

УДК 628.16:656.31

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ БІОРЕАКТОРІВ З ВОЛОКНИСТИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ У СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ

А.В. ВАСИЛЮК

Одеська державна академія будівництва і архітектури

Запропоновано математичні залежності для визначення пористості волокнистого фільтрувального завантаження біореакторів (БР) різної форми в плані та їхні граничні конструктивні й технологічні параметри для забезпечення оптимальних процесів очищення природних вод на цих спорудах.

© А.В. Василюк, 2009

Меліорація і водне господарство. 2009. Вип. 97

Постановка проблеми. У нинішніх складних умовах посиленого антропогенного навантаження на природні водні джерела проблему поліпшення якості питної води за зменшення її собівартості можна розв'язати при застосуванні водоочисних станцій з біореакторами і контактними прояснювальними фільтрами [1, 2].

Біореактор виконує такі функції (рис. 1):

- насичення вихідної води киснем шляхом її розбризкування за допомогою аератора 3 та падіння крапельок води з висоти не менше 0,5 м;
- біохімічне окислення домішок, що знаходяться у вихідній воді, за допомогою мікроорганізмів, які прикріплюються на поверхні волокнистого завантаження;
- видалення з води газів (CO_2 , O_2 тощо) для запобігання пухирцевій кольматації плаваючого пінополістирольного фільтрувального завантаження;
- забезпечення постійної швидкості фільтрування води протягом фільтроциклу.

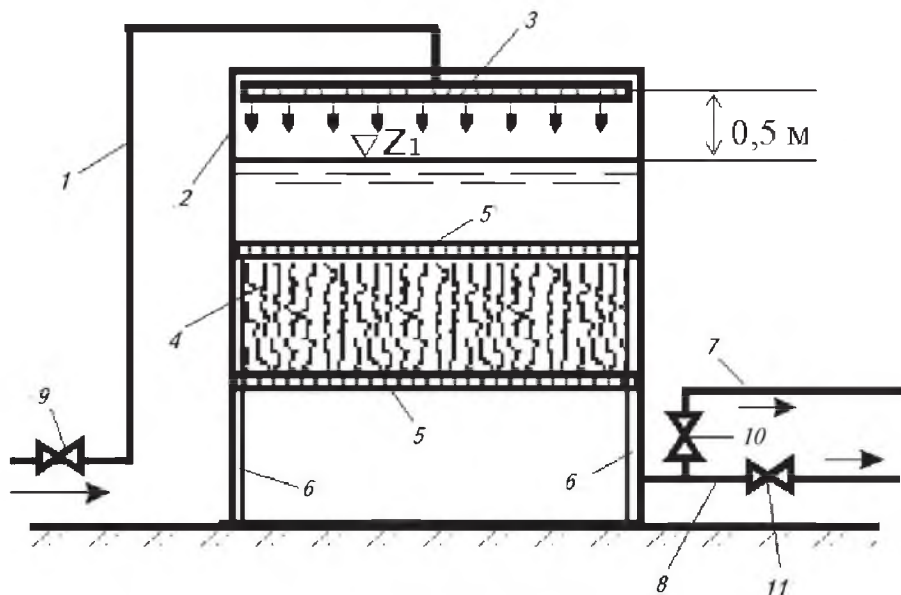


Рис. 1. *Схема біореактора:*

- 1 – подача вихідної води; 2 – корпус біореактора; 3 – аератор;
 4 – волокнисте завантаження; 5 – колосникова решітка;
 6 – опорні стійки; 7 – відведення попередньо обробленої води;
 8 – скидання промивної води; 9–11 – засувки

Мікроорганізми, які населяють біоплівку, окислюють речовини, що знаходяться у вихідній воді, киснем повітря, отримуючи при цьому енергію для своєї життєдіяльності (рис. 2) У результаті цих процесів з води видаляються органічні речовини, залізо тощо та збільшується маса активної біоплівки (від 1 до 3 мм), виникають анаеробні процеси розкладу біоплівки з виділенням газів (CO_2 , H_2S , CH_4), які сприяють відторгненню біоплівки від ниток завантаження, але відразу з'являється нова біоплівка, завдяки чому біореактор (БР) постійно перебуває у робочому стані.

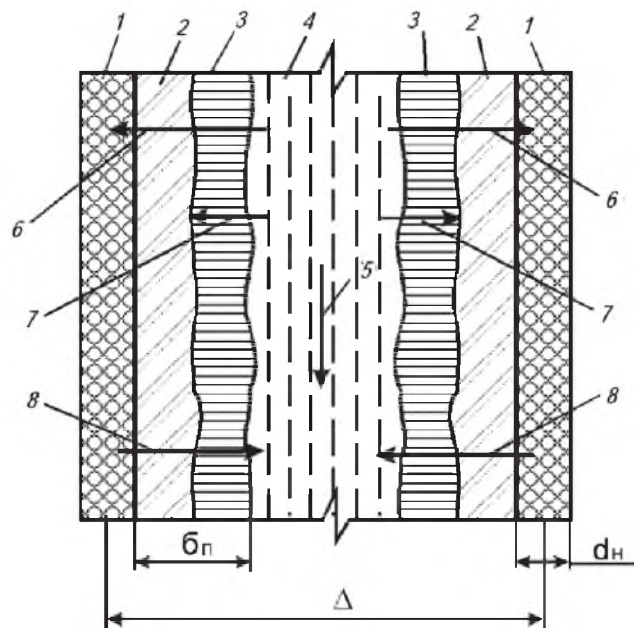


Рис. 2. *Схема обміну речовин в елементарному шарі БР:*

- 1 – волокнисті нитки завантаження; 2 – анаеробна зона біоплівки; 3 – аеробна зона біоплівки; 4 – вихідна вода; 5 – напрямок руху води в БР; 6 – надходження органічних речовин до біоплівки; 7 – надходження кисню; 8 – видалення з біоплівки продуктів біологічного очищення води

Методика досліджень. Ефективність роботи БР залежить від рівномірності та щільності упакування волокнами його поперечного перерізу. Нами встановлено залежності для визначення коефіцієнта упакування БР нитками волокнистого завантаження залежно від його форми в плані (рис. 3).

Коефіцієнт упакування БР волокнами визначається за формулами:

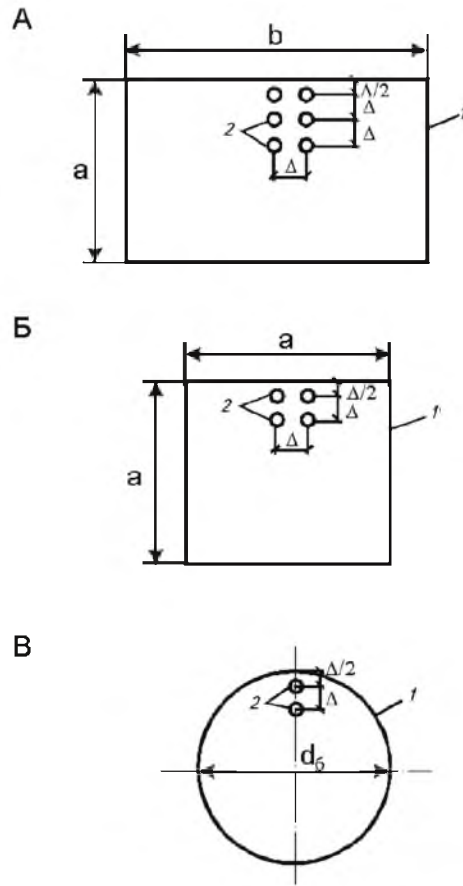


Рис. 3. *Схема рівномірного розміщення ниток волокнистого завантаження в поперечному перерізі БР:*

A – прямокутної форми; *Б* – квадратної форми; *В* – циліндричної форми; *1* – корпус БР; *2* – нитки волокнистого завантаження

а) для БР прямокутної форми

$$\alpha = \frac{\omega_H}{ab} \left(\frac{a}{b} - 1 \right) \left(\frac{b}{\Delta} - 1 \right); \quad (1)$$

б) для БР квадратної форми

$$\alpha = \omega_H \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{a} \right)^2; \quad (2)$$

в) для БР циліндричної форми

$$\alpha = \omega_H \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{d_6} \right)^2. \quad (3)$$

У цих формулах: a і b – розміри сторін поперечного перерізу БР прямокутної форми; d_0 – діаметр БР циліндричної форми; Δ – відстань між осями ниток волокнистого завантаження; ω_n – площа поперечного перерізу однієї нитки.

Пористість волокнистого завантаження визначають за формулою:

$$P = 1 - \alpha . \quad (4)$$

У процесі фільтрування води пористість БР зменшуватиметься за виразом:

$$P_t = 1 - \omega_{n,t} / \Delta^2 = P_o - \Delta P_t , \quad (5)$$

де P_o і P_t – пористість БР відповідно на початку фільтроциклу і через t год роботи; ΔP_t – зменшення цієї пористості на момент часу t внаслідок обростання ниток біоплівками; $\omega_{n,t}$ – середня площа поперечного перерізу однієї нитки в цей момент.

Величину ΔP_t знаходять з формули:

$$\Delta P_t = \pi/4 (\delta_{n,t} / \Delta)^2 , \quad (6)$$

де $\delta_{n,t}$ – товщина біологічної плівки навколо нитки на момент часу t .

БР виконують роль повітровіддільників, площу яких необхідно брати з розрахунку швидкості руху низхідного потоку води не більше 0,05 м/с та тривалості перебування води в ньому не менше 1 хв [3].

Виходячи з цих вимог, можна записати

$$Q_p / 3600 \omega_0 \leq 0,05, \quad (7)$$

звідки

$$180 (\omega_0 - N\omega_{н.т}) \geq Q_p, \quad (8)$$

де Q_p – розрахункова витрата води через БР, м³/год; ω_0 – вільна площа поперечного перерізу БР, через яку проходить вода, м².

Після перетворення виразу (8) для БР з прямокутною формою поперечного перерізу отримали залежність для визначення граничної швидкості руху води:

$$\frac{\pi(a - \Delta)(b - \Delta)(d_H + \delta_n)}{4\Delta^2} \leq ab - \frac{Q_p}{180}, \quad (9)$$

де d_H – діаметр чистої нитки завантаження.

Приймаємо $a - \Delta \approx a$ і $b - \Delta \approx b$. Тоді отримуємо такі граничні умови роботи БР:

$$\frac{\pi \left(\frac{d_H + \delta_n}{\Delta} \right)^2}{4} \leq 1 - \frac{V_p}{180}, \quad (10)$$

де V_p – розрахункова швидкість руху води через БР, м/год.

Для забезпечення необхідного часу перебування води в БР тривалістю $t_p \geq 1$ хв його висота повинна бути не меншою

$$H_0 \geq \frac{Q_p t_p}{60\omega_0}, \text{ м.} \quad (11)$$

За граничної швидкості руху води в БР $V_{ip} = 0,05$ м/с ця висота має бути не меншою $H_0 \geq 3$ м.

Після інтенсивної аерації вихідна вода з поверхневої водоїми надходить у БР і рівномірно розподіляється між нитками волокнистого завантаження, обтікаючи їхню поверхню, на якій утворюється біоплівка з аеробними мікроорганізмами Z (рис. 2), що споживають розчинені у воді органічні забруднення. При цьому відбуваються такі процеси, як адгезія, сорбція, дифузія, деструкція, окислення тощо, внаслідок чого протікає швидке споживання речовин, що легко окислюються, та утворення нових речовин [4, 5].

Для математичного описання цих процесів потрібно встановити баланс зміни концентрації забруднень у біоплівці, рідкій плівці та об'ємі вихідної води, що знаходиться між волокнистими нитками та рухається в ньому зверху вниз (рис. 4).

Навколо кожної волокнистої нитки діаметром d_n з'являється біологічна плівка 2 товщиною b_n , а біля поверхні біоплівки утворюється тонкий ламінарний шар 3 (рідка плівка) товщиною b_p .

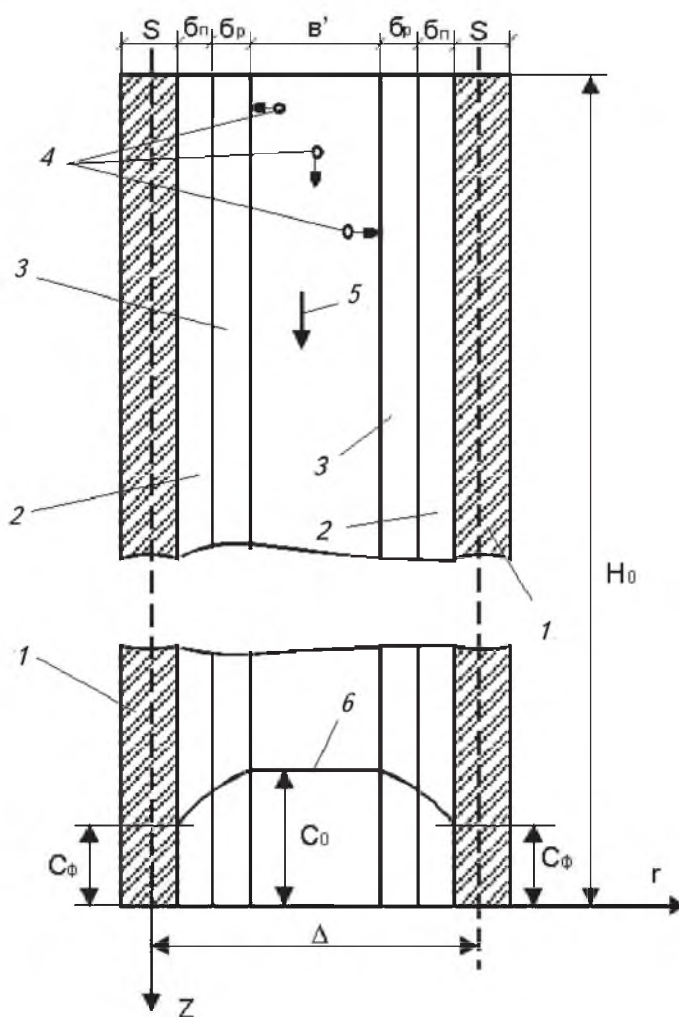


Рис. 4. Схема режиму біологічного очищення води в БР з волокнистим завантаженням:

1 – волокнисті нитки завантаження; 2 – біологічна плівка; 3 – рідка плівка; 4 – домішки органічних речовин у вихідній воді; 5 – напрямок руху води; 6 – еюра розподілу концентрації забруднень

Площу біоплівки в 1 п.м БР знаходять за формулою:

$$F_6 = \pi d_H N, \text{ м}^2/\text{м}, \quad (12)$$

де N – кількість ниток завантаження в БР, яка залежить від форми його поперечного перерізу (рис. 2):

- для прямокутної форми

$$N = \left(\frac{a}{\Delta} - 1 \right) \left(\frac{b}{\Delta} - 1 \right); \quad (13)$$

- для квадратної форми

$$N = \left(\frac{a}{\Delta} - 1 \right)^2; \quad (14)$$

- для циліндричної форми

$$N = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_6}{\Delta} - 1 \right)^2. \quad (15)$$

Оскільки розміри БР a , b і d_6 значно більші величини Δ , то після алгебраїчних перетворень площу біоплівки в 1 п.м БР можна визначати за формулою:

$$F_6 = \frac{\pi d_H \omega_6}{\Delta^2}, \text{ м}^2/\text{м}, \quad (16)$$

де ω_6 – площа поперечного перерізу БР, м^2 .

При складанні рівнянь матеріального балансу, записаних відносно концентрації забруднень, приймаються припущення, описані в роботі [5], що дає можливість отримати таку залежність:

$$P \frac{\partial C_e}{\partial t} = -V_\phi \frac{\partial C_e}{\partial z} - \frac{K_c F_6}{\omega_6} (C_e - C_6), \quad \frac{\text{г}}{\text{дм}^3 \cdot \text{год}}, \quad (17)$$

де V_ϕ – швидкість фільтрування води в БР, $\text{м}/\text{год}$; P – пористість фільтрувального завантаження БР; C_e і C_6 – концентра-

ція субстрату у вихідній воді відповідно у порових каналах БР і на межі рідкої плівки та біоплівки, г/м^3 ; $\frac{\partial C_e}{\partial t} \frac{\partial C_e}{\partial z}$ — зміна концентрації субстрату відповідно за часом та по шляху фільтрування води в БР; K_c — коефіцієнт масопереносу субстрату в рідкій плівці, м/год ; F_6 — загальна площа біоплівки БР висотою 1 м, $\text{м}^2/\text{м}$; ω_6 — площа поперечного перерізу БР, через яку рухається вихідна вода, м^2 .

Пористість волокнистого завантаження визначають за формулою (5), а площу біоплівки в 1 п.м БР — за формулою (16).

Отже, для БР з волокнистим фільтрувальним завантаженням можна записати:

$$\left(1 - \frac{\omega_{H,t}}{\Delta^2}\right) \frac{\partial C_e}{\partial t} = -V_\phi \frac{\partial C_e}{\partial z} - \frac{K_c \pi d_H}{\Delta^2} (C_e - C_6), \quad \frac{\text{г}}{\text{дм}^3 \cdot \text{год}}. \quad (18)$$

У результаті розв'язання рівняння (18) відносно C_e отримано залежність для визначення концентрації субстрату за висотою фільтра H_6 :

$$C_{e(z,t)} = C_0 e^{-\bar{z}}, \quad \text{г/м}^3, \quad (19)$$

де C_0 — концентрація субстрату у вихідній воді на вході в БР, г/м^3 ; \bar{z} — параметр, який характеризує інтенсивність зміни концентрації субстрату на межі поділу плівок за висотою БР:

$$\bar{z} = z \frac{A_0}{V_\phi}, \quad (20)$$

де A_0 — параметр, що характеризує умови біосорбції в БР:

$$A_0 = \frac{K_c \pi d_H}{\Delta^2} \left(1 - \frac{C_6}{C_e}\right), \quad \text{год}^{-1}. \quad (21)$$

На виході з БР $z = H_6$. Тоді

$$C_{\phi} = C_0 e^{-\bar{H}_0}; \quad (22)$$

$$\bar{H}_0 = H_0 \frac{A_0}{V_{\phi}}. \quad (23)$$

Записавши залежність (23) відносно H_0 , отримаємо такі вирази для визначення необхідної висоти БР H_0 або при відомій величині H_0 для визначення якості води C_{ϕ} , що виходить з БР:

$$H_0 = \frac{V_{\phi}}{A_0} \ln \frac{C_0}{C_{\phi}}, \text{ м}, \quad (24)$$

$$C_{\phi} = \frac{C_0}{\exp \frac{A_0 H_0}{V_{\phi}}}, \quad \frac{\text{гБСК}}{\text{м}^3}. \quad (25)$$

Результати досліджень. Як бачимо з формули (24), необхідна робоча висота завантаження БР залежить від розрахункової глибини очищення води (C_0/C_{ϕ}), прямо пропорційна швидкості фільтрування води V_{ϕ} і обернено пропорційна величині параметра A_0 , що визначається за формулою (21), яка після перетворень матиме вигляд:

$$A_0 = A \cdot B, \text{ год}^{-1}; \quad (26)$$

де A – параметр, що характеризує процес масопереносу між волокнистими нитками БР:

$$A = K_c \left(1 - \frac{C_0}{C_e} \right), \text{ м/год}; \quad (27)$$

B – параметр, що характеризує геометричне середовище волокнистого завантаження і дорівнює відношенню довжини лінії навколо однієї нитки завантаження до квадрата відстані між їхніми осями:

$$B = \frac{\pi d_H}{\Delta^2}, \text{ м}^{-1}. \quad (28)$$

Отже, зі збільшенням кількості ниток в одиниці об'єму волокнистого завантаження БР величина Δ зменшуватиметься, тобто параметри B і A_0 збільшуватимуться, а потрібна висота БР згідно з формулою (24) буде меншою.

У процесі експлуатації БР унаслідок утворення біоплівки товщиною b_n зовнішній діаметр однієї нитки збільшуватиметься:

$$d_H' = d_H + 2(b_n + b_p), \text{ мм}, \quad (29)$$

а отже, параметри B і A_0 також будуть збільшуватись, тобто при стабільних значеннях величин H_6 , V_ϕ і C_0 параметр C_ϕ згідно з формулою (25) зменшуватиметься, а значить, ефективність роботи БР буде збільшуватись:

$$E = \frac{C_0 - C_\phi}{C_0} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1}{\exp \frac{ABH_6}{V_\phi}} \right) 100\%. \quad (30)$$

Для виконання розрахунків можна користуватись орієнтовними значеннями вихідних констант і коефіцієнтів, визначених у спеціальній літературі [4–6]: $K_c = 0,025–0,080$ м/год, $A = 0,01–0,04$ м/год; $b_n = 0,1–0,2$ мм.

Висновки. 1. Ефективність роботи БР залежить від рівномірності та щільності упакування волокнами його поперечного перерізу. Пористість волокнистого завантаження БР визначають за формулою (5). 2. Для забезпечення видалення з води газів розміри БР повинні відповідати вимогам (8) і (11). 3. Необхідну робочу висоту волокнистого завантаження БР визначають за формулою (24), а його ефективність роботи – за формулою (30). 4. При збільшенні кількості волокон у поперечному перерізі БР ефективність очищення води під-

вищується, але при цьому зростає питома вартість БР. Тому його раціональні конструктивні й технологічні параметри слід визначати на основі техніко-економічних розрахунків.

1. Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. – К.: Аграрна наука, 2008. – 534 с.

2. Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П., Василюк А.В. Шляхи зменшення собівартості і поліпшення якості питної води в системах водопостачання: зб. матеріалів конф. «Екологія довкілля – 2008», 5–9 жовтня 2008 р., м. Партеніт (Крим). – К.: Тов. «Знання» України, 2008. – С.75–79.

3. Сільськогосподарське водопостачання. Зовнішні мережі і споруди. Норми проектування. ВБН 46/33-2.5-5-96. – К., 1996. – 152 с.

4. Christiansen P., Hollesen L., Harremoes P. Liquid film diffusion of reaction rate in submergen biofilters. Wat. Res, 1995, vol. 29, N 1. – P. 947–952.

5. Олейник А.Я., Василенко Т.В., Рыбаченко С.А., Хамад Ихаб Ахмад. Моделирование процессов доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод на фильтрах // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук.-техн. зб. / гол. ред. О.Я. Олійник. – К.: КНУБА, 2006. – С.85–97.

6. Henze M., Harremoes P., Jansen C., Arwin E. Wastewater Treatment – Springer – Berlin, New York, 2002. – 430 p.

Предложены математические зависимости для определения пористости волокнистой фильтрующей загрузки биореакторов (БР) различной формы в плане и их предельные конструктивные и технологические параметры для обеспечения оптимальных процессов очистки природных вод на этих сооружениях.

Mathematical dependences are offered for definition porosity of fibrous filtering loading bioreactors the various form in the plan both their limiting constructive and technological parameters for maintenance optimum processes of clearing natural waters on these constructions.