

Олійник О.Я.<sup>1</sup>, Айрапетян Т.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут гідромеханіки НАН України (вул. Желебова, 8/4, м. Київ, 03057, Україна; e-mail: [kurganska@ukr.net](mailto:kurganska@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-9110-1709>)

<sup>2</sup> Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: [tamara78kh2008@rambler.ru](mailto:tamara78kh2008@rambler.ru), <http://orcid.org/0000-0002-8834-5622>)

## РОЗРАХУНОК КИСНЕВОГО РЕЖИМУ ПРИ БІОЛОГІЧНОМУ ОЧИЩЕННІ СТІЧНИХ ВОД В АЕРОТЕНКАХ-ЗМІШУВАЧАХ З ЗАКРІПЛЕНИМ І ЗВАЖЕНИМ БІОЦЕНОЗОМ

Для аеротенка-змішувача з закріпленими та зваженим біоценозом представлена дворівнева математична модель процесу біологічного очищення з урахуванням кисневого режиму. Вважається, що окислення органічних забруднень та споживання кисню відбувається за реакцією або нульового або першого порядку. Це дає можливість спростити вихідні рівняння та одержати аналітичний розв'язок, який можна застосовувати для інженерного розрахунку. Також оцінено вплив кисневого режиму на ефективність видалення забруднюючих речовин.

**Ключові слова:** очищення стічної води, кисневий режим, аеротенк-змішувач, активний мул, закріплена біомаса (біоплівка), концентрації забруднень і кисню, вихідні параметри, розрахунок, оцінка, аналіз.

**Вступ.** Як зазначалось і аналізувалось в роботах [1-6] ефективність вилучення органічних забруднень (ОЗ) в аеротенках біологічними методами можна значно підвищити, якщо поряд зі зваженим біоценозом (активним мулом) забезпечити влаштування в об'ємі аеротенка споруди додаткового завантаження (сіток, насадок і т.і.) на поверхні яких утворюється біоплівка з високою концентрацією мікроорганізмів. Так як в цьому випадку вилучення ОЗ відбувається мікроорганізмами в аеробних умовах, то для їх росту і життєдіяльності необхідно забезпечення безперебійного постачання кисню [7-10]. В цьому випадку в системах аерації необхідно забезпечити такий кисневий режим в реакторі, при якому швидкість біологічної очистки не повинна лімітуватись кількістю кисню, який знаходиться в реакторі. Для оцінки і аналізу кисневого режиму в аеротенках-змішувачах і аеротенках-витискувачах з врахуванням особливостей подачі і споживання кисню зваженим і закріпленим біоценозом побудовані математичні моделі, які зводяться до реалізації відповідних рівнянь матеріального балансу записаних відносно концентрацій кисню [11-13]. В результаті реалізації цих моделей запропоновані методи розрахунку параметрів кисневого режиму для різних технологічних схем в залежності від

розташування елементів завантаження в об'ємі (площі) аеротенка, наявності чи відсутності його на окремих ділянках аеротенка [12]. Нагадаємо, що в залежності від прийнятих реакцій в біоплівці і аеротенку при вилученні ОЗ і окисленні процесу, розрахунки полягають у визначенні зміни значень концентрацій ОЗ L і кисню С в біоплівці зокрема на зовнішній і внутрішній поверхні біоплівки і в аеротенку  $L_a$  і  $C_a$ . При цьому в розрахунках необхідно врахувати конструктивні елементи завантаження, на яких формується біоплівка, наприклад, чи у вигляді плоских пластин з отворами чи сітки із окремих стержнів циліндричної форми. Виконані розрахунки дозволяють встановити, який із субстратів (ОЗ чи  $O_2$ ) буде лімітувати процес очищення, що являється основним результатом досліджень з використанням біоплівкових моделей.

**Мета** – отримати спрощену математичну модель біологічного очищення в аеротенку-змішувачі з закріпленим та зваженим біоценозом і за допомогою неї оцінити лімітуючий вплив кисневого режиму.

**Основна частина.** В статті розглянута найбільш доцільна з практичної точки зору технологічна схема очищення, яка відповідає сучасним вимогам забезпечення високого ступеня очищення (рис.1) [10,12].

В цьому випадку аеротенк-змішувач складається із двох частин (реакторів 1 і 2), при цьому в реакторі 1 вилучення ОЗ відбувається за рахунок зваженого біоценозу (активного мулу), тобто працює як звичайний аеротенк-змішувач, а в реакторі 2 вилучення ОЗ відбувається за рахунок закріпленого біоценозу (біоплівкою) на встановленому тут завантаженні. Зазначимо, що в обох частинах аеротенка реактори працюють як реактори-змішувачі. Так як в реакторі 1 довжиною  $l_1$  безпосередньо поступає стічна вода, яка має значну початкову концентрацію, то буде доцільним вилучення ОЗ в реакторі 1 активним мулом прийняти за реакцією нульового порядку, а в реакторі 2 довжиною  $l_2$ , в якому фактично відбувається доочистка стічної води, за реакцією першого порядку. Тим більше, що в існуючих традиційних аеротенках доочистку виконати надто складно і неекономічно. Так як в загальних рівняннях швидкостей реакцій [10,13] маємо  $K_{m_c} \ll C$ ,  $K_{m_a} \ll C_a$ , то для кисню в практичних розрахунках можна прийняти, що окислення відбувається за реакцією нульового порядку в біоплівці і в аеротенку. Таким чином, для реакцій, приймаючи в загальних рівняннях  $\gamma_c = \frac{C}{K_{m_c} + C} \approx 1$ , маємо

$$R_c = \alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2 X, \quad (1)$$

$$R_L = k_L L = \frac{\mu_{m_L} X}{Y K_{m_L}} L, \quad (2)$$

$$R_{C_a} = \alpha_{1a} R_{1a} + \alpha_{2a} b_{ca} X_a, \quad (3)$$

$$R_a = \frac{\mu_{m_a} X_a}{Y_a}. \quad (4)$$

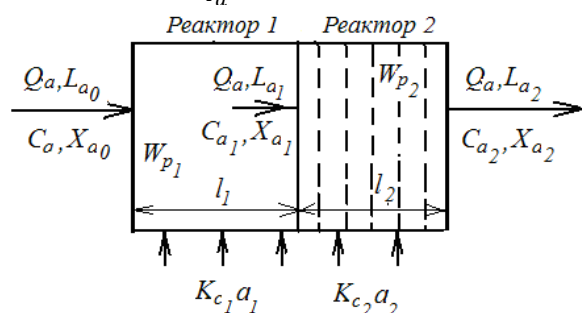


Рис.1. Технологічна схема аеротенка-змішувача з розташованим в реакторі 2 закріпленим біоценозом

В цьому випадку для визначення концентрації кисню в реакторах 1 і 2 загальне

рівняння в умовах неврахування міжповерхневого перекосу ( $\eta = 0$ ) можна спростити до розв'язання більш простих рівнянь [12]:

для реактора 1 зі зваженою біомасою (активним мулом)

$$C_0 - C_{a_1} + \alpha_{c_1} K_{c_1} a_1 (\beta_{p_1} C_{p_1} - C_{a_1}) T_1 - w_{ac_1} T_1 = 0, \quad (5)$$

для реактора 2 з закріпленою біомасою (біоплівкою)

$$C_{a_1} - C_{a_2} + \alpha_{c_2} K_{c_2} a_2 (\beta_{p_2} C_{p_2} - C_{a_2}) T_2 - \lambda_2 K_{c\delta_2} (C_{a_2} - C_\delta) = 0, \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \frac{F_{\delta l_2}}{Q_a} = \frac{F_{\delta l_2}}{W_{p_2}}, \quad T_1 = \frac{W_{p_1}}{Q_a},$$

$$T_2 = \frac{W_{p_2}}{Q_a}, \quad W_{p_2} = \varepsilon_2 W_{a_2}. \quad (7)$$

Тут  $C_{a_1}$ ,  $C_{a_2}$  - відповідно концентрації кисню на виході із реактора 1 і 2,  $W_{p_1}$ ,  $W_{p_2}$  - об'єми рідини відповідно в реакторах 1 і 2,  $F_{\delta l_2}$  - загальна площа поверхні завантаження біоплівкою в реакторі 2 довжиною  $l_2$  і товщиною біоплівки  $\delta$ ,  $K_{c\delta_2}$  - коефіцієнт масопереносу кисню в рідинній плівці. Зазначимо, що при необхідності відомі процеси розпаду (відмирання) біомаси і гідролізу нерозчинених органічних часток можуть бути враховані в наведених рівняннях [12-15].

Згідно [12] для прийнятих кінетик реакцій ОЗ вилучення і забезпечення цього процесу киснем в реакторах 1 і 2 в наведених рівняннях (5) і (6) маємо

$$C_{\delta z=0} = C_{a_2} - \frac{w_{c_2} \delta}{K_{c\delta_2}}, \quad (8)$$

$$w_{ac_1} = \alpha_{1a_1} w_{a_1} + \alpha_{2a_1} b_{c_{1a}} X_{a_1},$$

$$w_{a_1} = \frac{\mu_{m_{a_1}} X_{a_1}}{Y_{a_1}},$$

$$w_{c_2} = \alpha_{1_2} k_{L_2} L_{\delta p_2} + \alpha_{2_2} b_{c_2} X_2,$$

$$k_{L_2} = \frac{\mu_{m_2} X_2}{Y_2 K_{m_2}},$$

де параметри з індексом 1 відносяться до реактора 1, а з індексом 2 – до реактора 2.

В результаті проведеного аналізу при вилученні ОЗ закріпленою біомасою в реакції першого порядку в реакторі 2, тут при реакції кисневого режиму нульового порядку замість змінної концентрації в біоплівці  $L_2$  з достатнім обґрунтуванням в якості розрахункової прийнято її осереднене значення  $L_{\delta p_2}$  згідно наступної залежності

$$L_{\delta p_2} = 0,5(L_{\delta z=0} + L_{\delta z=\delta}), \quad (9)$$

де  $L_{\delta z=0}$  - значення концентрації ОЗ на зовнішній поверхні біоплівки ( $z = 0$ ),  $L_{\delta z=\delta}$  - значення концентрації на внутрішній поверхні біоплівки ( $z = \delta$ ). Для визначення цих концентрацій в роботі [10,16] запропоновані залежності

$$L_{\delta z=0} = L_{\delta_2} = A_2 L_{a_2}, \quad (10)$$

$$L_{\delta z=\delta} = \frac{1}{ch\sqrt{\alpha_{L_2}}} L_{\delta_2} = 0,$$

$$\alpha_{L_2} = \frac{k_{L_2} \delta}{D_{L_2}}. \quad (11)$$

Таким чином, значення розрахункової концентрації згідно (9) буде визначатись за формулою

$$L_{\delta p} = 0,5 L_{\delta z=0} \left( 1 + \frac{1}{ch\sqrt{\alpha_{L_2}}} \right),$$

$$\lambda_2 = \frac{\sqrt{k_{L_2} D_{L_2}}}{K_{L_2}}. \quad (12)$$

Для визначення параметра  $A_2 = f(\alpha_{L_2}, \lambda_2)$  в роботах [12,16] наведені розрахункові залежності і графіки. Зазначимо, що згідно [14,17] в якості концентрації  $L_{a_2}$  в реакторі 2 в цьому випадку приймається концентрація на виході із реактора 2 (рис.1).

Нагадаємо, що для визначення концентрацій ОЗ в біоплівці  $L_{\delta z=0}$ ,  $L_{\delta z=\delta}$  і взагалі зміни концентрацій  $L_2$  по товщині біоплівки на основі використання реакцій нульового і першого порядків розглянуто в роботах [7,10]. Для визначення зміни концентрації кисню  $C_2$  по товщині біоплівки згідно реакції  $R_C$  (1) зокрема концентрації  $C_{\delta z=\delta}$  розглянемо рішення наступного рівняння

$$D_{C_2} \frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} - w_{C_2} = 0. \quad (13)$$

Рішення рівняння (13) для реакції нульового порядку  $R_{C_2} = w_{C_2}$  розглянемо для двох можливих наступних випадках з різними граничними умовами. У першому випадку, який відповідає повному проникненню кисню в біоплівку ( $\beta_C \geq 1$ ) рішення рівняння виконується при граничних відповідно умовах

при  $z = 0$ ,

$$N_{C_2} = -D_{C_2} \frac{\partial C_2}{\partial z} = K_{C_{\delta_2}} (C_{a_2} - C_{\delta z=0}), \quad (14)$$

$$\text{при } z = \delta, \quad \frac{\partial C_2}{\partial z} = 0. \quad (15)$$

В результаті цього рішення одержимо наступну залежність для визначення концентрації  $C_2$  в біоплівці

$$C_2(z) = C_{a_2} - \frac{w_{C_2}}{D_{C_2}} \left( \frac{\delta D_{C_2}}{K_{C_{\delta_2}}} + \delta z - \frac{z^2}{2} \right). \quad (16)$$

При  $z = 0$  одержимо залежність (8) для визначення значення концентрації  $C_{\delta z=0}$  на зовнішній поверхні біоплівки, а при  $z = \delta$  залежність для визначення концентрації  $C_{\delta z=\delta}$  на внутрішній поверхні біоплівки

$$C_{\delta z=\delta} = C_{a_2} - \frac{w_{C_2} \delta}{D_{C_2}} \left( \frac{D_{C_2}}{K_{C_{\delta_2}}} + \frac{\delta}{2} \right) = C_{\delta z=0} - \frac{w_{C_2} \delta^2}{2D_{C_2}}. \quad (17)$$

Рівняння (16) можна записати у вигляді

$$C_2(z) = C_{\delta z=0} - \left( \delta z - \frac{z^2}{2} \right) \frac{w_{C_2}}{D_{C_2}}, \quad (18)$$

а для послідуочого аналізу рівняння (16) запишемо у вигляді

$$C_2(z) = C_{\delta z=0} \left[ 1 - \left( \frac{2z}{\delta \beta_c} - \frac{z^2}{\delta^2 \beta_c^2} \right) \right], \quad (19)$$

де  $\beta_c = \sqrt{\frac{2C_{\delta z=0} D_{C_2}}{w_{C_2} \delta^2}}$  або

$$\beta_c \delta = \sqrt{\frac{2C_{\delta z=0} D_{C_2}}{w_{C_2}}}. \quad (20)$$

У другому випадку, який відповідає частковому проникненню кисню в біоплівку ( $\beta_c < 1$ ) рішення рівняння (13) виконується за умови  $C_2 = 0$  на границі  $z = \delta$  замість  $\frac{\partial C_2}{\partial z} = 0$  в попередньому випадку

$$C_2(z) = C_{\delta z=0} \left[ 1 - \frac{2z}{\beta_c \delta} - \frac{z^2}{(\beta_c \delta)^2} \right], \quad (21)$$

$$C_{2z=0} = \frac{C_{a_2} \frac{w_{C_2} \delta}{K_{C_{\delta_2}}}}{\left( 1 - \frac{D_{C_2}}{\delta K_{C_{\delta_2}}} \right)}. \quad (22)$$

Якщо відношення  $\frac{D_{C_2}}{\delta K_{C_{\delta_2}}} \ll 1$  то в обох випадках значення  $\beta_c$  для визначення концентрації  $C_{\delta z=0}$  можна знаходити по залежності (8).

У першому випадку ( $\beta < 1$ ) потік кисню в біоплівку згідно рівняння (14) буде складати

$$N_{C_2} = w_{C_2} \delta \quad (23)$$

а в другому випадку ( $\beta < 1$ ) маємо

$$N_{C_2} = \beta_C \delta w_{C_2} \quad (24)$$

Так як згідно (20) параметр  $\beta_c$  залежить від концентрації  $C_{\delta z=0}$ , то залежність (24) можна записати у вигляді

$$N_{C_2} = \sqrt{2D_{C_2}w_{C_2}} \cdot \sqrt{C_{\delta z=0}} \quad (25)$$

Таким чином, відношення потоків для кисню для реакції нульового порядку для частково проникної біоплівки (24) і для повністю проникної біоплівки (23) визначається через параметр  $\beta_c$ . На рис.2 в якості прикладу для визначення зміни концентрації кисню по товщині біоплівки для різних значень  $\beta_c$  наведено графік  $\frac{C_2}{C_{\delta z=0}} = f(\bar{z}, \beta_c)$ .

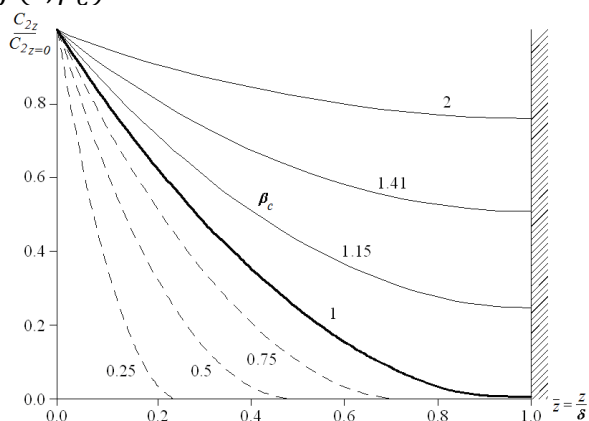


Рис. 2. Профілі концентрації  $C_{2\delta z}$  при реакції нульового порядку в біоплівці для різних значень  $\beta_c < 1$  і  $\beta_c > 1$

Згідно (17) параметр  $\beta_c$  в загальному випадку буде залежить від концентрації  $C_{a_2}$  і це потрібно мати на увазі. З рис. 2 також слідує, що перехід від частково проникної біоплівки до повністю проникної біоплівки відбувається при  $\beta_c \approx 1$ , то наближено відповідає значенню концентрації на поверхні біоплівки

$$C_{\delta z=0} \min \frac{\delta^2 w_{C_2}}{2D_{C_2}} \quad (26)$$

В даному випадку прийнято, що вилучення  $O_3$  в реакторі 2 відбувається тільки за рахунок закріпленої біомаси (біоплівкою), але можливе деяке вилучення  $O_3$  за рахунок активного мулу, який знаходиться в об'ємі  $W_{P_2}$  реактора 2 не враховується, що піде в запас розрахунку. Проте при необхідності можна врахувати це додаткове вилучення  $O_3$  в рівнянні (6) додатковим членом  $w_{ac_2} T_2$ .

Прийнявши, що додаткове вилучення  $O_3$  відбувається за реакцією першого порядку при забезпеченні кисню нульового порядку маємо

$$w_{ac_2} = \alpha_{1a_2} k_{a_2} + \alpha_{2a_2} b_{a_2} X_{a_2}, \quad (27)$$

$$k_{a_2} = \frac{\mu_{ma_2} L_{a_2}}{Y_{a_2} K_{Lm_2}} X_{a_2}. \quad (28)$$

Таким чином, в даній роботі представлена математична модель біологічного очищення в аеротенках-змішувачах з закріпленим та зваженим біоценозом.

**Висновки.** Наведена математична модель дозволяє отримати інженерну методику розрахунку процесу біологічного очищення в аеротенках-змішувачах з закріпленим та зваженим біоценозом з урахуванням кисневого режиму. Показана ефективність використання в об'ємі аеротенка додаткового завантаження, на поверхні якого утворюється біоплівка зі значною концентрацією мікроорганізмів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Биологическая очистка сточных вод (теория и практика) // [Н.И. Куликов, М.Г. Зубов, Е.Н. Куликова и др.]. – Сочи: Издательство «Дория», 2013. – 289 с.
2. Грицина О.Д. 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: НУВГП, 2018. – 267 с.
3. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенком / Н.С. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
4. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення: Навчальний посібник / [О.А. Василенко, П.О. Грабовський, Г.М. Ларкіна та ін.]. – К.: ІВНВП «Укреліотех», 2010. – 272 с.
5. Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – М.: АСВ, 2004. – 704 с.
6. Markos von Spelling. Activate Sludge and Aerobic Biofilm Reactors. – London: IWA Publishing, 2007. – 328 p.
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 НАНУ, 2015.-№ 5.- С.55-59.
8. Gebara F. Activated sludge biofilm waste water treatment system. // Water Research. – Oxford: Pergamon Press, 1999. - Vol. 13, №1 – P. 230-238.
  9. Wanner O. Mathematical modeling of biofilms / O. Wanner, N.L. Ebert, B.E. Rittan // Scientific and Technical report. – Basingstoke: Springer, 2006 - N18 - 208 p.
  10. Олійник О.Я. Теорія і розрахунки біологічної очистки стічних вод в аеротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим на додаткових пристроях біоценозом / О.Я. Олійник, Т.С. Айрапетян // Прикладна гідромеханіка. – К., 2015. - Т.17(89), №3. - С.35-43.
  11. Айрапетян Т.С. Моделювання кисневого режиму в біореакторах-аеротенках при очистці стічних вод від органічних забруднень / Т.С. Айрапетян, С.В. Телима, О.Я. Олійник // Доповіді НАНУ. – К., 2017- № 6 - С.21-27.
  12. Олійник О.Я. Моделювання і розрахунки кисневого режиму при вилученні органічних забруднень в аеротенках-змішувачах зі зваженою і закріпленою біомасою / О.Я. Олійник, Т.С. Айрапетян // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки – К.: КНУБА, 2016. - Вип.27. - С.269-279.
  13. Henze M. Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes 3rd ed / M. Henze, P. Harremoës, J. la Cour Jansen, E. Arvin. – Berlin: Springer, 2002. – 430 p.
  14. Henze M. Biological Wastewater Treatment / M. Henze, M. Van Loosdrecht, G. Ekama, D. Brdjanovic. - London: IWA Publishing, 2008. – 511 p.
  15. Репин Б.Н. Моделирование кислородного режима в аеротенках – вытеснителях / Б.Н. Репин, В.И. Баженов // Водні ресурси. – М.,1991. - № 1 -С.122-130.
  16. Олійник О.Я. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах / О.Я. Олійник, О.А. Колпакова // Екологічна безпека та природокористування. – К.,2014. - Вип.16. - С.68-86.
  17. ДБН В.2.5-75-2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. - К.: Мінрегіон України, 2013.-128 с.

**Олейник А.Я., Айрапетян Т.С. РАСЧЕТ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА ПРИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКАХ-СМЕСИТЕЛЯХ С ПРИКРЕПЛЕННЫМ И ВЗВЕШЕННЫМ БИОЦЕНОЗОМ.** Для аэротенка-смесителя с прикрепленным и взвешенным биоценозом представлена двухуровневая математическая модель процесса биологической очистки с учетом кислородного режима. Считается, что окисление органических загрязнений и потребление кислорода осуществляется по реакции или нулевого, или первого порядка. Это дает возможность упростить исходные уравнения и получить аналитическое решение, которое можно использовать для инженерного расчета. Также оценено влияние кислородного режима на эффективность удаления загрязняющих веществ.

**Ключевые слова:** очистка сточных вод, кислородный режим, аэротенк-смеситель, активный ил, прикрепленная биомасса (био пленка), концентрация загрязнений и кислорода, исходные параметры, расчет, оценка, анализ.

**Oleynik A.Ya., Airapetian T.S. CALCULATION OF THE OXYGEN REGIME IN THE BIOLOGICAL TREATMENT OF WASTEWATER IN AEROTANK-MIXERS WITH ATTACHED AND SUSPENDED BIOCENOSIS.** Two-level mathematical model of the biological treatment process (include the oxygen regime) for an aerotank-mixer with an attached and suspended biocenosis is presented. It is believed that the oxidation of organic pollutants and oxygen consumption is carried out by the reaction zero or the first order. This makes it possible to simplify the original equations and obtain an analytical solution that can be used for engineering calculation. The effect of the oxygen regime on the removal efficiency of pollutants was also evaluated.

**Keywords:** wastewater treatment, oxygen regime, aerotank-mixer, activated sludge, attached biomass (biofilm), concentration of pollution and oxygen, initial parameters, calculation, assessment, analysis.