

ГІДРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ БІОРЕАКТОРІВ З ІММОБІЛІЗОВАНИМИ МІКРООРГАНІЗМАМИ ПРИ ОЧИЩЕННІ СТІЧНИХ ВОД

Л. А. Саблій

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне
e-mail: larisasabliy@mail.ru

З метою забезпечення необхідного масообміну розроблено нові конструкції анаеробних і аеробних біореакторів, обладнаних волокнистими носіями для іммобілізації мікроорганізмів. Конструктивною особливістю анаеробного біореактора є влаштування системи перемішування за допомогою насоса, рециркуляційного трубопроводу і перфорованої труби, яка розташована вісесиметрично з циліндричним корпусом біореактора. Особливістю розроблених конструкцій аеробних біореакторів є розташування вісесиметрично до циліндричного корпусу споруди перфорованого трубопроводу для підведення повітря, забезпечення інтенсивного масообміну між стічною водою і гідробіонтами, іммобілізованими на носіях, та підтримання в завислому стані частинок вільноплаваючого мулу. Для цих конструкцій запропоновано модель розрахунку параметрів ламінарного потоку.

Розроблена математична 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 анаеробно-аеробною технологією з іммобілізованим на волокнистих носіях гідробіоценозом мікроорганізмів.

Ключові слова: стічні води, біологічне очищення, біореактор.

Вступ

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 мікроорганізмам-деструкторам. Особливо гостро 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.

З 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 ефективної їх деструкції іммобілізованими бактеріями частина стічної води за допомогою

рециркуляційної системи (насоса, трубопроводу та перфорованої труби) розподіляється розосереджено в об'ємі біореактора.

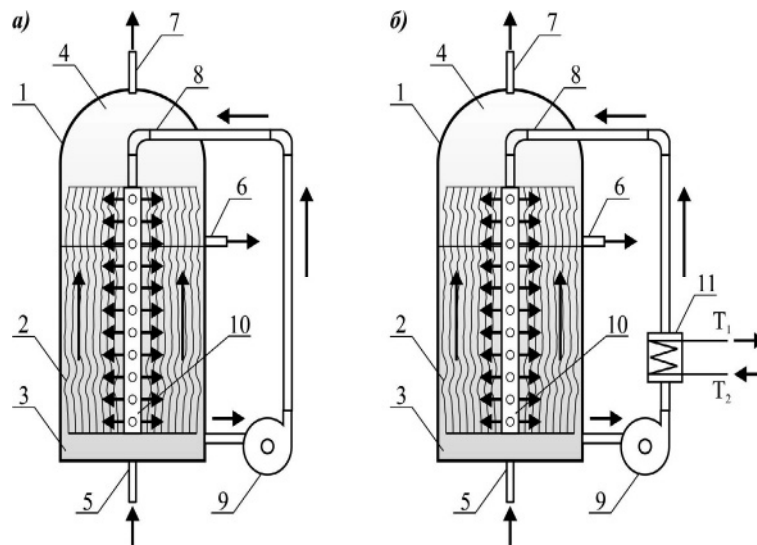


Рис. 1. Схема анаеробного біореактора з носіями іммобілізованих мікроорганізмів:
 а) без підігріву рециркуляційної води; б) з підігрівом рециркуляційної води:
 1 – корпус; 2 – носії «ВІЯ»; 3 – зона рідини; 4 – газова зона; 5 – підведення стічної води;
 6 – відведення очищеної води; 7 – відведення газу; 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, а). 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).

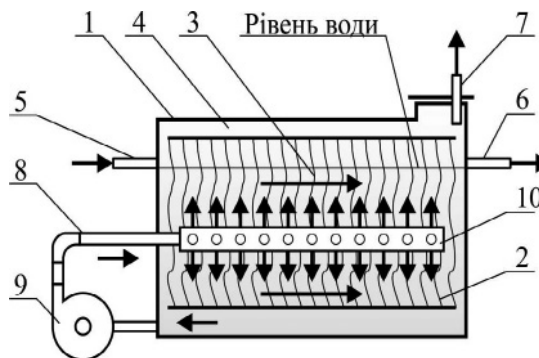


Рис. 2. Схема анаеробного біореактора горизонтального типу з носіями іммобілізованих мікроорганізмів: 1 – корпус; 2 – носії «ВІЯ»; 3 – зона рідини; 4 – газова зона; 5 – підведення стічної води; 6 – відведення очищеної води; 7 – відведення газу; 8 – рециркуляційний трубопровід; 9 – насос; 10 – перфорований трубопровід.

Конструктивною особливістю розроблених аеробних біореакторів з носіями іммобілізованих мікроорганізмів (рис. 3) є розташування вісесиметрично до циліндричного корпусу 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, а і б).

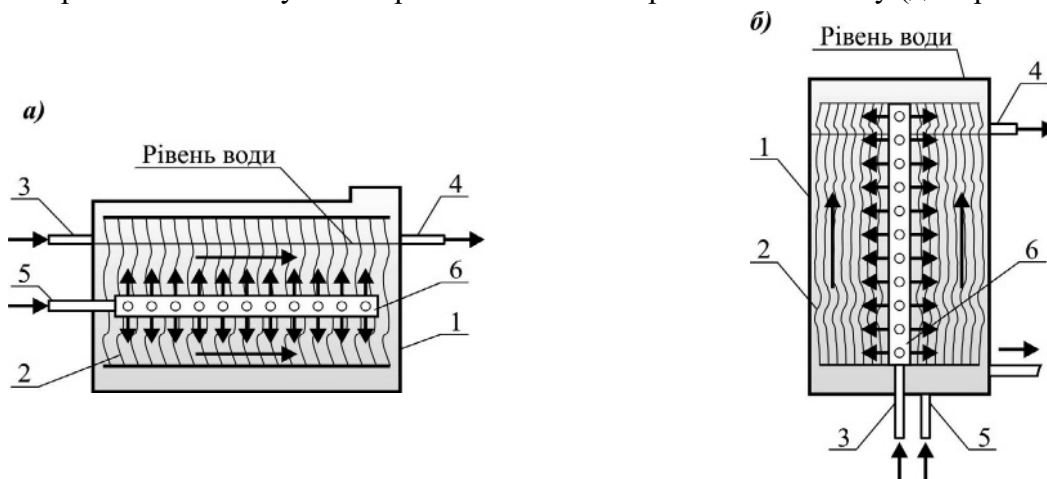


Рис. 3. Схема аеробного біореактора з носіями іммобілізованих мікроорганізмів: а) горизонтального; б) вертикального: 1 – корпус; 2 – носії «ВІЯ»; 3 – підведення стічної води; 4 – відведення очищеної води; 5 – підведення повітря; 6 – перфорований трубопровід.

Постановка задачі

Відомо, що для визначення швидкості ламінарного руху в'язкої нестисливої рідини можуть бути використані рівняння Нав'є-Стокса і рівняння нерозривності. 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.

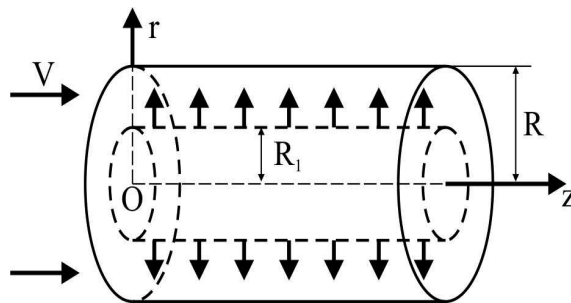


Рис. 4. Течія між співвісними циліндрами.

Результати досліджень та їх обговорення

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 .

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:

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

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

з граничними умовами

$$v_r = v_w, v_z = 0 \text{ при } r = R_1; v_z = 0 \text{ при } r = R. \quad (3)$$

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

$$v_z = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dz} \frac{1}{2 - Re_w} \left[r^2 - R_1^2 - (R^2 - R_1^2) \frac{1 - \left(\frac{r}{R_1}\right)^{Re_w}}{1 - c^{Re_w}} \right]; \quad (4)$$

$$Re_w = \frac{v_w R_1}{\nu_0}; c = \frac{R}{R_1}.$$

Коли $Re_w \rightarrow 0$, розподіл швидкостей (4) повинен переходити у розподіл швидкостей при відсутності поперечної складової швидкості на поверхні внутрішнього циліндра

($v_w = 0$), а тому замінимо, згідно правила 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

$$v_z = \frac{\Delta P}{2\mu l (2 - Re_w)} \left(R_1^2 - r^2 + \frac{R^2 - R_1^2}{\ln c} \ln \frac{r}{R_1} \right). \quad (5)$$

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 вигляді

$$(v_z)_{\max} = \frac{\Delta P}{2\mu l (2 - Re_w)} \left(R_1^2 - \frac{a}{2} + a \ln \sqrt{\frac{a}{2R_1^2}} \right) \quad \text{при } r = \sqrt{\frac{a}{2}}, a = \frac{R^2 - R_1^2}{\ln c}.$$

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

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

Маючи об'ємну секундну витрату, знайдемо середню швидкість

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

Із (6) одержимо наближену формулу для втрати тиску

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

У технічних розрахунках використовується перепад тиску у вигляді

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho (v_z)_{cep}^2}{2}, \quad d = 2(R - R_1). \quad (8)$$

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

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

$$Re = \frac{(v_z)_{cep} d}{\nu_0}.$$

Коли $R_1 \rightarrow 0$ (ламінарний потік у трубці, $Re_w = 0$), $a \rightarrow 0$, одержимо коефіцієнт опору у трубці радіуса R :

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

Для дуже вузьких кільцевих щілин, тобто $R_1 \rightarrow R$, $a \rightarrow 2R^2$, а отже $R^2 + R_1^2 - a \rightarrow (R - R_1)^2$.

$$\text{Тоді } \lambda \rightarrow \frac{64}{Re} \left(1 - \frac{1}{2} Re_w \right).$$

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}) приводить до збільшення λ ; при витіканні речовини (лінія λ_1) коефіцієнт опору зменшується.

Дотична напруга тертя на поверхні внутрішнього (пористого) циліндра дорівнює

$$\tau_w = \mu \left. \frac{dv_z}{dr} \right|_{r=R_1} = \frac{R_1 \Delta P}{2l(2 - \text{Re}_w)} \left(\frac{c^2 - 1}{\ln c} - 2 \right). \quad (10)$$

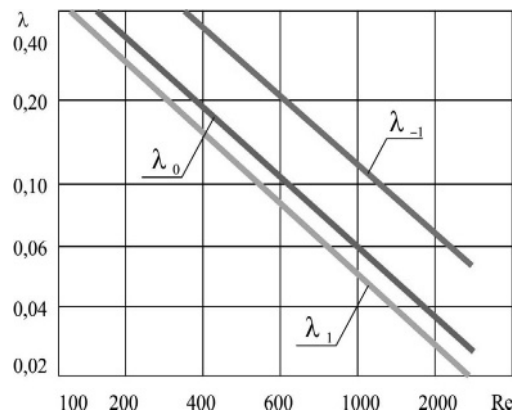


Рис. 5. Залежність коефіцієнта опору λ від числа Рейнольдса при ламінарній течії між співвісними циліндрами.

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; $\frac{dP}{dz} = -\frac{\Delta P}{l} = \text{const}$; Re_w – число Рейнольдса; ν_0 – кінематичний коефіцієнт в'язкості; c – стала інтегрування.

Висновки

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 анаеробно-аеробною технологією з іммобілізованим на волокнистих носіях гідробіоценозом мікроорганізмів.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БИОРЕАКТОРОВ С ИММОБИЛИЗОВАННЫМИ МИКРООРГАНИЗМАМИ ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Л.А. Саблий

Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно
e-mail: larisasabliy@mail.ru

С целью обеспечения необходимого массообмена разработаны новые конструкции анаэробных и аэробных биореакторов, оборудованных волокнистыми носителями для иммобилизации микроорганизмов. Конструктивной особенностью анаэробного биореактора является устройство системы перемешивания с помощью насоса, рециркуляционного трубопровода и перфорированной трубы, которая расположена осесимметрично цилиндрическому корпусу биореактора. Особенностью разработанных конструкций аэробных биореакторов является расположение осесимметрично цилиндрическому корпусу сооружения перфорированного трубопровода для подачи воздуха и обеспечения интенсивного массообмена между сточной водой и гидробионтами,

иммобилизованными на носителях, и поддержания во взвешенном состоянии частичек свободноплавающего ила. Для этих конструкций предложена модель расчета параметров ламинарного потока.

Разработанная математическая модель позволяет рассчитать конструктивные элементы биореактора: размеры сооружения, диаметр и длину перфорированного трубопровода, размеры перфорации при проектировании, реконструкции или строительстве станций для очистки сточных вод по анаэробно-аэробной технологии с иммобилизованным на волокнистых носителях гидробиоценозом микроорганизмов.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, биореактор.

HYDRODINAMIC MODEL OF BIOREACTORS WITH IMMOBILIZED MICROORGANISMS AT WASTEWATER TREATMENT

L. Sabliy

National university of water management and nature resources use, Rivne, Ukraine

e-mail: larisasabliy@mail.ru

With the purpose of provision of necessary mass exchange it is developed new constructions of anaerobic and aerobic bioreactors with fibrous carriers for microorganisms immobilization. Constructive peculiarity of anaerobic bioreactor is the mixing system with using of pump, recirculated pipe and perforated pipe which is placed along of the central line of bioreactor. Developed constructions aerobic bioreactors lineament is along of central line of cylindrical plant placing of perforated piping for provision of air and intensive mass transfer between wastewater and immobilization hydrobionts on carriers and creating suspended condition for loosely swimming particles of activated sludge. It is proposed the model for calculation of laminar flow parameters for this constructions.

Developed mathematical model give a possibility to estimate the constructive elements of bioreactors such as plant dimension, perforated piping diameter and linear, perforation dimension at project works, reconstruction and building of wastewater stations on anaerobic-aerobic technology with immobilized microorganisms biocenosis on the fibrous carriers.

Key words: wastewater, biological treatment, bioreactor.

Список літератури:

1. Пат. 64416 України, МПК C02F 3/34. Анаэробный биореактор для очищения сточных вод / Саблій Л.А., Жукова В.С. – № у 2011 03743; заявл. 28.03.11, опубл. 10.11.11, Бюл. № 21.
2. Пат. 64417 України, МПК C02F 3/02. Аэробный биореактор для очищения сточных вод / Саблій Л.А., Жукова В.С. – № у 2011 03744; заявл. 28.03.11, опубл. 10.11.11, Бюл. № 21.