УДК 628. 33

Саблій Л. А., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД В БІОРЕАКТОРАХ З ІММОБІЛІЗОВАНИМИ МІКРООРГАНІЗМАМИ

Наведено результати математичного моделювання гідродинамічних процесів в нових конструкціях анаеробних і аеробних біореакторів, обладнаних волокнистими носіями для іммобілізації мікроорганізмів. Ключові слова: стічні води, біологічне очищення, біореактор.

Приведены результаты математического моделирования гидродинамических процессов в новых конструкциях анаэробных и аэробных биореакторов, оборудованных носителями для иммобилизации микроорганизмов.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, биореактор.

It is presented results of mathematical modeling of hydrodynamic processes in new constructions of anaerobic and aerobic bioreactors with fibrous carrier for microorganisms immobilization.

Keywords: wastewater, biological treatment, bioreactor.

В основі анаеробних та аеробних процесів біологічного очищення стічних вод лежить біохімічне відновлення-окиснення органічних речовин у відсутності чи у присутності кисню анаеробними або аеробними бактеріями. Важливе значення при розробці конструкцій споруд біологічного очищення стічних вод, особливо анаеробних біореакторів, надається системі перемішування в споруді для забезпечення рівномірного розподілу органічних речовин в об'ємі з метою рівномірного і своєчасного постачання їх мікроорганізмамдеструкторам. Особливо гострою постає ця проблема при влаштуванні в анаеробних біореакторах носіїв іммобілізованих мікроорганізмів, наприклад, волокнистих типу «ВІЯ», якими заповнюють внутрішній простір очисної споруди, надаючи мікроорганізмам можливість поселятись як на поверхні волокон, в переплетеннях, так і в товщі – у важкодоступних для поживних речовин місцях.

3 метою забезпечення необхідного масообміну розроблено нові конструкції біореакторів [1, 2].

Конструктивною особливістю анаеробного біореактора (рис. 1) є влаштування системи перемішування за допомогою насоса, рециркуляційного трубопроводу і перфорованої труби, яка розташована вісесиметрично з циліндричним корпусом біореактора [1].

Вихідна стічна вода надходить в нижню частину біореактора, обладнаного волокнистими носіями, розташованими більшою мірою в рідині і частково в газовій фазі. Стічна вода рухається знизу вгору, омиває волокна і постачає органічну речовину іммобілізованим бактеріям-гетеротрофам.

Для рівномірного розподілу органічних речовин по поверхні волокон з метою ефективного їх деструкції іммобілізованими бактеріями частина стічної води за допомогою рециркуляційної системи (насоса, трубопроводу та перфорованої труби) розподіляється розосереджено в об'ємі біореактора.



Рис. 1. Схема анаеробного біореактора з носіями іммобілізованих мікроорганізмів: *а*) без підігріву рециркуляційної води; *б*) з підігрівом рециркуляційної води:

1 – корпус; 2 – носії «ВІЯ»; 3 – зона рідини; 4 – газова зона; 5 – підведення стічної води; 6 – відведення очищеної води; 7 – відведення газу; 8 – рециркуляційний трубопровід; 9 – насос; 10 – перфорований трубопровід; 11 – теплообмінник

Стічна вода надходить через отвори у вертикальній трубі перпендикулярно зовнішньому потоку води (див. рис. 1, *a*). Завдяки цьому в усіх точках об'єму споруди встановлюється майже однакова концентрація органічних речовин. Крім того, ефективно і своєчасно відводяться з потоком води продукти метаболізму мікроорганізмів.

З метою підвищення швидкості деструкції органічних речовин при анаеробному процесі можна здійснювати підігрів рециркуляційної води (див. рис. 1, б) перед подачею її в біореактор.

Анаеробні біореактори можна влаштувати у вертикальній і горизонтальній спорудах (рис. 2).

Вісник Національного університету водного господарства та природокористування



Рис. 2. Схема анаеробного біореактора горизонтального типу з носіями іммобілізованих мікроорганізмів:

корпус; 2 – носії «ВІЯ»; 3 – зона рідини; 4 – газова зона; 5 – підведення стічної води; 6 – відведення очищеної води; 7 – відведення газу; 8 – рециркуляційний трубопровід; 9 – насос; 10 – перфорований трубопровід





корпус; 2 – носії «ВІЯ»; 3 – підведення стічної води; 4 – відведення очищеної води; 5 – підведення повітря; 6 – перфорований трубопровід

Конструктивною особливістю розроблених аеробних біореакторів з носіями іммобілізованих мікроорганізмів (рис. 3) є розташування вісесиметрично до циліндричного корпуса споруди перфорованого трубопроводу, за допомогою якого в споруду подають повітря, забезпечуючи інтенсивний масообмін між стічною водою і гідробіонтами, іммобілізованими на носіях, та підтримуючи в завислому стані частинки вільноплаваючого мулу [2]. Завдяки цьому кисень надходить в усі точки споруди і споживається мікроорганізмами біологічних обростань в процесі окиснення органічних речовин. Аеробні біореактори можна виконувати горизонтального і вертикального типу (див. рис. 3, a і δ).

Відомо, що для визначення швидкості ламінарного руху в'язкої нестисливої рідини можуть бути використані рівняння Нав'є – Стокса і рівняння нерозривності [3]. В загальному вигляді ця система рівнянь не розв'язана внаслідок її складності, але розв'язок одержано для ряду окремих випадків.

Отже, виникає необхідність розрахунку параметрів ламінарного усталеного потоку між двома співвісними циліндрами, коли через отвори на поверхні внутрішнього циліндра подається рідина або повітря.

Гідродинамічна модель таких споруд може бути представлена (рис. 4) у вигляді співвісних циліндрів з рухом води між ними і витіканням води (або подачею повітря) через отвори у внутрішньому циліндрі.

Нехай між двома співвісними циліндрами, вісь яких співпадає з віссю OZ (рис. 4), рухається рідина. Координатна вісь Or перпендикулярна до OZ. Радіус зовнішнього циліндра R. Через отвори на поверхні внутрішнього циліндра радіуса R_1 у потік витікає рідина із швидкістю V_w .



Рис. 4. Течія між співвісними циліндрами

Для знаходження гідравлічних параметрів ламінарного усталеного потоку між циліндрами при $R_1 < r < R$ і рівномірному витіканні рідини через отвори на поверхні внутрішнього циліндра використано рівняння Нав'є – Стокса (1) та рівняння нерозривності у циліндричних координатах (2) без врахування масових сил у вигляді:

$$\rho v_r \frac{dv_z}{dr} = \mu \left(\frac{d^2 v_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_z}{dr} \right) - \frac{dP}{dz}, \qquad (1)$$

$$\frac{dv_r}{dr} + \frac{v_r}{r} = 0, \qquad (2)$$

з граничними умовами

$$v_r = v_w, v_z = 0$$
 при $r = R_1; v_z = 0$ при $r = R$. (3)

При цьому прийнято припущення, що потік має осьову симетрію, а отже, $\frac{\partial v_z}{\partial \phi} = 0$, $v_r(r)$, $v_z(r)$. Із рівняння (2) з використанням (3) маємо $v_r = v_r \frac{R_1}{r_{ori}}$ тоді рівняция (1) дос

 $v_r = v_w \frac{R_1}{r}$. Тоді рівняння (1) дає

$$v_{z} = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dz} \frac{1}{2 - \operatorname{Re}_{w}} \left[r^{2} - R_{1}^{2} - \left(R^{2} - R_{1}^{2} \right) \frac{1 - \left(r/R_{1} \right)^{\operatorname{Re}_{w}}}{1 - c^{\operatorname{Re}_{w}}} \right];$$
(4)

$$\operatorname{Re}_{w} = \frac{v_{w}R_{1}}{v_{0}}; \ c = \frac{R}{R_{1}}.$$

Коли $Re_w \to 0$, розподіл швидкостей (4) повинен переходити у розподіл швидкостей при відсутності поперечної складової швидкості на поверхні внутрішнього циліндра ($v_w = 0$), а тому замінимо, згідно правилу Лапіталя,

$$\frac{1 - \left(\frac{r}{R_{1}}\right)^{Re_{w}}}{1 - c^{Re_{w}}}$$
 на $\frac{\ln \frac{r}{R_{1}}}{\ln c}$, що не суперечить умовам при $r = R$, $r = R_{1}$, тоді
 $v_{z} = \frac{\Delta P}{2\mu l \left(2 - \operatorname{Re}_{w}\right)} \left(R_{1}^{2} - r^{2} + \frac{R^{2} - R_{1}^{2}}{\ln c} \ln \frac{r}{R_{1}}\right).$ (5)
Тут ΔP – перепад тиску між циліндрами, l – довжина циліндрів,

Тут ΔP – перепад тиску між циліндрами, l – довжина циліндрів, $\frac{dP}{dz} = -\frac{\Delta P}{l}.$ Найбільше значення швидкості одержимо із (5) при $R_1 < r < R$ у вигля-

$$(v_z)_{\max} = \frac{\Delta P}{2\mu l (2 - \text{Re}_w)} \left(R_1^2 - \frac{a}{2} + a \ln \sqrt{\frac{a}{2R_1^2}} \right)$$

при $r = \sqrt{\frac{a}{2}}, a = \frac{R^2 - R_1^2}{\ln c}.$

Знайдемо секундну об'ємну витрату нестисливої рідини при усталеному ламінарному потоці між циліндрами

$$Q = 2\pi \int_{R_1}^{R} v_z r dr = \frac{\pi \Delta P}{4\mu l (2 - \text{Re}_w)} \left[R^4 - R_1^4 - \frac{\left(R^2 - R_1^2\right)^2}{\ln c} \right].$$

Маючи об'ємну секундну витрату, знайдемо середню швидкість

$$(v_z)_{cep} = \frac{Q}{\pi (R^2 - R_1^2)} = \frac{\Delta P}{4\mu l (2 - \mathrm{Re}_w)} (R^2 + R_1^2 - a).$$
⁽⁶⁾

Із (6) одержимо наближену формулу для втрати тиску

$$\Delta P = \frac{4\mu l (2 - \text{Re}_w) (v_z)_{cep}}{R^2 + R_1^2 - a}.$$
(7)

У технічних розрахунках використовується перепад тиску у вигляді

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho(v_z)_{cep}^2}{2}.$$

$$d = 2(R - R_1).$$
(8)

Із формул (7) і (8) знаходимо величину коефіцієнта опору

$$\lambda = \frac{32(2 - \operatorname{Re}_{w})(c - 1)^{2}}{\operatorname{Re}\left(c^{2} + 1 - \frac{c^{2} - 1}{\ln c}\right)},$$
(9)

$$\operatorname{Re} = \frac{\left(v_z\right)_{cep}d}{v_0}.$$

Коли $R_1 \to 0$ (ламінарний потік у трубі, $Re_w = 0$), $a \to 0$, одержимо коефіцієнт опору у трубі радіуса R

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

Для дуже вузьких кільцевих щілин, тобто $R_1 \rightarrow R$, $a \rightarrow 2R^2$, а отже

$$R^{2} + R_{1}^{2} - a \rightarrow (R - R_{1})^{2}$$
.
тоді $\lambda \rightarrow \frac{64}{\text{Re}} \left(1 - \frac{1}{2} \text{Re}_{w} \right)$.

Вираз (9) є законом опору для ламінарного потоку рідини між співвісними циліндрами, коли через отвори на поверхні внутрішнього циліндра подається речовина.

Лінія λ_0 (рис. 5) відповідає закону опору $\lambda_0 = \frac{64}{Re}$ і найкращим чином відповідає результатам вимірювань (для ламінарної течії) Г. Хагена.

Для λ_1 взято $Re_w = 1$, c = 2; λ_{-1} відповідає $Re_w = -1$, c = 2. Аналіз залежностей показує, що відведення речовини (лінія λ_{-1}) призводить до збільшення λ ; при витіканні речовини (лінія λ_1) коефіцієнт опору зменшується.

Дотична напруга тертя на поверхні внутрішнього (пористого) циліндра дорівнює

$$\tau_{w} = \mu \frac{dv_{z}}{dr} \bigg|_{r=R_{1}} = \frac{R_{1} \Delta P}{2l(2 - \operatorname{Re}_{w})} \bigg(\frac{c^{2} - 1}{\ln c} - 2 \bigg).$$
(10)





Рис. 5. Залежність коефіцієнта опору λ від числа Рейнольдса при ламінарній течії між співвісними циліндрами

Позначення: v – швидкість; r – радіус; ρ – густина; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості; P – тиск; v_w – швидкість витікання рідини через перфоровану поверхню; $R_1 R$ – радіуси циліндрів, відповідно, внутрішнього і зовнішнього (рис. 14); φ – кут; ΔP – перепад тиску між циліндрами; l – довжина циліндрів; $\frac{dP}{dz} = -\frac{\Delta P}{l} = const$; Re_w – число Рейнольдса; v_0 – кінематичний коефіцієнт в'язкості; c – стала інтегрування.

Запропонована гідродинамічна модель дає можливість розрахувати конструктивні елементи біореакторів: розміри споруди, діаметр і довжину перфорованого трубопроводу, розміри перфорації, при проектуванні, реконструкції чи будівництві станцій для очищення стічних вод за анаеробноаеробною технологією з іммобілізованим на волокнистих носіях гідробіоценозом мікроорганізмів.

1. Пат. 64416 України, МПК СО2F 3/34. Анаеробний біореактор для очищення стічних вод / Саблій Л. А., Жукова В. С. – № и 2011 03743; заявл. 28.03.11, опубл. 10.11.11, Бюл. № 21. 2. Пат. 64417 України, МПК СО2F 3/02. Аеробний біореактор для очищення стічних вод / Саблій Л. А., Жукова В. С. – № и 2011 03744; заявл. 28.03.11, опубл. 10.11.11, Бюл. № 21. 3. Радченко Л. Б. Моделювання процесів хімічної технології: навч. посіб. / Л. Б. Радченко, І. О. Мікульонок. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2005. – Ч. 1: Теоретичні основи. – 126 с.

Рецензент: к.т.н., доцент Сівак В. М. (НУВГП)