

О.Я. ОЛІЙНИК, член кореспондент НАН України
Інститут гідромеханіки НАН України, Київ
Т.С. АЙРАПЕТЯН, кандидат технічних наук
Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АЕРОТЕНКІВ-ВИТИСКУВАЧІВ ЗА РАХУНОК ЗАВИСЛОГО ТА ЗАКРІПЛЕНОГО БІОЦЕНОЗУ

За допомогою математичного моделювання обґрунтовано підвищення ефективності роботи аеротенка-витискувача за допомогою розташування по всій його довжині елементів завантаження з закріпленим біоценозом.

Ключові слова: математичне моделювання, біологічне очищення, аеротенк, прикріплений біоценоз, активний мул.

С помощью математического моделирования обосновано повышение эффективности работы аэротенка-вытеснителя с помощью расположения по всей его длине элементов загрузки с прикрепленным биоценозом.

Ключевые слова: математическое моделирование, биологическая очистка, аэротенк, прикрепленный биоценоз, активный ил.

By means of mathematical modelling improving the efficiency of the plug flow aeration tank by means of an arrangement on all to its length of elements of loading with fixed biocenose is substantiated.

Keywords: mathematical modeling, biological sewage treatment, aeration tank, fixed biocenosis, activated sludge.

На сьогодні важливою проблемою є підвищення ефективності роботи діючих споруд біологічного очищення стічних вод. Процес біологічного очищення, як правило, здійснюється у спорудах за типом аеротенків, робота яких основана на здатності мікроорганізмів вилучати забруднення зі стічних вод в процесі своєї життєдіяльності [1, 46; 2, 39; 3, 250; 4, 245].

Для підвищення ефективності роботи аеротенків останнім часом при очищенні стічних вод одержали поширення процеси сумісного (одночасного) вилучення органічних забруднень і азоту завислим і закріпленим біоценозом, що мають певні переваги. Для деяких технологічних систем дано опис процесів, що при цьому відбуваються, і на їх основі розроблено методи розрахунку параметрів очистки в аеротенках різних конструкцій [5, 55; 6, 230; 7, 214].

Так, в результаті аналізу існуючих розробок для більш ґрунтового дослідження перебігу аеробного процесу очистки і вивчення особливостей сумісного вилучення органічних забруднень закріпленим біоценозом (біоплівкою), що утворюється на поверхні додаткового завантаження та завислим біоценозом (активним мулом) в об'ємі аеротенка була побудована загальна математична модель у вигляді рівнянь матеріального балансу, що описують зміну концентрацій органічних забруднень в об'ємі аеротенку. Стосовно аеротенка-змішувача рішення цієї задачі розглянуто нами зокрема в роботах [7, 214; 8, 106].

В даній статті розглядаються процеси сумісного вилучення органічних забруднень завислим і закріпленим біоценозом в аеротенках-витискувачах.

Для вивчення впливу наведених механізмів вилучення органічних забруднень, необхідно також розглянути можливі випадки роботи аеротенка-витискувача з розташуванням системи завантаження в об'ємі (площі) аеротенка- витискувача.

Від характеру розташування елементів завантаження – по всьому об'єму (довжині) аеротенка чи тільки на окремих його ділянках – залежать ефект очистки та деякі особливості технічного і експлуатаційного характеру роботи аеротенка. В даній статті розглядається схема роботи аеротенка-витискувача з закріпленим і завислим біоценозом, коли елементи завантаження (насадки, сітки і т.п.) рівномірно розташовані по всій довжині / аеротенка (рис. 1).

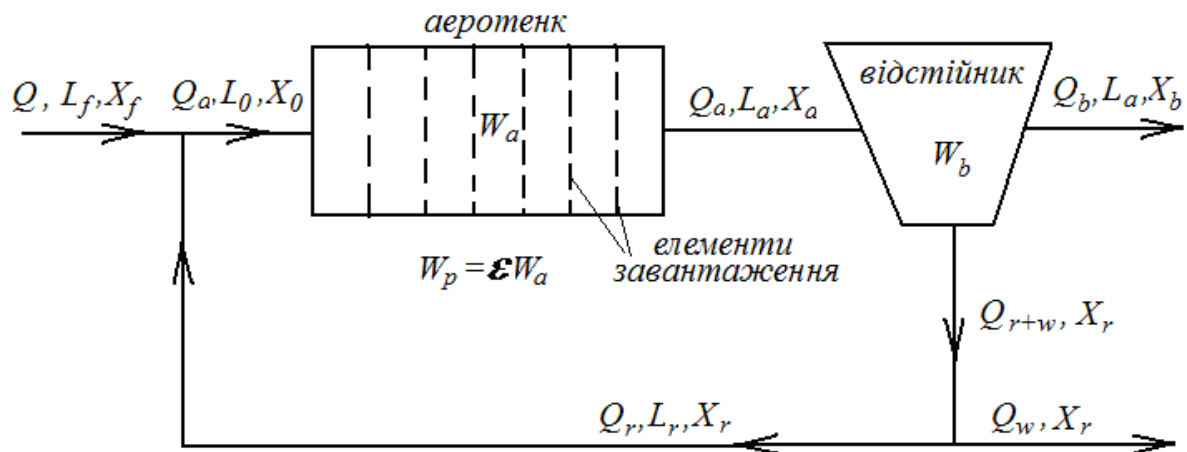


Рис. 1. Балансова схема аеротенка-витискувача з закріпленим біоценозом, розташованим по всій довжині

В цьому випадку вилучення органічних забруднень (ОЗ) відбувається закріпленим біоценозом загальною площею поверхні $F_{\delta l} = F_{\delta} l$ і завислим біоценозом (активним мулом) в об'ємі рідини $W_p = \varepsilon W_a$, $W_a = F_a l$ – загальний

об'єм аеротенка, $\varepsilon = 1 - \frac{W_{\delta}}{W_a}$, W_{δ} – об'єм завантаження.

Для визначення зміни концентрації ОЗ L_a вздовж потоку x згідно [5, 58] маємо для ідеального аеротенка-витискувача рівняння у вигляді

$$-v \frac{\partial L_a}{\partial x} - R = 0, \quad v = \frac{Q_a}{F_a}, \quad (1)$$

в якому швидкість загальної реакції утилізації ОЗ закріпленим біоценозом у вигляді біоплівки, утвореної на завантаженні, і завислим біоценозом у вигляді активного мулу в рідині аеротенка має вигляд:

$$R = \lambda_2 (L_a - L|_{z=0}) + R_a - \varepsilon R_c, \quad (2)$$

$$\lambda_2 = \frac{F_\delta}{F_a} K_L, \quad \varepsilon = \frac{W_p}{W_a}, \quad (3)$$

F_δ – площа поверхні завантаження (біоплівки) на одиницю довжини аеротенка l , K_L – коефіцієнт масо переносу в рідинній плівці.

Для вирішення рівняння (1) необхідно знайти концентрацію на поверхні біоплівки $L|_{z=0} = L_\delta$ в залежності від прийнятого рівняння реакції R_L вилучення ОЗ в біоплівці і в аеротенку R_a , а також відмирання (самоочистки) мулу R_c .

Значення концентрації на поверхні біоплівки $L|_{z=0} = L_\delta$ знаходимо в результаті рішення наступних рівнянь, які описують зміну концентрацій L в межах біоплівки товщиною δ при вилученні ОЗ закріпленим біоценозом:

а) в загальному випадку

$$D_L \frac{\partial^2 L}{\partial z^2} - R_L = 0, \quad (4)$$

б) в умовах елементів завантаження циліндричної форми

$$D_L \left(\frac{\partial^2 L}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial L}{\partial r} \right) - R_L = 0. \quad (5)$$

Особливість цих рішень полягає в тому, що при визначенні концентрації L_δ на поверхні біоплівки задається значення потоку $N = K_L (L_a - L_\delta)$, який поступає із об'єму аеротенка концентрацією L_a через рідинну плівку (пограничний шар) в біоплівку.

Розглянемо випадок, коли вилучення ОЗ в біоплівці і в аеротенку (об'ємі W_p) відбувається за реакцією першого порядку

$$R_L = kL, \quad R_a = k_a L_a. \quad (6)$$

Тоді, зокрема в результаті рішення рівняння (6), після деяких перетворень для визначення концентрації L_δ одержимо [9, 68]

$$L_\delta = AL_a, \quad (7)$$

де для визначення параметра A маємо рівняння

$$A = \frac{1 + e^{-\varphi}}{(1 + e^{-\varphi}) + \lambda(1 - e^{-\varphi})}, \quad \varphi = 2\sqrt{\alpha}, \quad \lambda = \frac{\sqrt{kD_L}}{K_L}, \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{k\delta}{D_L}, \quad k = \frac{\mu_m X}{K_{mL} Y}.$$

Для визначення параметра A можна скористатись розрахунковим графіком $A = f(\varphi, \lambda)$, наведеним на рис. 2 [9, 72].

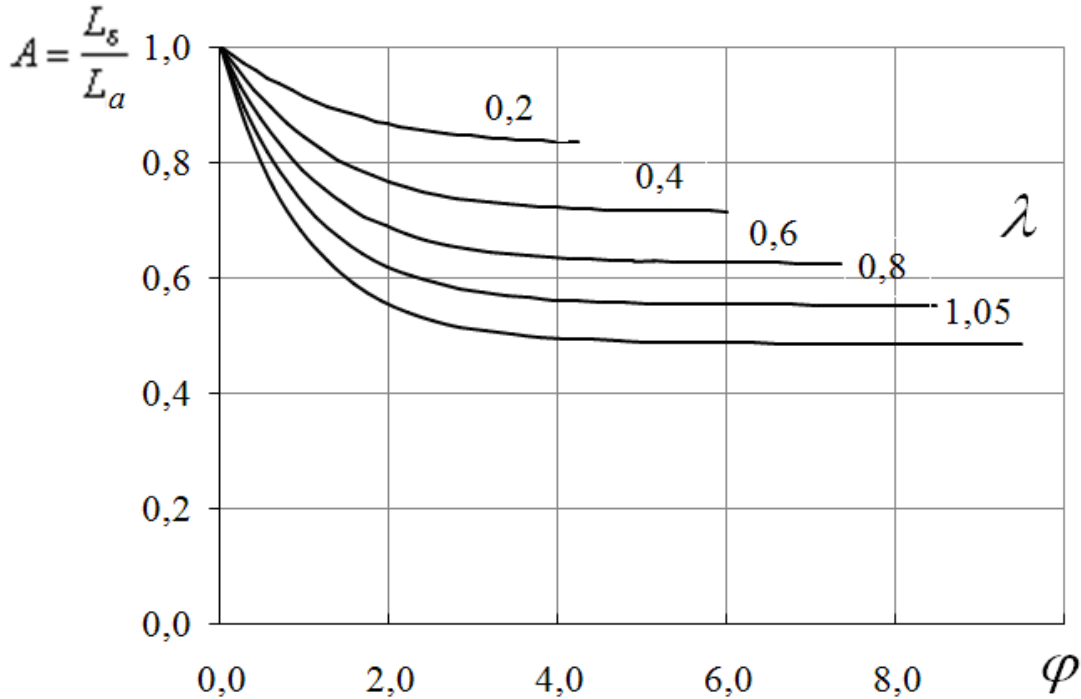


Рис. 2. Графік залежності $A = f(\varphi, \lambda)$

Для випадку елементів завантаження циліндричної форми значення параметра A в формулі (7) було одержано в результаті рішення рівняння (5), яке наведено в роботі [10, 85].

Таким чином, після деяких перетворень з врахуванням реакцій (6) і (7), а також приймаючи $R_c = 0$, для визначення концентрації L_a по довжині аеротенка одержимо наступне рівняння (9), яке запишемо у вигляді:

$$-\frac{\partial L_a}{\partial x} - L_a(A_* + k_{a*}) = 0, \quad (9)$$

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

В результаті рішення рівняння (9) при граничній умові на вході в аеротенк $x = 0$, $L_a = L_0$ одержимо залежність для визначення зміни концентрації L_a по довжині аеротенка

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

де $\tilde{x} = (A_* + k_{a*})x = B\bar{x}$, $\bar{x} = \frac{x}{l}$, $B = l(A_* + k_{a*})$.

На виході із аеротенка при $x = l$, $\bar{x} = 1$ маємо

$$L_a(l) = L_0 e^{-\tilde{l}} = L_0 e^{-B}, \quad \tilde{l} = B. \quad (11)$$

Нагадаємо, що одержані рішення виконані при роботі аеротенка в стаціонарних умовах, які наступають досить швидко, а саме десь при $t > \frac{\varepsilon x}{\nu}$.

Розглянемо можливо найбільш поширений на практиці випадок, коли вилучення ОЗ в біоплівці і в об'ємі рідини в аеротенку W_p відбувається за більш точною реакцією згідно відомого рівняння Моно, а саме за рівняннями в біоплівці R_L і в об'ємі рідини аеротенка R_a

$$R_L = \frac{\mu_m L}{Y(K_{mL} + L)} X, \quad R_a = \frac{\mu_{ma} L_a}{Y_a(K_{ma} + L_a)} X_a. \quad (12)$$

В цьому випадку обмежимося розробкою метода розрахунку концентрації $L_a(l)$ на виході із аеротенка. Для цього будемо використовувати також залежність (12), зробивши в ній поступні зміни і перетворення.

Так в рівнянні (6) для біоплівки замість коефіцієнта k будемо приймати коефіцієнт k_L , який визначається за формулою

$$k_L = \frac{\rho_m / L_0}{\beta_L + L/L_0}, \quad \beta_L = \frac{K_{mL}}{L_0}, \quad \rho_m = \frac{\mu_m X}{Y}, \quad (13)$$

тобто загальна реакція R_L має вигляд:

$$R_L = \rho_m \frac{L}{K_{mL} + L} = k_L L. \quad (14)$$

Далі в одержаних рішеннях приймаємо скорегований за формулою (14) коефіцієнт k_L з використаними розробленої ітераційної схеми розрахунку, яка наведена в роботі [10, 85].

Послідовність виконання зазначеного розрахунку полягає в наступному.

1) В якості початкового (нульового) наближення маємо $L_\delta^0 = 0$, що фактично відповідає значенню $k_L = k$ при реакції першого порядку.

2) Відповідно залежності (13) рахуємо значення коефіцієнта

$$k_L^{(0)} = \frac{\bar{\rho}_m}{\beta_L + \bar{L}_\delta^{(0)}}, \quad \bar{\rho}_m = \frac{\rho_m}{L_0}, \quad \bar{L}_\delta^{(0)} = \frac{L_\delta^{(0)}}{L_0}, \quad (15)$$

3) Для одержаного $k_L^{(0)}$ по формулам одержаних для реакції першого порядку визначаємо пошукові значення $L_\delta^{(1)}$ і $L_a^{(1)}(l)$. При цьому концентрація $L_a^{(1)}(l)$ визначається за формулою (11), тобто з врахуванням вилучення ОЗ також завислим біоценозом.

4) Відповідно залежності (13) рахуємо значення коефіцієнта k_L в першому наближенні

$$k_L^{(1)} = \frac{\bar{\rho}_m}{\beta_L + \bar{L}_\delta^{(1)}}. \quad (16)$$

5) Для одержаного значення k_L по формулам (14) і (11) знаходимо значення L_δ і $L_a(l)$ в другому наближенні, тобто $L_\delta^{(2)}$ і $L_a^{(2)}(l)$.

6) Таким чином, ітераційний процес продовжується до тих пір, поки не буде досягнута достатня точність розрахунку.

Запропоновану методику розрахунку можна використати і у випадку, коли вилучення ОЗ в об'ємі рідини аеротенка відбувається також за реакцією R_a згідно рівняння Моно. В цьому випадку рівняння (12) представимо у вигляді

$$R_a = \rho_{ma} \frac{L_a}{K_{ma} + L_a} = k_a L_a, \quad (17)$$

де

$$k_a = \frac{\rho_{ma}/L_0}{\beta_a + L_a/L_0}, \quad \beta_a = \frac{K_{ma}}{L_0}, \quad \rho_{ma} = \frac{\mu_{ma} X_a}{Y_a}. \quad (18)$$

Якщо обмежитись рішенням задачі по знаходженні концентрації на виході із аеротенка $L_a(l)$, то в залежностях приймаємо $x = 0$, $L_a = L_a(l)$.

Послідовність виконання розрахунку залишається попередньою, при цьому значення $L_a(l)$ знаходимо за загальним рівнянням (11), тобто з врахуванням вилучення ОЗ закріпленим біоценозом. Зазначимо, що розрахунки за запропонованою ітераційною схемою по кожній реакції R_L і R_a припиняються при досягненні заданої точності розрахунку. Виконані приклади розрахунку по запропонованій ітераційній схемі проведені при вилученні ОЗ біоплівкою в затоплених і краплинних біофільтрах показали, що в розрахунках, як правило, можна обмежитись виконанням 2-3 наближень.

В технологічній схемі, яка розглядається (рис. 1), можливий також випадок, коли вилучення ОЗ закріпленим і завислим біоценозом відбуваються на основі різних кінетичних реакцій R , наприклад завислим біоценозом (активним мулом) за реакцією згідно рівняння Моно, і закріпленим біоценозом (біоплівкою) за реакцією першого порядку чи навпаки. Розрахунок концентрації $L_a(l)$ на виході із аеротенка в цьому випадку також відбувається за загальним рівнянням (11), в якому ітераційний процес використовується при розрахунку реакції за рівнянням Моно в об'ємі рідини аеротенка. При розрахунку реакцій першого порядку необхідно після кожної ітерації враховувати уточнене зниження $L_a(l)$. В подальшому передбачається проведення прикладів розрахунку за зазначеною методикою.

Проведений в роботі [10, 85] аналіз показав, що в практичних задачах при відношенні $\eta = \frac{K_m}{L_p} > 2$ можна приймати в розрахунках кінетику першого порядку, а при $\eta < 0.25$ кінетику нульового порядку, де L_p – розрахована концентрація, яка наближено приймається для біоплівки $L_p = L_\delta$, для реакції в аеротенку $L_p = L_0$. Таким чином, при розрахунках кінетики реакцій в межах $0.25 < \eta < 2$ необхідно використовувати рівняння окислення Моно.

Розглянемо приклад розрахунку концентрації $L_a(l)$ на виході із аеротенка-витискувача з закріпленим біоценозом, в якому вилучення O_3 у вільному об'ємі та біоплівці відбуваються за реакціями першого порядку. Для цього залежність (11) перепишемо у вигляді

$$\frac{L_a(l)}{L_0} = e^{-(B_L + B_a)}, \quad (19)$$

де $B_L = l \cdot A^*$, $B_a = l \cdot k_a^*$.

На основі залежності (19) побудовано розрахунковий графік (рис. 3).

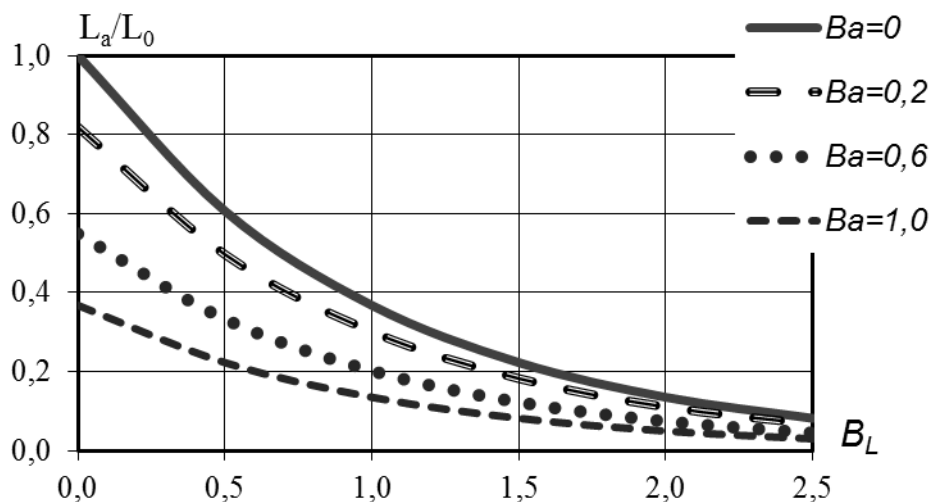


Рис. 3. Графік залежності $\frac{L_a(l)}{L_0} = f(B_L, B_a)$

Результати розрахунків, які представлені на рис.3, показують, що завантаження з закріпленим біоценозом дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи аеротенка-витискувача особливо при $B_L < 1$.

В цілому на підставі аналізу приведених вище результатів досліджень можна зробити висновок про доцільність впровадження в аеротенки додаткових систем очистки з закріпленим біоценозом.

Список літератури

1. Олійник О.Я., Зябліков С.В. Особливості моделювання очистки стічних вод в системі аеротенк-відстійник-регенератор // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Наук. техн. зб. – К.:КНУБА, 2005. – Вип.4. – С.46-53.
2. Вавилин В.А., Васильев В.В. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод. – М.: Наука, 1979. – 116 с.
3. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведения и очистка сточных вод. – М.: АСВ, 2004. – 704 с.
4. Henze M., M. Van Loosdrecht M.E., Ekama G.A., Brdjanovic D. Biological Wastewater Treatment. – IWA Publishing: London, 2008. – 511 p.
5. Олійник О.Я., Айрапетян Т.С. Моделювання очистки стічних вод в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом // Доповіді НАНУ. – 2015. – №5. – С.55-60.
6. Gebara F. Activated sludge biofilm was tewater treatment system // Was. Res. – 1999. – Vol.13, №1. – P.230-238.
7. Олейник А.Я., Айрапетян Т.С. Повышение эффективности работы аэротенков / Вісник ОДАБ та А. – Одеса: Optimum, 2015. – Вип. 59. – С.214-222.
8. Олійник О.Я., Айрапетян Т.С. Підвищення ефективності біологічного очищення стічних вод в аеротенках за рахунок зваженого і закріпленого біоценозу // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – 2015. – № 3 (81). – С.106-109.
9. Олійник О.Я., Колпакова О.А. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах // Екологічна безпека та природокористування. – К., 2014. – Вип. 16. – С.68-86.
10. Олейник А.Я., Василенко Т.В., Рибаченко С.А., Хамад-Ихаб Ахмад Моделирование процессов доочистки хозяйственных сточных вод на фильтрах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Наук. техн. зб. – К.: КНУБА, 2006. – Вип. 7. – С.85-97.

Надійшло до редакції 29.04.2016