

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.021>

УДК 628.35

Т.С. Айрапетян¹, С.В. Телима², О.Я. Олійник²

¹ Харківський національний університет міського господарства ім.О.М.Бекетова

² Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

E-mail: telymase@gmail.com

Моделювання кисневого режиму в біореакторах-аеротенках при очистці стічних вод від органічних забруднень

Представлено членом-кореспондентом НАН України О.Я. Олійником

Наведено математичну модель забезпечення киснем біологічної очистки стічних вод від органічних забруднень в аеротенках зі зваженим і закріпленим біоценозом. При цьому розглядаються особливості моделювання кисневого режиму при очистці в аеротенках-змішувачах і в аеротенках-витискувачах.

Ключові слова: модель, очистка, кисень, органічне забруднення, аеротенк-змішувач, аеротенк-витискувач, біоплівка, активний мул.

В реакторах біологічної очистки стічних вод, зокрема в аеротенках, вилучення органічних забруднень (ОЗ) відбувається в аеробних умовах, тобто при споживанні кисню, необхідного для біоокиснення ОЗ і самоокиснення кліткового матеріалу, а також використовується в інших процесах, які в цей час можуть проходити. Тому моделювання і розробка системи аерації полягає в забезпеченні такого кисневого режиму в реакторі, при якому швидкість процесу біологічної очистки не повинна лімітуватись кількістю кисню, який знаходиться в реакторі. В таких реакторах процеси розчинення і споживання кисню розвиваються одночасно і взаємозв'язано. У відомих біореакторах-аеротенках, за звичайних умов вилучення ОЗ відбувається тільки за рахунок зваженого біоценозу (активного мулу), ці процеси досить ґрунтовно розглянуті в спеціальній літературі.

В даній роботі розглядаються особливості, які мають місце при моделюванні кисневого режиму при аеробній біологічній очистці стічних вод в аеротенках-змішувачах і витискувачах із зваженим і закріпленим біоценозом. Для умов, коли процес біохімічного окиснення в достатній кількості забезпечений киснем, тобто надходження кисню не буде лімітувати кінетику біоокиснення (вилучення) ОЗ в аеротенках із зваженим і закріпленим біоценозом, теоретичне обґрунтування такого процесу наведено в роботі [1].

Якщо врахувати, що забезпечення киснем відбувається з використанням найбільш поширеної на практиці пневматичної (бульбашкової) технології подачі кисню в об'єм аеро-

тенка за рахунок використання повітря, то зазначені особливості використання кисню із зваженим і закріпленим біоценозом, зокрема, полягають в наступному. Якщо зважений біоценоз (частки активного мулу) безпосередньо використовують для окиснення розчинений у стічній воді із бульбашок кисень, то у випадку закріпленого біоценозу (у вигляді утвореної на поверхні матеріалу завантаження біоплівки) потрібно визначити потік розчиненого кисню, який поступає до поверхні біоплівки через пограничний шар рідини і провести кількісну оцінку споживання кисню мікроорганізмами по товщині біоплівки. Вирішення цих питань дозволяє оцінити кількість кисню, необхідного для біоокиснення зваженим і закріпленим біоценозом і, крім того, дозволяє визначити субстрат (кисень чи ОЗ), який буде лімітувати процес окиснення в біоплівці. Дослідженнями встановлено, що при значному (насиченому) облаштуванні в аеротенку (реакторі) елементів завантаження кисень в біоплівку може поступати не тільки із об'єму рідини (розчинений кисень), а і в результаті так званого міжповерхневого переносу (МПП) безпосередньо із прилиплих до поверхні біоплівки бульбашок. Врахування МПП дозволяє в окремих випадках збільшити концентрацію кисню, що надходить в біоплівку, до 20 % [2].

В обох випадках вилучення органічних забруднень зваженим і закріпленим біоценозом в аеротенках для росту і життєдіяльності мікроорганізмів необхідно забезпечити безперебійне постачання кисню і контролювати його споживання в кількості, яка необхідна для підтримки кінетики реакцій з високою швидкістю утилізації ОЗ в даних умовах аеробного процесу. Для оцінки і аналізу кисневого режиму в аеротенках-змішувачах і витискувачах в зазначених умовах у наведеній роботі побудовано загальну математичну модель, яка зводиться до реалізації відповідних рівнянь матеріального балансу, записаних відносно концентрації кисню C .

Так для аеротенка-змішувача маємо

$$W_p \frac{\partial C_a}{\partial t} = Q_a (C_0 - C_a) + W_p \alpha K_C a (\beta C_p - C_a) - F_{\delta_l} N_c - R_{a_c} W_p, \quad (1)$$

а для аеротенка-витискувача

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial C_a}{\partial t} &= D_c \frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_a}{\partial x} + \varepsilon \alpha K_C a (\beta C_p - C_a) - \frac{F_{\delta_l}}{W_p} N_c - R_{a_c}, \\ R_{a_c} &= R_{c_a} + R_{c_c}. \end{aligned} \quad (2)$$

У практичних розрахунках достатньо розглянути рівняння (1)–(2) в стаціонарних умовах і провести оцінку їх членів із врахуванням відомого дифузійного критерія Пекле

$Pe = \frac{vL}{D_c}$ згідно з [1]. Для подальшої реалізації приведемо їх до вигляду:

для аеротенка-змішувача

$$\begin{aligned} C_0 - C_a + \alpha K_C a (\beta C_p - C_a) T_a - R_3 &= 0, \\ R_3 = \frac{F_{\delta_l}}{Q_a} N_c + R_{a_c} T_a, \quad T_a &= \frac{W_p}{Q_a}, \end{aligned} \quad (3)$$

для аеротенка-витискувача

$$-v \frac{\partial C_a}{\partial x} + \varepsilon \alpha K_C a (\beta C_p - C_a) - \lambda_c N_c - R_{ac} = 0, \quad \lambda_c = \frac{F_\delta}{F}. \quad (4)$$

У цих рівняннях в загальному випадку значення потоку кисню, який поступає в біоплівку через її поверхню, визначається за рівнянням:

$$N_c = -D_c \frac{dC}{dz} = (1-\eta) K_C (C_a - C|_{z=0}) + \eta \alpha K_{Cn} (\beta C_p - C|_{z=0}), \quad (5)$$

де η — відношення площі поверхні біоплівки при контакті з бульбашками повітря до загальної площі поверхні біоплівки.

Тобто, у рівнянні (5) враховано можливе додаткове надходження кисню в біоплівку як із об'єму рідини у вигляді розчиненого кисню, так і в результаті так званого МПП безпосередньо із прилиплених до біоплівки бульбашок. Врахування МПП доцільне при досить насиченому елементами завантаженні в аеротенку (реакторі), що має місце, наприклад, в затоплених фільтрах з пісчано-гравійним матеріалом завантаження. В аеротенках із закріпленим біоценозом (біоплівкою) можна обмежитись неврахуванням МПП і деякий можливий позитивний вплив МПП піде в запас розрахунку. В цьому випадку при реалізації моделей необхідно прийняти $\eta = 0$ і враховувати тільки надходження розчиненого кисню із об'єму рідини до біоплівки за рахунок дифузії:

$$N_c = -D_c \frac{\partial C}{\partial z} = K_C (C_a - C|_{z=0}). \quad (6)$$

Відзначимо, що визначення потоку кисню через поверхню біоплівки N_c так і для одержання кількісних оцінок вилучення ОЗ біоплівкою в залежності від їх параметрів, зокрема, який із субстратів (забруднення чи кисень) лімітують процес очистки в біоплівці, одержимо в результаті рішення наступних рівнянь, які характеризують споживання кисню при вилученні ОЗ закріпленим біоценозом (біоплівкою).

В загальному випадку

$$D_c \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - R_c = 0. \quad (7)$$

Таке рішення рівняння (7), яке виконано за граничних умов, а саме: N_c при $z=0$ і $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$ при $z=\delta$ дозволяє визначити зміну концентрації кисню по товщині біоплівки C і головне для подальших розрахунків концентрації кисню на поверхні біоплівки $C|_{z=0} = C_\delta$.

Зазначимо, що в умовах елементів завантаження циліндричної форми, на яких утворюється біоплівка, рівняння для біоплівки буде мати вигляд

$$D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) - R_c = 0, \quad (8)$$

воно вирішується за граничних умов N_c при $r=0$ і $\frac{\partial C}{\partial r} = 0$ при $r=\delta$; $C|_{z=0} = C_\delta$.

В загальному випадку швидкості реакцій описуються такими рівняннями:

$$R_c = \alpha_1 R_L + \alpha_2 b_c \frac{C}{K_{m_c} + C} X, \quad (9)$$

$$R_L = \frac{\mu_m}{Y} \cdot \frac{L}{K_{m_L} + L} \cdot \frac{C}{K_{m_C} + C} X, \quad (10)$$

$$R_{c_a} = \alpha_{1a} R_{a_L} + \alpha_{2a} b_{a_c} \frac{C_a}{K_{m_{a_c}} + C_a} X_a, \quad (11)$$

$$R_{a_L} = \frac{\mu_{ma}}{Y} \frac{L_a}{K_{ma} + L_a} \cdot \frac{C_a}{K_{m_{a_c}} + C_a} X_a. \quad (12)$$

У цих рівняннях і залежностях C , $\tilde{N}_\delta$, C_a , C_0 — відповідно концентрації кисню в біоплівці, на поверхні біоплівки, в аеротенку і в стічній воді на вході в аеротенк; C_p — концентрація насичення (розчинна) кисню повітря в рідині; R_c , R_{a_c} — швидкість реакцій використання кисню в біоплівці і в аеротенку з врахуванням швидкості окиснення виділених речовин при відмиранні мікроорганізмів; W_a , W_p , W_δ — відповідно робочий об'єм аеротенка, об'єм рідини в аеротенку, об'єм елементів встановленого завантаження із закріпленим біоценозом; $F_{\delta l}$, F_δ — відповідно загальна площа поверхні біоплівки в аеротенку (реакторі), площа поверхні біоплівки на одиницю довжини аеротенка (реактора); K_{Ca} , K_{C_n} , K_C — відповідно об'ємний коефіцієнт масопередачі, коефіцієнт МПП кисню в біоплівку, коефіцієнт масопереносу кисню в рідинній плівці. Позначення інших величин, використаних у рівняннях, наведені в роботах [1, 3].

Для оцінки впливу вказаних механізмів забезпечення і споживання кисню при вилученні ОЗ доцільно розглянути граничні випадки роботи аеротенка в системі біологічної очистки стічних вод.

1. У випадку, коли відсутня закріплена біомаса (додаткове завантаження), вилучення ОЗ відбувається тільки зваженим активним мулом і для забезпечення і споживання кисню наведені рівняння розв'язуються при $N_c = 0$. Розрахунок параметрів кисневого режиму в цьому випадку з врахуванням особливостей систем подачі кисню і режиму роботи аеротенка розглядався, зокрема, в роботі [4].

2. У випадку, коли вилучення ОЗ відбувається тільки закріпленою на завантаженні біомасою, тобто при неврахуванні дії зваженого активного мулу, наведені рівняння розв'язуються при $R_{a_c} = 0$.

3. В даному випадку, коли вилучення ОЗ в аеротенку виконується за рахунок зваженого і закріпленого біоценозу при визначенні оптимальних параметрів його роботи, можливі різні варіанти його розташування в об'ємі (в плані) аеротенка і прийнятої необхідної площі поверхні біоплівки $F_{\delta l}$ (елементів завантаження). При цьому елементи завантаження (насадки, сітки тощо) можуть бути розташовані по всьому об'єму аеротенка або більш щільно і компактно тільки на його окремих ділянках. В залежності від технологічної схеми розташування в аеротенку елементів завантаження по довжині (в об'ємі) і в зв'язку з цим прийнятих реакцій в біоплівці і аеротенку, загальні рівняння можна значно спростити. Далі розглянемо деякі можливі технологічні схеми.

а) Елементи завантаження не досить щільно рівномірно розташовані по всій довжині аеротенка. В цьому випадку в наведених рівняннях приймаємо $\eta = 0$, тобто МПП кисню можна не враховувати і з достатнім обґрунтуванням вилучення ОЗ в об'ємі аеротенка відбувається за реакцією нульового порядку, а в біоплівці — за реакцією першого порядку [1].

Так як у рівняннях (9) і (11) $K_{m_c} \ll C$, $K_{m_a} \ll C_a$, то для кисню в практичних розрахунках окиснення відбувається за реакцією нульового порядку в біоплівці і в аеротенку. Таким чином для реакцій маємо

$$R_c = \alpha_1 R_L + \alpha_2 b_c X; \quad (13)$$

$$R_L = k_L L = \frac{\mu_m X}{Y K_{m_L}} L; \quad (14)$$

$$R_{c_a} = \alpha_{1a} R_a + \alpha_{2a} b_{a_c} X_a; \quad (15)$$

$$R_a = \frac{\mu_{ma} X_a}{Y_a}. \quad (16)$$

Визначення значення концентрації ОЗ в біоплівці $L(z)$ і зокрема на її поверхні L_δ наведено в роботі [5]. Розрахунок значення концентрації кисню C в біоплівці і зокрема на її поверхні L_δ відбувається за результатом рішення рівнянь (7), (8) в залежності від конструкції елементів завантаження, на яких формується біоплівка, наприклад, чи у вигляді плоских пластин із отворами, чи сітки із окремих стержнів циліндричної форми. При цьому з деяким наближенням можна прийняти для визначення реакції R_{c_L} по залежності:

$$R_c = \alpha_1 k_L L_{\delta p} + \alpha_2 b_c X, \quad (17)$$

де $L_{\delta p}$ — осереднене значення концентрації ОЗ в біоплівці [5].

б) Елементи завантаження розташовані на початку аеротенка в першій його частині — реакторі 1, в якому вилучення ОЗ відбувається за рахунок закріпленої біомаси, а в другій його частині — реакторі 2, де вилучення ОЗ відбувається зваженою біомасою (активним мулом), тобто реактор 2 працює як звичайний аеротенк.

в) Елементи завантаження розташовані в кінці аеротенка в другій його частині — реакторі 2, в якому вилучення ОЗ відбувається за рахунок закріпленої біомаси, а в першій частині — реакторі 1, вилучення ОЗ відбувається за рахунок зваженої біомаси (активного мулу), тобто реактор 1 працює як звичайний аеротенк.

В залежності від прийнятого гідродинамічного режиму руху рідини реактори 1 і 2 можуть працювати як біореактори-змішувачі і біореактори-витискувачі. Забезпечення киснем вилучення ОЗ в реакторах відбувається згідно з наведеною загальною математичною моделлю з врахуванням прийнятих реакцій утилізації ОЗ і окиснення.

В якості прикладу розрахунку (моделювання) кисневого режиму розглянемо аеротенк-змішувач, в якому у реакторі 1 вилучення ОЗ відбувається зваженим біоценозом (активним мулом), а в реакторі 2 вилучення ОЗ відбувається за рахунок закріпленої біомаси (біоплівки) на встановленому тут завантаженні. Така технологічна схема очистки з практичної точки зору буде доцільною і більш відповідає сучасним вимогам забезпечення киснем ступені очистки, бо в існуючих традиційних аеротенках забезпечити належну, більш високу якість очистки виконати надто складно і неекономічно.

В цьому випадку для визначення концентрації кисню в реакторах 1 і 2 загальне рівняння (3) при $\eta = 0$ можна спростити до розв'язання більш простих рівнянь:

для реактора 1 зі зваженою біомасою (активним мулом)

$$\tilde{C}_0 - \tilde{C}_{a1} + \alpha_1 K_{C1} a (\beta_1 C_{p1} - C_{a1}) T_1 - w_{ac1} T_1 = 0, \quad (18)$$

для реактора 2 з закріпленою біомасою (біоплівкою)

$$\tilde{C}_{a1} - \tilde{C}_{a2} + \alpha_2 K_{C2} a_2 (\beta_2 C_{p2} - C_{a2}) T_2 - \lambda_2 K_{C2} (C_{a2} - C_{\delta 2}) = 0. \quad (19)$$

Тут C_{a1} , C_{a2} — відповідно концентрації кисню на виході із реакторів 1 і 2; $C_{\delta 2}$ — концентрація кисню на поверхні біоплівки в реакторі 2,

$$\lambda_2 = \frac{F_{\delta l_2}}{Q_a}, \quad T_1 = \frac{W_{p1}}{Q_a}, \quad T_2 = \frac{W_{p2}}{Q_a}, \quad (20)$$

T_1 , T_2 — тривалість аерації в реакторах 1, 2; W_{p1} , W_{p2} — об'єми рідини відповідно в реакторах 1 і 2; $F_{\delta l_2}$ — загальна площа поверхні завантаження у реакторі 2 довжиною l_2 .

Згідно з наведеним рівнянням вилучення ОЗ в реакторі 1 відбувається за реакцією нульового порядку, а в реакторі 2 біоплівкою — також за реакцією нульового порядку. Для забезпечення киснем утилізації ОЗ в реакторах реакцію прийнято нульовою. Тоді в цьому випадку маємо:

$$w_{ac1} = \alpha_{1\delta 1} w_{\delta 1} + \alpha_{2\delta 1} b_{ac1} X_{a1}, \quad w_{a1} = \frac{\mu_{ma1} X_{a1}}{Y_{a1}}, \quad C_{\delta 2} = C_{a2} - \frac{w_{c2} \delta_2}{K_{c2}}, \quad (21)$$

$$w_{c2} = \alpha_{1\delta 2} k_{L2} L_{\delta p2} + \alpha_{2\delta 2} b_{ac2} X_2, \quad k_{L2} = \frac{\mu_{m2} X_2}{Y_2 K_{mL2}},$$

де параметри з індексом 1 відносяться до реактора 1, а з індексом 2 — до реактора 2; $L_{\delta p2}$ — осереднене значення концентрації ОЗ в біоплівці товщиною δ_2 [5].

Реалізація наведених моделей дозволяє при заданих геометричних і інших характеристиках оцінити вплив кисневого режиму на процеси очистки в аеротенках за різних умов їх роботи і обґрунтувати економічну і ефективну технологічну систему забезпечення киснем з врахуванням особливостей вилучення ОЗ в аеротенках зі зваженим і закріпленим біоценозом. При цьому можна обґрунтувати критерії, при яких процес біохімічного окиснення в достатній кількості забезпечений киснем, тобто не буде лімітувати кінетику біоокиснення як зваженим так і закріпленим біоценозом.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Олійник О.Я., Айрапетян Т.С. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом. *Допов. Нац. акад. наук України*. 2015. № 5. С. 55—59.
2. Lee K.M., Stensel H.D. Aeration and substrate utilization in a sparged packed bed-biofilm reactor. *JWPCF*. 1986. **58**. Р. 1065—1073.
3. Маслун Г.С. Практичні рекомендації до розрахунку кисневого режиму при очистці стічних вод на затоплених фільтрах. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2013. Вип. 21. С. 123—142.
4. Репин Б.Н., Баженов В.И. Моделирование кислородного режима в аеротенках-вытеснителях. *Водные ресурсы*. 1991. № 1. С. 122—130.
5. Олійник О.Я., Колпакова О.А. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах. *Екологічна безпека та природокористування*. 2014. Вип. 16. С. 68—86.

Надійшло до редакції 28.11.2016

REFERENCES

1. Oliynik, O. Ja. & Airapetian, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (freeflow) and fixed biocenoses *Dopov. Nac. acad. nauk Ukr.* No. 5. 55-60 (in Ukrainian).
2. Lee, K. M., Stensel, H. D. (1986). Aeration and substrate utilization in a sparged packed bed-biofilm reactor. *JWPCF.* 58, pp. 1065-1073.
3. Maslun, G. S. (2013). Practical recommendations for the calculation of the oxygen regime at the purification of waste waters on submerged filters. *Problemy vodopost., vodovidv. ta gidr.,* Iss. 21, pp. 123-142 (in Ukrainian).
4. Repin, B. N., Bazhenov, V. I. (1991). Modeling of the oxygen regime in aerotanks-displacers. *Vodnye resursy,* No. 1, pp. 122-130 (in Russian).
5. Oliynik, O. Ja. & Kolpakova, O. A. (2014). Modeling and calculation of the biological purification of waste waters on drop biofilters. *Ekolog. bezpeka ta pryrodokoryst.,* Iss. 16, pp. 68-86 (in Ukrainian).

Received 28.11.2016

T.S. Айрапетян¹, С.В. Тельма², А.Я. Олейник².

¹ Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова

² Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

E-mail: telymase@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В БИОРЕАКТОРАХ-АЭРОТЕНКАХ ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Приводится математическая модель обеспечения кислородом биологической очистки сточных вод от органических загрязнений в аэротенках со взвешенным и закрепленным биоценозом. При этом рассматриваются особенности моделирования кислородного режима при очистке в аэротенках-смесителях и аэротенках-вытеснителях.

Ключевые слова: модель, очистка, кислород, органическое загрязнение, аэротенк-смеситель, аэротенк-вытеснитель, биопленка, активный ил.

T.S. Airapetian¹, S.V. Telyma², O.Ja. Oliynik²

¹ O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy

² Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: telymase@gmail.com

A MODELING OF THE OXYGEN REGIME IN BIOREACTORS-AEROTANKS AT THE PURIFICATION OF WASTE WATERS FROM ORGANIC POLLUTANTS

A mathematical model of the oxygen supply for the biological purification of waste waters from organic pollutants in aerotanks with suspended and fixed biocenoses is presented. The features of a modeling of the oxygen regime at the purification in the aerotanks-mixers and aerotanks-displacers are considered.

Keywords: model, purification, oxygen, organic pollutant, aerotank-mixer, aerotank-displacer, biofilm, active sludge.