}{V}(1 - A), \quad k_{a*} = \frac{k_a}{V}, \quad \lambda_0 = \frac{F_{\delta}}{F_a} K_L,$$

$$k_a = \frac{K_{ma} X_a}{K_{ma} Y_a}, \quad V = \frac{Q_a}{F_a},$$

$F_{\delta} = F_{\delta l}$ – площа поверхні завантаження (біоплівки) на одиницю довжини аеротенка l (м);

K_L – коефіцієнт масопереносу в рідинній плівці (м/год); $A = \frac{L_{\delta}}{L_0}$ – параметр біоплівки – ви-

значаємо за рекомендаціями, наведеними в роботах [7, 9].

На виході з аеротенка масо $x = l$, $\tilde{x} = 1$,

$$L_a(l) = L_0 e^{-\tilde{l}} = L_0 e^{-B}, \quad \tilde{l} = B. \quad (10)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для проведення подальшого аналізу й одержання порівняльних оцінок впливу різних факторів на процеси очищення представимо залежність (10) у вигляді:

$$\frac{L_a(l)}{L_0} = e^{-(B_L+B_a)} \quad (11)$$

де $B_L = lA_*$, $B_a = lk_{a*}$.

Так, за $B_L = 0$ вилучення ОЗ в аеротенку відбувається тільки за рахунок завислого біоценозу (активного мулу), а за $B_a = 0$ – тільки за рахунок закріпленого біоценозу (біоплівки).

На основі залежності (11) побудовано розрахункові графіки $\frac{L_a(l)}{L_0} = f(B_L, B_a)$, наведені в роботі [8 (рис. 3)] й на рис. 4.

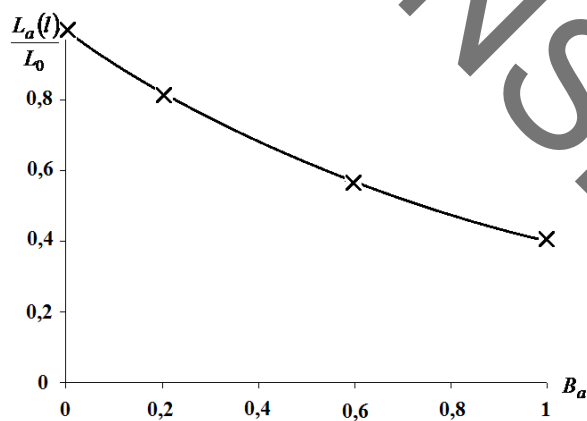


Рис. 4. Графік залежності

$$\frac{L_a(l)}{L_0} = f(B_a) \text{ за } B_L = 0$$

Результати розрахунків, представлених у роботі [8 (рис. 3)] й на рис. 4, показують, що додаткове впровадження завантаження із закріпленим біоценозом (біоплівкою) дозволяє суттєво підвищити роботу аеротенка-витискувача, особливо за $B_L < 1$.

У роботі [13] дано експериментальну оцінку ефективності (EF) роботи аеротенка-змішувача за рахунок додаткового влаштування завантаження з пластикових сіток, результати якої за

$$Q_a = 110 \text{ мл/хв}, \quad L_0 = 150 \frac{\text{мгБСК}_5}{\text{л}}$$

наведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Експериментальна оцінка
ЕФ вилучення ОЗ в аеротенку**

Завантаження	Відносна ЕФ, %	Загальна ЕФ, %	Інтенсивність ЕФ, %	L_a , мг/л на виході
0 сіток	0	72,50	–	44
6 сіток	25	90,00	17,50	16
12 сіток	50	95,00	22,50	8
18 сіток	75	96,50	23,75	6
24 сітки	100	97,50	25,00	4

Із табл. 1 видно значне збільшення ЕФ, зменшення L_a за умови використання 6 сіток і поступове зростання ЕФ у разі збільшення кількості сіток. У цьому випадку загальне зростання ефективності складає 25 %. Як і зазначалось раніше (рис. 2, 3) і в роботі [10 (рис. 2)], інтенсивність збільшення ефективності стабілізується за досягнення мінімальної концентрації забруднень на виході L_a .

Результати

Здійснення порівняльних розрахунків за представленими залежностями дає можливість оцінити інтенсивність підвищення ефективності очищення в аеротенках за рахунок додаткових елементів із закріпленим біоценозом. У побудованих моделях ураховано особливості надходження органічних забруднень і кисню в біоплівку, її параметри, а також швидкості кінетичних реакцій за умови сумісного вилучення органічних забруднень завислим і закріпленим біоценозом.

Реалізація методів розрахунку за запропонованими залежностями дозволяє більш повно й обґрунтовано врахувати важливі процеси очищення стічних вод, що відбуваються з додатковим залученням закріпленого біоценозу. Ці процеси значно впливають як на утилізацію ОЗ, так і на ефективність роботи аеротенків.

Наукова новизна та практична значимість

У рамках дослідження, описаного в цій статті, підвищити ефективність роботи аеротенків пропонуємо шляхом виділення його час-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

тини під додаткове завантаження із закріпленими біоценозом. У цій частині відбувається одночасне окислення органічних забруднень активним мулом і біоплівкою. Представлено математичну модель, яка описує цей процес. Проведено розрахунки, виконано порівняльну оцінку ефективності очисної споруди залежно від ступеня впливу додаткового завантаження. Така оцінка дозволяє обґрунтувати раціональні параметри споруди біологічного очищення удосконаленої конструкції. Це означає, що отриманий науковий результат у вигляді розрахунків на основі математичної моделі біологічного окислення органічних забруднень завислим і закріпленим біоценозом, у тому числі оцінка впливу цих компонентів на ефективність очищення, є цікавим із теоретичної точки зору.

Із практичної точки зору, проведене дослідження дозволяє обґрунтовано рекомендувати для підвищення якості видалення органічних забруднень в аеротенках застосовувати додаткове завантаження із закріпленими мікроорганізмами.

Висновки

Отримані результати дають підстави стверджувати про можливість упровадження в реальний технологічний процес очищення стічних вод закріпленого біоценозу, що дозволить одержати на виході з аеротенків воду з концентрацією органічних речовин, яка не перевищує допустимих значень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та розрахунки : навч. посіб. / О. А. Василенко, С. М. Еноян, Г. М. Смірнова [та ін.]. – Київ : КНУБА ; Харків : ХНУБА : Ексклюзив, 2012. – 538 с.
2. Воронов, Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод : учебник для вузов / Ю. В. Воронов. – Москва : АСВ, 2009. – 760 с.
3. ДБН В.2.5-75-2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 128 с.
4. Дослідження процесів очищення стічних вод від біогенних елементів та утилізації енергетичного потенціалу стічних вод : монографія / О. О. Грицина, М. А. Єсін, В. С. Жукова [та ін.]. – Рівне : Нац. ун-т водн. госп-ва та природокористування, 2018. – 268 с.
5. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аеротенками / Н. С. Жмур. – Москва : АКВАРОС, 2003. – 507 с.
6. Моделювання ефективності роботи станції біологічного очищення стічних вод / О. О. Шевченко, В. А. Крупко, Л. М. Клінцов, І. М. Іванова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5/10 (71). – С. 16–20.
7. Олійник О. Я. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Доповіді НАН України. – 2015. – № 5. – С. 55–60. doi: <http://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
8. Олійник, О. Я. Підвищення ефективності роботи аеротенків-витискувачів за рахунок завислого і зваженого біоценозу / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки : наук.-техн. зб. – Київ, 2016. – Вип. 26. – С. 123–130.
9. Олійник, О. Я. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах / О. Я. Олійник, О. А. Колпакова // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук.-техн. пр. – Київ, 2014. – Вип. 16. – С. 68–86.
10. Олейник, А. Я. Повышение эффективности работы аеротенков / А. Я. Олейник, Т. С. Айрапетян // Вісн. Одес. держ. акад. буд-ва та архітектури : зб. наук. пр. – Одеса, 2015. – Вип. 59. – С. 216–224.
11. Biliaev, M. M. Modeling of biological wastewater treatment on the basis of quick-computing numerical model / M. M. Biliaev, M. V. Lemesh // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 1 (73). – С. 15–23. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/124882>
12. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design / M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama, D. Brdjanovic. – London : IWA Publishing, 2008. – 511 p.
13. Gebara, F. Activated sludge biofilm waste water treatment system / F. Gebara // Water Research. – 1999. – Vol. 33. – Iss. 1. – P. 230–238. doi: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(98\)00210-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(98)00210-3)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

14. Improving a compact biofilm reactor to realize efficient nitrogen removal performance: step-feed, intermittent aeration, and immobilization technique / M. Zeng, J. Hu, D. Wang [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – Vol. 25. – Iss. 7. – P. 6240–6250. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0935-9>
15. Marzec, M. Reliability of removal of selected pollutants in different technological solutions of household wastewater treatment plants / M. Marzec // *Journal of Water and Land Development*. – 2017. – Vol. 35. – Iss. 1. – P. 141–148. doi: <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0078>
16. Plant-wide model-based analysis of iron dosage strategies for chemical phosphorus removal in wastewater treatment systems / C. Kazadi Mbamba, E. Lindblom, X. Flores-Alsina [et al.] // *Water Research*. – 2019. – Vol. 155. – P. 12–25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.048>
17. Revilla, M. Analysis of simulation tools and optimization of the operational conditions for biofilm activated sludge industrial process / M. Revilla, B. Galán, J. R. Viguri // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2018. – Vol. 15. – Iss. 12. – P. 2499–2510. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1626-2>
18. Shamsutdinova, Z. R. Analysis of the aerotanks efficiency in wastewater treatment system / Z. R. Shamsutdinova, I. I. Khafizov // *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. – 2016. – Iss. 4. – P. 245–249. doi: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-245-249>
19. Shreve, M. J. Trace organic contaminant removal in six full-scale integrated fixed-film activated sludge (IFAS) systems treating municipal wastewater / M. J. Shreve, R. A. Brennan // *Water Research*. – 2019. – Vol. 151. – P. 318–331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.042>
20. Groundwater share quantification through flood hydrographs simulation using two temporal rainfall distributions / K. S. Balkhair, A. Masood, M. Almazroui [et al.] // *Desalination and Water Treatment*. – 2018. – Vol. 114. – P. 109–119. doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22346>
21. The development of simultaneous partial nitrification, ANAMOX and denitrification process in a single reactor for nitrogen removal / H. Chen, S. Liu, F. Yang, Y. Xue, T. Wang // *Bioresource Technology*. – 2009. – Vol. 100. – Iss. 4. – P. 1548–1554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.003>
22. The transformation of nitrogen and phosphorus compounds during biological treatment at the Minsk treatment plant / R. M. Markevich, M. V. Rymovskaya, I. A. Grebenchikova, E. A. Flyurik, I. P. Dziuba // *Biotechnology and the Ecology of Big Cities* / Edited by S. D. Varfolomeev, G. E. Zaikov, L. P. Krylova. – Minsk : Nova Science Publishers, 2011. – P. 53–60.
23. Von Sperling, M. *Biological wastewater treatment series. Vol. 5 : Activated sludge and aerobic biofilm reactors* / M. Von Sperling. – London : IWA Publishing, 2007. – 340 p.

А. Я. ОЛЕЙНИК¹, Т. С. АЙРАПЕТЯН^{2*}, С. Н. КУРГАНСКАЯ³

¹Отдел прикладной гидродинамики, Институт гидромеханики НАН Украины, ул. Желябова, 8/4, Киев, Украина, 03057, тел. +38 (050) 559 72 89, +38 (044) 459 65 10, эл. почта Oleyunik2019AI@gmail.com, ORCID 0000-0002-9110-1709

^{2*}Каф. «Водоснабжение, водоотведение и очистка вод», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 707 33 40, +38 (057) 707 31 06, эл. почта Tamara.Ayrapetyan@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-8834-5622

³Отдел прикладной гидродинамики, Институт гидромеханики НАН Украины, ул. Желябова, 8/4, Киев, Украина, 03057, тел. +38 (063) 917 87 84, эл. почта kurganska@ukr.net, ORCID 0000-0002-7593-6458

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЭРОТЕНКОВ ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПРИКРЕПЛЕННОГО БИОЦЕНОЗА

Цель. Исследование предусматривает выполнение сравнительных расчетов для оценки эффективности работы аэротенков с дополнительным прикрепленным биоценозом (био пленкой). **Методика.** Для повышения эффективности работы аэротенков за счет внедрения дополнительной загрузки с прикрепленным биоценозом (био пленкой) построены математические модели, которые учитывают одновременное окисление органических загрязнений взвешенным и прикрепленным биоценозом. На основе этих моделей разработаны методы расчета параметров очистки. Определено влияние различных факторов на очистку в аэротенках, установлено, что интенсивность очистки повышается за счет дополнительных элементов с прикрепленным биоценозом. При этом рассмотрены возможные технологические и конструктивные схемы аэротенков, когда элементы загрузки (насадки, сетки и т. п.) расположены по всему их объему или более плотно и компактно

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/175883>

© О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян, С. М. Курганська, 2019

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

только на отдельных участках. **Результаты.** Определенные с помощью численных методов параметры очистки сточных вод от органических загрязнений и построенные графики показывают значительную эффективность работы аэротенков за счет внедрения дополнительной загрузки с прикрепленным биоценозом (биопленкой). Выполненные расчеты влияния дополнительной загрузки на эффективность работы аэротенков-смесителей и аэротенков-вытеснителей показали, что использование иммобилизованного биоценоза позволяет повысить качество удаления органических загрязнений в 2–5 раз. **Научная новизна.** Научно обосновано влияние различных факторов на очистку сточных вод в аэротенках, эффективность которой повышается за счет дополнительных элементов с прикрепленным биоценозом. **Практическая значимость.** При внедрении результатов исследований на предприятиях по очистке сточных вод может быть значительно повышено качество удаления органических загрязнений биологическими методами. Реализация методов расчета по предложенным зависимостям позволяет более полно и обоснованно учесть важные процессы, которые значительно влияют на утилизацию органических загрязнений и эффективность работы аэротенков с дополнительным привлечением для очистки сточных вод прикрепленного биоценоза.

Ключевые слова: аэротенки-реакторы; прикрепленный биоценоз (биомасса); биопленка; активный ил; реакции очистки

A. Y. OLEJNIK¹, T. S. AIRAPETIAN^{2*}, S. M. KURGANSKA³

¹Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Zheliabov St., 8/4, Kyiv, Ukraine, 03057, tel. +38 (050) 559 72 89, +38 (044) 459 65 10, e-mail Oleynik2019Al@gmail.com, ORCID 0000-0002-9110-1709

^{2*}Dep. «Water Supply, Sewerage and Purification of Waters», O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshal Bazhanov St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 33 40, +38 (057) 707 31 06, e-mail Tamara.Ayrapetyan@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-8834-5622

³Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Zheliabov St., 8/4, Kyiv, Ukraine, 03057, tel. +38 (063) 917 87 84, e-mail kurganska@ukr.net, ORCID 0000-0002-7593-6458

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF AEROTANKS DUE TO ADD-ON ATTACHED BIOCEANOSIS

Purpose. The research involves the implementation of comparative calculations to evaluate the performance of aerotanks with add-on attached biocenosis (biofilm). **Methodology.** For improving the performance of the aerotanks due to the introduction of an additional load with attached biocenosis (biofilm), the authors constructed the mathematical models that consider the simultaneous oxidation of organic pollutants with suspended and attached biocenosis. Based on these models, the methods were developed for calculating clarification parameters. The authors performed evaluation of the influence of various clarification factors in aerotanks. They proved that the clarification intensity is increased due to additional elements with the attached biocenosis. Herewith, possible technological and structural schemes of aerotanks were considered, when the loading elements (nozzles, screens, etc.) are located throughout the whole volume or more densely and compactly only in its individual sections. **Findings.** The parameters of effluent clarification from organic pollution in the aerotanks are determined using numerical methods. The graphs show the significant performance of aerotanks due to the introduction of the additional load with the attached biocenosis (biofilm). The calculations of the effect of additional loading on the performance of complete-mix aerotanks and continuous-flow aerotanks show that the use of immobilized biocenosis can improve the quality of removal of organic pollutants by 2-5 times. **Originality.** The authors substantiated scientifically the influence of various factors of wastewater treatment in aerotanks, the efficiency of which is increased due to additional elements with the attached biocenosis. **Practical value.** The introduction of research results in wastewater treatment plants can significantly improve the quality of the removal of organic pollutants by biological methods. The implementation of the calculation methods for the proposed dependencies makes it possible to more fully and reasonably take into account important processes that significantly affect the utilization of organic pollutants and the efficiency of the aerotanks with the additional involvement of wastewater treatment by the attached biocenosis.

Keywords: aerotanks-reactors; attached biocenosis (biomass); biofilm, active sludge; clarification reactions

REFERENCES

1. Vasylenko, O. A., Epoian, C. M., Smirnova, H. M., Korinko, I. V., Vasylenko, L. O., & Airapetian, T. S. (2012). *Vodovidvedennia ta ochystka stichnykh vod mista. Kursove i diplomne proektuvannia. Pryklady ta rozrakhunky: Navchalnyi posibnyk*. Kyiv: KNUBA; Kharkiv: KhNUBA; Ekskliuzyv. (in Ukrainian)
2. Voronov, Y. V. (2009). *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: ASV. (in Russian)
3. Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia, 128 DBN V.2.5-75-2013 (2013). (in Ukrainian)
4. Hrytsyna, O. O., Yesin, M. A., Zhukova, V. S., Bliashyna, M. V., & Voloshchuk, V. A. (2018). *Doslidzhennia protsesiv ochyshchennia stichnykh vod vid biohennykh elementiv ta utylizatsii enerhetychnoho potentsialu stichnykh vod: Monohrafiia*. Rivne: Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. (in Ukrainian)
5. Zhmur, N. S. (2003). *Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami*. Moscow: AKVAROS. (in Russian)
6. Shevchenko, O. O., Krupko, V. A., Klintsov, L. M., & Ivanova, I. M. (2014). Modeliuvannia efektyvnosti roboty stantsii biolohichnoho ochyshchennia stichnykh vod. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/10(71), 16-20. (in Ukrainian)
7. 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 the Sciences of the Ukraine*, 5, 55-60. doi: <http://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
8. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2016). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty aerotenkiv-vytyskuvachiv za rakhunok zavysloho i zvazhenoho biotsenozu. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki*, 26, 123-130. (in Ukrainian)
9. Oleynik, A. Y., & Kolpakova, O. A. (2014). Modelling and calculation of bioillogical wastewater treatment to trickling biofilters. *Environmental safety and natural resources*, 16, 68-86. (in Ukrainian)
10. Oleynik, A. Y., & Ayrapetyan, T. S. (2015). Povyshenie effektivnosti raboty aerotenkiv. *Bulletin of Odessa state academy of civil engineering and architecture: collection of scientific works*, 59, 216-224. (in Russian)
11. Biliaiev, M. M., & Lemesh, M. V. (2018). Modeling of biological wastewater treatment on the basis of quick-computing numerical model. *Science and Transport Progress*, 1(73), 15-23. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/124882> (in English)
12. Henze, M., Van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. London: IWA Publishing. (in English)
13. Gebara, F. (1999). Activated sludge biofilm wastewater treatment system. *Water Research*, 33(1), 230-238. doi: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(98\)00210-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(98)00210-3) (in English)
14. Zeng, M., Hu, J., Wang, D., Wang, H., Wang, Y., Wu, N., ... Wang, C. (2017). Improving a compact biofilm reactor to realize efficient nitrogen removal performance: step-feed, intermittent aeration, and immobilization technique. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(7), 6240-6250. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0935-9> (in English)
15. Marzec, M. (2017). Reliability of removal of selected pollutants in different technological solutions of household wastewater treatment plants. *Journal of Water and Land Development*, 35(1), 141-148. doi: <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0078> (in English)
16. Kazadi Mbamba, C., Lindblom, E., Flores-Alsina, X., Tait, S., Anderson, S., Saagi, R., ... Jeppsson, U. (2019). Plant-wide model-based analysis of iron dosage strategies for chemical phosphorus removal in wastewater treatment systems. *Water Research*, 155, 12-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.048> (in English)
17. Revilla, M., Galán, B., & Viguri, J. R. (2017). Analysis of simulation tools and optimization of the operational conditions for biofilm activated sludge industrial process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(12), 2499-2510. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1626-2> (in English)
18. Shamsutdinova, Z. R., & Khafizov, I. I. (2016). Analysis of the aerotanks efficiency in wastewater treatment system. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 4, 245-249. doi: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-245-249> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

19. Shreve, M. J., & Brennan, R. A. (2019). Trace organic contaminant removal in six full-scale integrated fixed-film activated sludge (IFAS) systems treating municipal wastewater. *Water Research*, 151, 318-331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.042> (in English)
20. Balkhair, K. S., Masood, A., Almazroui, M., Rahman, K. U., Bamaga, O. A., Kamis, A. S., ... Hesham, K. (2018). Groundwater share quantification through flood hydrographs simulation using two temporal rainfall distributions. *Desalination and Water Treatment*, 114, 109-119. doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22346> (in English)
21. Chen, H., Liu, S., Yang, F., Xue, Y., & Wang, T. (2009). The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal. *Bioresource Technology*, 100(4), 1548-1554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.003> (in English)
22. Markevich, R. M., Rymovskaya, M. V., Grebenchikova, I. A., Flyurik, E. A., & Dziuba, I. P. (2011). The transformation of nitrogen and phosphorus compounds during biological treatment at the Minsk treatment plant. In S. D. Varfolomeev, G. E. Zaikov, L. P. Krylova (Eds.), *Biotechnology and the Ecology of Big Cities*. Minsk: Nova Science Publishers. (in English)
23. Von Sperling, M. (2007). *Biological wastewater treatment series. Vol. 5: Activated sludge and aerobic biofilm reactors*. London: IWA Publishing. (in English)

Надійшла до редколегії: 22.03.2019

Прийнята до друку: 15.07.2019