

Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом

Наведено математичну модель біологічної очистки стічних вод від органічних забруднень в аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) біоценозом у вигляді пластівців активного мулу і закріпленим біоценозом у вигляді біоплівки, утвореної на поверхні додаткового навантаження. При цьому розглядаються особливості моделювання очистки в аеротенках-змішувачах і аеротенках-витискувачах.

Ключові слова: очистка фільтруванням, модель, аеротенк-змішувач, аеротенк-витискувач, біоплівка, активний мул, кінетика реакцій, гідроліз.

У практиці очищення міських, побутових і подібних за складом стічних вод найбільше поширення набули біологічні методи очистки. Класичною технологічною схемою такої очистки є система споруд, основною складовою якої є біореактор-аеротенк. Як відомо, в аеротенку відбувається вилучення (біоокислення) сорбованих на плаваючих пластівцях активного мулу, який складається переважно із мікроорганізмів завислих або розчинених у воді органічних забруднень.

Залежно від гідродинамічного режиму руху рідини біореактори-аеротенки поділяються на аеротенки-змішувачі і аеротенки-витискувачі [1, 2]. Так в аеротенку-змішувачі стічні води, що надходять, і активний мул майже миттєво перемішуються між собою і тому концентрації мікроорганізмів і забруднень, а також розчиненого кисню приймаються однаковими по всьому об'єму реактора. В аеротенку-витискувачі відсутнє перемішування, стічна вода разом з активним мулом рухається в реакторі і в результаті окислення концентрація забруднень зменшується по довжині аеротенка. Виконаний аналіз показав, що ефективність вилучення забруднень в них можна значно підвищити, якщо поряд зі зваженим біоценозом (активним мулом) забезпечити в об'ємі аеротенка додаткове завантаження (пристрої, насадки тощо), на поверхні якого утворюється біоплівка з високою концентрацією мікроорганізмів.

Відомо, що така комбінована біологічна очистка стічних вод у спорудах з закріпленою біомасою (біоплівкою), на думку спеціалістів, має ряд значних технологічних переваг і широко використовується на практиці [2–4].

Для оцінки і аналізу сумісного вилучення органічних забруднень (ОЗ) зваженим і закріпленим біоценозом в аеротенках-змішувачах і витискувачах у наведеній роботі побудовано загальну математичну модель, яка зводиться до реалізації поданих нижче рівнянь матеріального балансу, записаних відносно зміни концентрації органічних забруднень в аеротенку L_a . При цьому вважається, що процес біохімічного окислення в достатній кількості забезпечений киснем, тобто надходження кисню не буде лімітувати кінетику біоокислення як зваженого, так і закріпленого біоценозу

$$\frac{\partial L_a}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 L_a}{\partial x^2} - V \frac{\partial L_a}{\partial x} - R, \quad (1)$$

$$R = \lambda N - \varepsilon R_a + \varepsilon R_c, \quad (2)$$

де R , R_a , R_c — відповідно швидкість загальної реакції, утилізації ОЗ зваженим біоценозом (активним мулом) і виділених речовин при відмиранні мулу; N — потік (транспорт) ОЗ через поверхню біоплівки для їх утилізації закріпленим біоценозом (біоплівкою); L_a — концентрація ОЗ в аеротенку; D_a — коефіцієнт дифузії (дисперсії) в рідині аеротенка; $V = Q_a/F$ — середня швидкість потоку в аеротенку; F — поперечна площа аеротенка; Q_a — витрата рідини в аеротенку; l — робоча довжина аеротенка; λ — конструктивний параметр;

$$\varepsilon = 1 - \frac{W_\delta}{W_a} = \frac{W_p}{W_a}; \quad (3)$$

W_a — відповідно робочий об'єм аеротенка; W_p — об'єм рідини в аеротенку; W_δ — об'єм встановленого завантаження (насадка) із закріпленим біоценозом.

У практичних розрахунках достатньо розглянути рівняння (1) в стаціонарних умовах і привести його до такого безрозмірного вигляду:

$$\frac{1}{\text{Pe}} \frac{\partial^2 L_a}{\partial \bar{x}^2} - \frac{\partial L_a}{\partial \bar{x}} - RT = 0, \quad (4)$$

де $\bar{x} = x/l$, $T = l/V$, $\text{Pe} = Vl/D_a$ — відомий дифузійний критерій Пекле.

Оскільки в реальних аеротенках-витискувачах, згідно з [5], значення $1/\text{Pe} = D_a/Vl < 0,002$, то в інженерних розрахунках рівняння (4) можна записати як для ідеального аеротенка-витискувача ($\text{Pe} \rightarrow \infty, 1/\text{Pe} \rightarrow 0$) у вигляді

$$-\frac{\partial L_e}{\partial \bar{x}} - R_a T = 0, \quad (5)$$

де значення загальної реакції R_a визначається за формулою (2) при $\lambda = F'_\delta/F$; F'_δ — площа поверхні біоплівки на одиницю розрахункової довжини загальної ділянки аеротенка із закріпленим біоценозом.

При $\text{Pe} \ll 1$, тобто при значних величинах $1/\text{Pe}$, рівняння (4) можна записати як для ідеального аеротенка-змішувача ($1/\text{Pe} \rightarrow \infty$), а саме:

$$L_0 - L_e - R_3 = 0. \quad (6)$$

Тут

$$R_3 = \frac{F_\delta}{Q_a} N - (R_a - R_c) T_a, \quad T_a = \frac{W_p}{Q_a}, \quad (7)$$

де $F_\delta = F'_\delta l_\delta$ — загальна площа поверхні біоплівки в аеротенку.

Відмітимо, що значення потоку ОЗ через поверхню біоплівки N знаходиться в результаті розв'язання такого рівняння, яке характеризує вилучення ОЗ утвореної на поверхні завантаження (насадки) біоплівки,

$$D_L \frac{\partial^2 L}{\partial z^2} - R_L = 0, \quad (8)$$

при граничних умовах

$$N = -D_L \frac{\partial L}{\partial z} = K_L (L_a - L|_{z=0}), \quad L|_{z=0} = L_\delta \quad \text{при} \quad z = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z = \delta. \quad (10)$$

Тут L , L_δ , L_a — відповідно концентрація ОЗ в біоплівці, на поверхні біоплівки і в аеротенку; R_L — швидкість реакції в біоплівці, при повній відсутності інгібованого впливу описується відомим рівнянням Моно

$$R_L = \frac{\rho_m L}{K_{mL} + L}, \quad \rho_m = \frac{\mu_m X}{Y}, \quad (11)$$

де D_L — коефіцієнт молекулярної дифузії в біоплівці; K_L — коефіцієнт масопереносу ОЗ забруднень в рідинній плівці; δ , δ_p — відповідно товщини біоплівки і рідинної плівки (пограничного шару); X — концентрація закріпленої біомаси в біоплівці; μ_m — питома максимальна швидкість росту мікроорганізмів; K_{mL} — коефіцієнт насичення (напівнасичення); z — віддаль перпендикулярно поверхні біоплівки.

В результаті розв'язання рівняння (8) при граничних умовах (9), (10) одержимо загальну залежність за зміною концентрації L по товщині біоплівки δ , на підставі якої знаходимо при $z = 0$ значення концентрації стічної води L_δ , яка надходить на поверхню біоплівки через рідинну плівку.

Швидкість реакції з вилучення органічних забруднень зваженим біоценозом (активним мулом) в об'ємі аеротенка R_a також визначається за рівнянням Моно, яке запишемо у вигляді [1, 5]

$$R_a = \frac{\rho_{\max a} L_a}{K_{ma} + L_a}, \quad \rho_{\max a} = \frac{\mu_{\max a} X_a}{Y_a(1 + \varphi X_a)}, \quad (12)$$

де X_a — беззольна концентрація активного мулу в аеротенку; φ — коефіцієнт інгібування активного мулу іншими речовинами.

Нагадаємо, що швидкості реакцій (11) і (12) записано при умові забезпечення аеробного процесу в біоплівці і об'ємі аеротенка киснем у достатній кількості [1]. Швидкість виділення ОЗ в процесі відмирання активного мулу, згідно з [2, 5], приймається такою:

$$R_c = b_c X_a \quad (13)$$

(b_c — константа швидкості відмирання).

Відзначимо, що продукти відмирання мікроорганізмів приводять до деякого зростання в системі концентрації повільно розкладеної речовини. Ця речовина буде гідролізована і додатково братиме участь у загальній реакції окислення. Також зазначимо, що зі стічними водами можуть потрапляти складні важкорозкладні речовини як у вигляді зважених, так і розчинених частинок, які в результаті гідролізу перетворюються в легкорозкладні [2]. Процеси гідролізу, як правило, є значно повільнішими порівняно з процесами зростання. Для визначення параметрів гідролізу в роботі [2] наведено ряд рекомендацій, зокрема для зважених і розчинених речовин в аеротенку, а також в умовах реакторів із закріпленим біоценозом (біоплівкою). При необхідності процеси гідролізу можуть бути враховані в загальній моделі шляхом введення додаткового члена в рівняння (1).

В очисних спорудах із закріпленою біомасою (біоплівкою) ефективність вилучення органічних забруднень пов'язана з утворенням високої концентрації мікроорганізмів в біоплівці, які складають її основну тверду частину. Відомо, що тверда частина біоплівки має складну

гетерогенну структуру і містить, в основному, активну біомасу (в даному випадку — гетеротрофні мікроорганізми), інертну біомасу і позаклітинні полімерні речовини (EPS) [3]. Для визначення формування активної (розрахункової) товщини біоплівки δ в часі пропонується таке найбільш поширене рівняння [2]:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{YN}{X} - b\delta - u_{ds}, \quad (14)$$

де YN/X — зростання біоплівки; $b\delta$ — розпад біоплівки, u_{ds} — швидкість відриву з поверхні біоплівки. Деякі рекомендації щодо визначення коефіцієнта b і швидкості u_{ds} наведені, зокрема, в роботах [2, 3]. Вважаючи, що в більшості біоплівкових моделей товщина біоплівки приймається постійною та розв'язавши рівняння (14) в стаціонарних умовах ($d\delta/dt = 0$), при різних значеннях потоків ОЗ і швидкостей відриву u_{ds} можна визначити товщину біоплівки δ . При цьому відзначимо, що рівняння (14) дозволяє також врахувати можливу зміну товщини біоплівки в напрямку руху потоку на ділянці з закріпленим біоценозом в аеротенку-витискувачі.

Важливою характеристикою, на підставі якої відбувається обґрунтування параметрів вторинних відстійників, є кількість активного мулу, який надходить із аеротенка у відстійник. Нагадуємо, що у відстійнику відбувається освітлення біологічно очищеної стічної води від активного мулу і його ущільнення з утворенням осаду [6]. Кількість активного мулу на виході із аеротенка-змішувача, яка буде визначатися його концентрацією X_a , знаходимо в результаті розв'язання рівняння

$$X_0 - X_a + T_a(\mu X_a - b_c X_a) + \frac{F_\delta}{Q_a} u_{ds} X = 0, \quad (15)$$

а для аеротенка-витискувача маємо таке рівняння:

$$-V \frac{\partial X_a}{\partial x} + \varepsilon \mu X_a - \varepsilon_a b_c X_a + b_{ds} X = 0. \quad (16)$$

У рівняннях (15), (16)

$$\mu = \frac{\mu_{m_a} L_a}{K_{m_a} + L_a}, \quad (17)$$

b_{ds} — коефіцієнт відриву біоплівки, що входить в залежності при визначенні швидкості відриву u_{ds} .

Значення інших параметрів і коефіцієнтів, що входять у наведені математичні моделі і необхідні при їх реалізації, а також рекомендації, які дозволяють оцінити вплив на процеси і механізми очистки стічних вод в зазначених умовах, зокрема температура і наявність інших речовин, розглянуто в спеціальній літературі (див., наприклад, [2, 4, 5]).

Для оцінки впливу наведених механізмів вилучення ОЗ необхідно також 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, наведені рівняння розв'язуються при $N = 0$. При розрахунку параметрів аеротенка необхідно в системі біологічної очистки врахувати особливості режиму його роботи, а саме: наявність або відсутність рециркуляції активного мулу, наявність регенератора тощо.

2. У випадку, коли вилучення ОЗ відбувається тільки закріпленою на звантаженні біомасою, тобто при неврахуванні дії зваженого активного мулу, наведені рівняння розв'язуються при $R_a = 0$ і $R_c = 0$.

3. У випадку, коли вилучення ОЗ в аеротенку відбувається за рахунок зваженого і закріпленого біоценозу, важливим питанням є визначення оптимальних параметрів звантаження, зокрема його можливі варіанти розташування в об'ємі (в плані) аеротенка і необхідна площа поверхні біоплівки F_s (елементів звантаження). При цьому елементи звантаження (насадки, сітки тощо) можуть бути розташовані по всьому об'єму аеротенка або більш щільно і компактно тільки на його окремих ділянках. Важливим фактором в режимі роботи аеротенка також є місцезнаходження звантаження, а саме, — на початку аеротенка або в кінці його.

Реалізація наведених моделей дозволяє при заданих геометричних та інших характеристиках оцінити вплив різних чинників на процеси очистки в аеротенках в різних умовах їх роботи і обґрунтувати найбільш економічну й ефективну в експлуатації конструкцію біологічного реактора.

Цитована література

1. Яковлев С. В., Воронов Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод. – Москва: АСВ, 2002. – 704 с.
2. Henze M. M., Van Loosdrecht M. C., Ekama V. A., Bzdjanovic D. Biological wastewater treatment. – London: Iwe Publ., 2008. – 511 p.
3. Wanner O., Ebert N. L., Rittan B. E. Mathematical modeling of biofilms // Scientific and Technical Report. – 2006. – No 18. – P. 208.
4. Олейник А. Я., Василенко Т. В., Рыбаченко С. А., Хамад И. А. Моделирование процессов доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод на фильтрах // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2006. – Вып. 7. – С. 85–97.
5. Репин В. Н., Базенов В. И. Моделирование кислородного режима в аеротенках-вытеснителях // Водные ресурсы. – 1991. – № 1. – С. 122–130.
6. Олейник О. Я., Зябликов С. М. Особливості очистки стічних вод у системі аеротенк – відстійник – регенератор // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2005. – Вып. 4. – С. 46–53.

References

1. Jakovlev S. V., Voronov Ju. V. Sewerage and wastewater cleaning, Moscow: ISV, 2002 (in Russian).
2. Henze M. M., Van Loosdrecht M. C., Ekama V. A., Bzdjanovic D. Biological wastewater treatment, London: Iwe Publishing, 2008.
3. Wanner O., Ebert N. L., Rittan B. E. Scientific and Technical Report, 2006, No 18: 208.
4. Oleinik A. Ja. Vasilenko T. V., Rybachenko S. A., Hamad I. A. Problems of the watersupply, sewerage and hydraulic, 2006, No. 7, P. 85–97 (in Russian).
5. Repin V. N., Bazenov V. I. Water resources, 1991, No 1: 122–130 (in Russian).
6. Oliyuk O. Ya., Zjablikov S. M. Problems of the watersupply, sewerage and hydraulic, 2005, No 4: 46–53 (in Ukrainian).

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ
Харківський національний університет міського
господарства ім. О. М. Бекетова

Надійшло до редакції 06.11.2014

Член-корреспондент НАН Украины А. Я. Олейник, Т. С. Айрапетян

Моделирование очистки сточных вод от органических загрязнений в биореакторах-аэротенках со взвешенным (свободноплавающим) и закрепленным биоценозом

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

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

Приводится математическая модель очистки сточных вод от органических загрязнений в аэротенках со взвешенным (свободноплавающим) биоценозом в виде хлопьев активного ила и закрепленного биоценоза в виде биопленки, образованной на поверхности дополнительной загрузки. При этом рассматриваются особенности моделирования очистки в аэротенках-смесителях и аэротенках-вытеснителях.

Ключевые слова: очистка фильтрованием, модель, аэротенк-смеситель, аэротенк-вытеснитель, биопленка, активный ил, кинетика реакций, гидролиз.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine О. Ya. Oliinyk, T. S. Airapetyan

The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses

Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Kiev

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

A mathematical model of biological clearance of waste waters from the organic pollutions in the aerotanks with suspended free flow biocenosis as flakes of the active silt and with fixed biocenosis as a biofilm formed on the surface of an additional loading is presented. The characteristic properties of the modeling of clearance in an ideal mix aeration tank and a plug flow aeration tank are considered.

Keywords: clearance by filtration, model, ideal mix aeration tank, plug flow, aeration tank, biofilm, active silt, kinetic of reaction hydrolysis.