

DOI: 10.31073/mivg201801-121

Available (PDF): <http://mivg.iwvim.com.ua/index.php/mivg/article/view/121>

UDC 628.16:552.546

МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ БІОРЕАКТОРІВ ДЛЯ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ПРИРОДНИХ І ДООЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

П.Д. Хоружий¹, док. техн. наук, С.Р. Стасюк², Я.Б. Мосійчук³¹Інститут водних проблем і меліорації НААН Київ, Україна; e-mail: petro1939@bigmir.net²Інститут водних проблем і меліорації НААН Київ, Україна; e-mail: sr-stasyuk@ukr.net³Інститут водних проблем і меліорації НААН Київ, Україна; e-mail: y.mosiichuk@gmail.com

Анотація. Проаналізовано систему біологічного очищення води з різними домішками в ній при прямоточному русі води через послідовно взаємодіючі споруди: біореактор (БР) – контактний прояснювальний фільтр (КПФ). Розроблена методика інженерних розрахунків БР для забезпечення процесів насичення води киснем, видалення з води газів та біохімічного окиснення домішок, що перебувають у вихідній воді, за допомогою мікроорганізмів, іммобілізованих на волокнистому фільтрувальному завантаженні.

Ключові слова: біореактор, біологічна плівка, волокнисте завантаження, концентрація субстрату, пористість завантаження, якість води

Постановка задачі. Для інтенсифікації процесів очистки природних і стічних вод у системах сільськогосподарського водопостачання і водовідведення запропоновано [1] низку заходів, одними з яких є використання біологічних методів очищення води за допомогою прикріплених гідробіонтів у біореакторах з тонковолокнистим завантаженням, а також сил гравітації при висхідному русі скоагульованої води через плаваюче фільтрувальне завантаження.

Уперше підняв питання про доцільність застосування мікробіологічних методів для очищення природних вод професор П.І. Гвоздяк [2], який стверджує, що мікробіологічним методом можна очистити будь-яку забруднену воду, значно підвищити ефективність очищення води, поліпшити якість очищеної води та зменшити її собівартість.

Нині біологічні методи широко застосовуються для очищення природних і доочищення стічних вод [3-5]. При біологічному методі знезалізнення підземних вод специфічні залізобактерії *Gallionella ferruginea* завдяки своїй каталітичній дії швидко окиснюють Fe^{2+} , а отриманий гідроксид заліза $Fe(OH)_3$ накопичують у компактній формі, що значно збільшує брудомісткість КПФ і тривалість фільтроциклу.

Особливості роботи установки з БР і КПФ. Водоочисна установка для очищення природних або доочищення стічних вод (рис. 1) працює так [6]. Вихідна вода по трубі 1-а через аератор 2 подається на БР з волокнистим завантаженням 4, що закрі-

плюється між колосниковими решітками 5. При розбризкуванні води в аераторі 2 на дрібні крапельки і падіння їх з висоти не менше 0,5 м вода насичується киснем, що використовується мікроорганізмами іммобілізованими на волокнистому завантаженні, для окиснення домішок, що знаходяться у вихідній воді.

БР виконує такі функції:

- біохімічне окиснення домішок, що перебувають у вихідній воді;
- видалення з води газів для виключення пухирцевої кольматації у підфільтровому просторі 8 КПФ;
- забезпечення постійної швидкості фільтрування води протягом фільтроциклу завдяки підвищенню рівня води в ньому при зміні втрат напору на КПФ від $h_{\phi,0}$ (при чистому завантаженні) до $h_{\phi,max}$ (у кінці фільтроциклу).

На КПФ 7 відбувається глибоке очищення води при її висхідному русі через пінополістирольне завантаження 11. У підфільтровому просторі цього фільтра 8 накопичується осад з гідроксидної групи (при очистці природних вод) або активний мул (при доочищенні стічної води), який додатково бере участь в очищенні води, яка після висхідного фільтрування через пінополістирольне завантаження 11 збирається ковпачковим дренажем 12 і по трубопроводу 15 відводиться для подальшого використання.

Очищена вода відповідає нормативним показникам для фільтра даної конструкції і при даній швидкості фільтрування води V_{ϕ} , коли питома брудомісткість КПФ знаходиться

© П.Д. Хоружий, С.Р. Стасюк, Я.Б. Мосійчук, 2018

у межах між $G_{б, \min}$ до $G_{б, \max}$. Питомою брудомісткістю фільтра для даної швидкості фільтрування води називається кількість осаду, що припадає на 1 м^2 площі фільтра, $\text{кг}/\text{м}^2$.

При досягненні величини $G_{б, \max}$ і відповідних їй втрат напору у завантаженні $h_{ф, \max}$ (рис. 1) КПФ необхідно промивати. Для цього

закривають засувки 20, 22 і 24 та відкривають засувки 21 і 23. Промивна вода, рухаючись зверху вниз через пінополістирольне завантаження 11 вимиває з підфільтрового простору надлишок осаду $\Delta G = G_{б, \max} - G_{б, \min}$ і виносить його через дренажну систему 9 і трубопровід 17 у каналізаційну трубу 18.

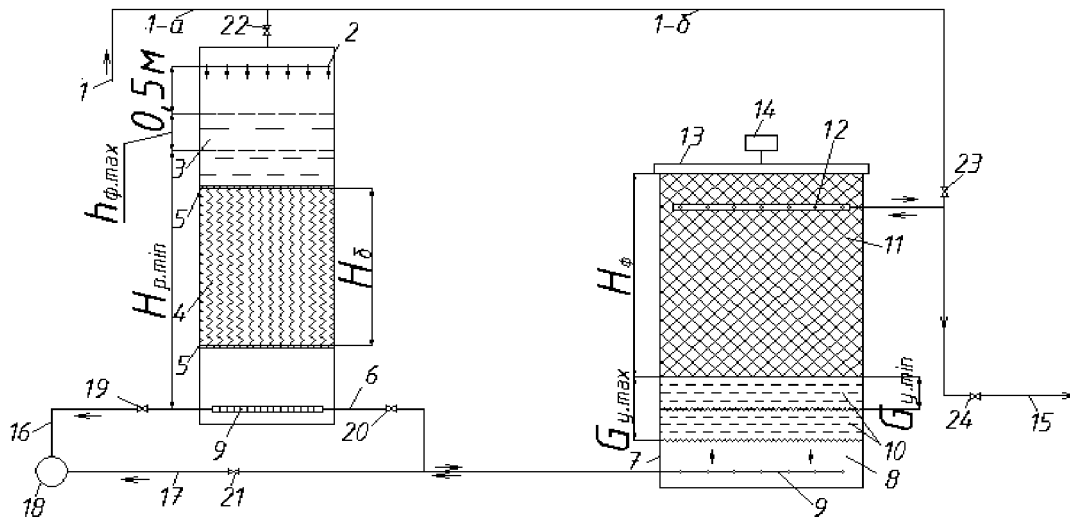


Рис. 1. Технологічна схема установки для очищення природних або доочищення стічних вод:

- 1 – подача вихідної води; 1-а – на БР; 1-б – для промивки КПФ; 2 – аератор; 3 – БР; 4 – тонковолокнисте завантаження; 5 – колосникові решітки; 6 – відведення води на КПФ; 7 – КПФ; 8 – підфільтровий простір; 9 – дренажно-водорозподільча система; 10 – осад (активний мул); 11 – плаваюче пінополістирольне фільтрувальне завантаження; 12 – ковпачковий дренаж; 13 – кришка; 14 – вантуз; 15 – відведення очищеної води; 16 – скидання осаду при промивці БР; 17 – те саме, при промивці КПФ; 18 – каналізаційна труба; 19 – 24 – засувки

Промивку КПФ з даною інтенсивністю $q_{пр}$ необхідно виконувати протягом розрахункового часу $t_{пр}$, щоб забезпечити нормативну якість фільтрованої води в наступному фільтроциклі його роботи.

Мета досліджень – розробити методику математичного моделювання процесів біологічного очищення природних і стічних вод на біореакторах та методи інженерних розрахунків цих споруд для визначення їх оптимальних конструктивних і технологічних параметрів.

Принцип роботи біореактора. Мікроорганізми, що населяють біоплівку, яка утворюється на поверхні ниток волокнистого завантаження, окиснюють речовини, що знаходяться у вихідній воді, киснем повітря, отримуючи при цьому енергію для своєї життєдіяльності (рис. 2).

Після інтенсивної аерації вихідна вода надходить в БР і рівномірно розподіляється

між нитками волокнистого завантаження, обтікаючи їх поверхню на якій утворюється біоплівка з аеробними мікроорганізмами. Одночасно відбуваються такі процеси як адгезія, сорбція, дифузія, деструкція, окиснення тощо, унаслідок чого протікає швидке видалення речовин, що окиснюються, та утворення нових речовин [7-9].

Математична модель та алгоритм інженерних розрахунків БР. Для математичного описання процесів очищення води на БР 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. 2).

Навколо кожної волокнистої нитки 1 діаметром d_n утворюється біологічна плівка 2 товщиною δ_n , а біля поверхні біоплівки утворюється тонкий ламінарний шар 3 (рідка плівка) товщиною δ_p .

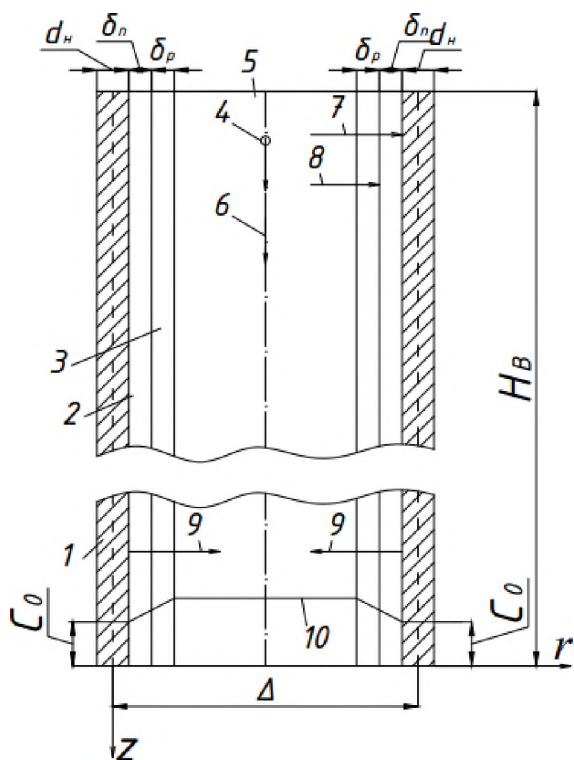


Рис. 2. Схема обміну речовин в елементарному шарі БР з волокнистим завантаженням:

1 – волокнисті нитки завантаження;

2 – біологічна плівка; 3 – рідка плівка; 4 – домішки у вихідній воді; 5 – вихідна вода; 6 – напрямку руху води; 7 – надходження домішок до біоплівки; 8 – надходження кисню; 9 – видалення з біоплівки продуктів біологічного очищення води;

10 – еюра розподілу концентрації забруднень;

H_B – довжина ниток волокнистого завантаження; d_n – діаметр волокон; δ_n і δ_p – товщина відповідно біоплівки і рідкої плівки; Δ – відстань між осями ниток у волокнистому завантаженні

Площа біоплівки в 1 м БР визначається за формулою:

$$F_6 = \pi d_n N, \text{ м}^2/\text{м} \quad (1)$$

де N – кількість ниток завантаження в БР, яка залежить від форми його поперечного перерізу (рис. 3) і відстані між осями ниток у волокнистому завантаженні Δ :

Коефіцієнти упакування БР волокнами визначаються за формулами [11]:

а) для БР прямокутної форми

$$\alpha = \frac{\omega_H N}{ab} \cdot \frac{(a-\Delta)(b-\Delta)}{\Delta \Delta} = \frac{\omega_H}{ab} \left(\frac{a}{\Delta} - 1 \right) \left(\frac{b}{\Delta} - 1 \right) \quad (2)$$

б) для БР квадратної форми

$$\alpha = \frac{\omega_H N}{a^2} = \frac{\omega_H}{a^2} \cdot \frac{(a-\Delta)^2}{\Delta^2} = \omega_H \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{a} \right)^2 \quad (3)$$

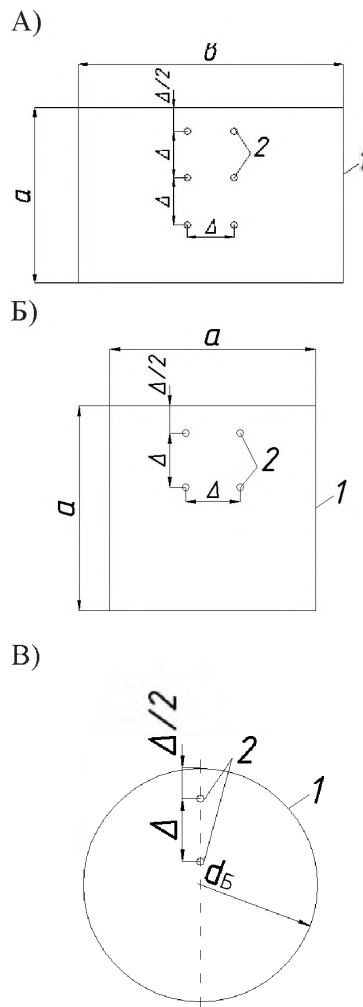


Рис. 3. Схеми рівномірного розміщення ниток волокнистого завантаження в поперечному перерізі БР:

А – прямокутної форми; Б – квадратної форми;

В – циліндричної форми; 1 – корпус БР;

2 – нитки волокнистого завантаження

в) для БР циліндричної форми

$$\alpha = \omega_H \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{d_6} \right)^2 \quad (4)$$

У цих формулах: a і b – розміри сторін поперечного перерізу БР прямокутної форми; d_6 – діаметр БР циліндричної форми; Δ – відстань між осями ниток волокнистого завантаження; ω_H – площа поперечного перерізу однієї нитки; N – кількість ниток у БР.

Пористість волокнистого завантаження визначається за формулою:

$$P = 1 - \alpha \quad (5)$$

У процесі фільтрування води пористість БР буде змінюватись за виразом

$$P_t = 1 - \omega_H / \Delta^2 = P_0 - \Delta P_0 \quad (6)$$

де P_0 і P_t – пористість БР відповідно на початку фільтроциклу і через t годин його роботи; ΔP_t – зменшення цієї пористості на момент часу t унаслідок обростання ниток біоплівками; ω_{Ht} – середня площа поперечного перерізу однієї нитки в цей момент.

Величина ΔP_t визначається за формулою:

$$\Delta P_t = \pi/4(\delta_m/\Delta)^2, \quad (7)$$

де δ_m – товщина біологічної плівки навколо нитки на момент часу t .

Оскільки розміри БР: a , b і d_6 (рис. 3) значно більші величини Δ , то після алгебраїчних перетворень площу біоплівки в 1 м БР можна визначати за формулою:

$$F_6 = \frac{\pi d_n \omega_6}{\Delta^2}, \quad (8)$$

де ω_6 – площа поперечного перерізу БР, м².

Потрібна кількість ниток в БР площею ω_6 з прийнятою відстанню між осями ниток Δ визначається за формулою:

$$N = \omega_6 / \Delta^2, \quad (9)$$

або при відомій кількості ниток N середня відстань між їх осями має бути:

$$\Delta = \sqrt{\omega_6 / N} \quad (10)$$

При складанні рівнянь матеріального балансу, записаних відносно концентрації забруднень, зміни яких відбуваються в БР, приймаються припущення, описані у спеціальній літературі [6, 7], що дало можливість отримати таку залежність:

$$P \frac{\partial C}{\partial t} = -V_\phi \frac{\partial C_e}{\partial z} - \frac{KcF_6}{\omega_6}(C_e - C_6), \text{ г/(дм}^3\text{год)} \quad (11)$$

де V_ϕ – швидкість фільтрування води в БР, м/год; P – пористість фільтрувального завантаження БР; C_e і C_6 – концентрація субстрату у вихідній воді, відповідно у порових каналах БР і на межі рідкої плівки та біоплівки, г/м³;

$\frac{\partial C}{\partial t}$ і $\frac{\partial C_e}{\partial z}$ – зміна концентрації субстрату, відповідно у часі та по шляху фільтрування води в БР; Kc – коефіцієнт масопереносу субстрату в рідкій плівці, м/год; F_6 – загальна площа біоплівки БР висотою 1 м, м²/м; ω_6 – площа поперечного перерізу БР, через яку рухається вихідна вода, м².

Пористість волокнистого завантаження визначається за формулою (6), а площа біоплівки в 1 м БР – за формулою (8).

Отже, для БР з волокнистим фільтрувальним завантаженням можна записати:

$$(1 - \frac{\omega_{Ht}}{\Delta^2}) \frac{\partial C_e}{\partial z} - V_\phi \frac{\partial C_e}{\partial z} - \frac{KcF_6}{\omega_6}(C_e - C_6), \text{ г/(дм}^3\text{год)} \quad (12)$$

У результаті розв'язання рівняння (12) відносно C_e отримано залежність для визначення концентрації субстрату по висоті фільтра H_6 :

$$C_{e(z,t)} = C_0 e^{-z} \quad (13)$$

де C_0 – концентрація субстрату у вихідній воді на вході в БР, г/м³; z – параметр, який характеризує інтенсивність зміни концентрації субстрату на межі поділу плівок по висоті БР:

$$z = z \frac{A_0}{V_\phi}, \quad (14)$$

де A_0 – параметр, що характеризує умови біосорбції в БР

$$A_0 = \frac{Kc \pi d_n}{\Delta^2} \left(1 - \frac{C_6}{C_e}\right), \text{ год}^{-1} \quad (15)$$

На виході з БР $z = H_0$. Тоді:

$$C_\phi = C_0 e^{-H_0}; \quad (16)$$

$$H_6 = H_0 \frac{A_0}{V_\phi} \quad (17)$$

Записавши залежність (17) відносно H_6 , отримаємо такі вирази для визначення необхідної висоти H_6 Нб або при відомій величині H_6 для визначення якості води C_ϕ , що виходить з БР:

$$H_6 = \frac{V_\phi}{A_0} \ln \frac{C_0}{C_\phi}, \text{ м} \quad (18)$$

$$C_\phi = C_0 / \exp \frac{A_0 H_6}{V_\phi}, \text{ г/м}^3 \quad (19)$$

Як бачимо з формули (18), необхідна робоча висота завантаження БР (рис.1) 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 (15), яка після перетворень має вигляд:

$$A_0 = AB, \text{ год}^{-1} \quad (20)$$

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

$$A = Kc \left(1 - \frac{C_6}{C_e}\right), \text{ м/год} \quad (21)$$

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

$$B = \frac{\pi d_n}{\Delta^2}, \text{ м}^{-1} \quad (22)$$

Отже, із збільшенням кількості ниток в одиниці об'єму волокнистого завантаження БР величина Δ буде зменшуватись, тобто параметри B та A_0 будуть збільшуватись, а потрібна висота БР згідно з формулою (18) буде меншою.

Інженерні розрахунки БР. БР виконують роль повітровідокремлювачів, площу яких необхідно приймати з розрахунку швидкості руху низхідного потоку води не більше 0,05 м/с та тривалості перебування води в ньому не менше 1 хвилини [12].

Розрахунки ведуть у такій послідовності:

- для розрахункової витрати води через БР Q_p , м³/год, прийнятої кількості ниток волокнистого завантаження N і площі поперечного перерізу однієї нитки ω_n , визначаємо площу поперечного перерізу БР:

$$\omega_0 = \frac{Q_p}{180} + N\omega_n, \text{ м}^2 \quad (23)$$

і швидкість руху води в БР:

$$V\phi = Q_p / \omega_0, \text{ м/год} \quad (24)$$

- для забезпечення необхідного часу перебування води в БР тривалістю $tp \geq 1 \text{ хв}$ його висота повинна бути не меншою (рис. 1)

$$H_{p.min} \geq \frac{Q_p t_p}{60\omega_0}, \text{ м} \quad (25)$$

При граничній швидкості руху води в БР $V_{sp} = 0,05 \text{ м/с}$ ця висота має бути не меншою $H_{p.min} \geq 3 \text{ м}$;

- для попередніх розрахунків приймаємо орієнтовні значення вихідних констант і коефіцієнтів, визначених у спеціальній літературі [7, 8]: $Kc = 0,025 - 0,080 \text{ м/год}$; $A = 0,01 - 0,04 \text{ м/год}$; $\delta_n = 0,1 - 0,2 \text{ мм}$;

- визначаємо параметр B за формулою (22), параметр A_0 за формулою (20) та величину H_0 за формулою (18);

- за даними лабораторних досліджень знаходимо максимальну питому брудомісткість БР, тривалість фільтроциклу у зоні накопичення забруднень та тривалість промивки БР при даній її інтенсивності;

- уточнюємо розрахункові величини H_0 і C_ϕ та ефективність очищення води на БР.

Висновки.

1. Необхідна робоча висота завантаження БР залежить від глибини очищення води C_0/C_ϕ , прямо пропорційна швидкості фільтрування води V_ϕ і обернено пропорційна кількості ниток в одиниці завантаження БР.

2. Розроблена методика інженерних розрахунків БР дозволяє визначати їх раціональні конструктивні і технологічні параметри, виходячи з вимог забезпечення необхідного часу перебування води в БР при граничній швидкості низхідного руху води та розрахункової ефективності очищення води від домішок.

Бібліографія

1. Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. Київ: Аграрна наука, 2008. 534 с.
2. Гвоздяк П.И. Микробиология и биотехнология очистки воды: *Quo vadit* // Химия и технология воды. 1989. №9. С. 854-858.
3. Grochmann A., Gollasch R., Chumacher G. Biologische enteisenung und entmanganung eines methanhaltigen grandwasser in speyer, *GWF. Wasser, Abwasser*. 1989. S. 441-447.
4. Badjo I., Mouches P. Technologies appropriées. L'exemple d'une grande installation de deferrisation biologique au Togo. – 38, №3 – P. 197-206
5. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод. Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. 622 с.
6. Патент на корисну модель № 122635. Станція для біологічного очищення господарсько-побутових стічних вод/П.Д. Хоружий, Я.Б. Мосійчук. 2018.
7. Christiansen P., Hollesen L., Harremoës P. Liquid film diffusion of reaction rate in submergen biofilters. *Wat.Res.*, 1995, vol. 29, №1. Pp. 947-952.
8. Henze M., Harremoës P., Jansen C., Arwin E. *Wastewater Treatment Springer*. Berlin, New York, 2002. 430 p.
9. Хоружий В.П. Кінетика висхідного фільтрування води на установках з волокнисто-пінопілістирольним завантаженням // Вісник інженерної академії України, №200. №2. С. 82-87.
10. Недашківський І.П. Очистка господарсько-побутових стічних вод на фільтрах з волокнисто-пінопластовим завантаженням : Дисертація канд. техн. наук: 05.23.04, Одес. держ. акад. буд-ва та архітектури. Одеса: 2015. 200 с.
11. Котельчук А.Л. Обґрунтування технології підготовки господарсько-побутових стічних вод для використання їх в системах зрошення : Дисертація канд. техн. наук: 06.01.02, Інститут гідротехніки і меліорації УААН. Київ: 2008. 159 с.

12.ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Київ: Мінрегіон України, 2013. 172 с.

References

1. Horuzhy, P.D., Khomutetska, T.P., & Horuzhy, V.P. (2009). *Resursozberihayuchi tekhnolohiyi vodopostachannya [Resource-saving water supply technologies]*. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
2. Gvozdyak, P.I. (1989). *Mikrobiologiya i biotekhnologiya ochistki vody: Quo vadit [Microbiology and biotechnology of water purification: Quo vadit]*. *Khimiya i tekhnologiya vody – Chemistry and technology of water*, 9, 854-858 [in Ukrainian].
3. Grochmann, A., Gollasch, R., & Chumacher, G. (1989). *Biologische enteisenung und entmanganung eines methanhaltigen grundwasser in Speyir [Biological de-icing and demanganization of methane-containing groundwater in Speyir]*. *GWF. Wasser, Abwasser – GWF. Water, Sewage*, 441-447 [in German].
4. Badjo, I., & Mouches, P. *Technologies appropriées. The exemple d'une grande installation de deferrisation biologique au Togo*. 38, 3, 197-206 [in English].
5. Kovalchuk, V.A. (2002). *Ochystka stichnykh vod [Waste water treatment]*. Rivne: VAT «Rivnens'ka drukarnya» [in Ukrainian].
6. Horuzhy, P.D., & Mosiychuk, Ya.B. (2018). *Patent na korysnu model' №122635. Stantsiya dlya biolohichnoho ochyshchennya hospodars'ko-pobutovykh stichnykh vod [Patent for Utility Model №122635. Station for biological treatment of household wastewater]*. Kyiv: Derzhavna sluzhba intelektual'noyi vlasnosti Ukrayiny [in Ukrainian].
7. Christiansen, P., Hollesen, L., & Harremoes, P. (1995). *Liquid film diffusion of reaction rate in submergen biofilters*. *Wat. Res.*, vol. 29, 1, 947-952 [in English].
8. Henze, M., Harremoes, P., Jansen, C., & Arwin, E. (2002). *Wastewater Treatment* Springer. Berlin, New York [in English].
9. Horuzhy, V.P. (2004). *Kinetyka vyskhidnoho fil'truvannya vody na ustanovkakh z voloknysto-pinopolistyrol'nyim zavantazhenniam [Kinetics of ascending filtering of water at installations with fiber-foam polystyrene loading]*. *Visnyk inzhenernoyi akademiyi Ukrayiny – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 2, 82-87 [in Ukrainian].
10. Nedashkivsky, I.P. (2015). *Ochystka hospodars'ko-pobutovykh stichnykh vod na fil'trakh z voloknysto-pinoplastovym zavantazhenniam [Cleaning of household sewage on filters with fiber-foam-type loading]*. *Candidate's thesis*. Odessa: State Academy of Civil Engineering and Architecture [in Ukrainian].
11. Kotelchuk, A.L. (2008). *Obgruntuvannya tekhnolohiyi pidhotovky hospodars'ko-pobutovykh stichnykh vod dlya vykorystannya yikh v systemakh zroshennya [Substantiation of technology for the preparation of household sewage for their use in irrigation systems]*. *Candidate's thesis*. Kyiv: Institute of Hydrotechnics and Land Reclamation of UAAS [in Ukrainian].
12. ДБН В.2.5-74:2013. (2013). *Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди [Water supply. External networks and facilities]*. Київ: Мінрегіон України [in Ukrainian].

П.Д. Хоружий, С.Р. Стасюк, Я.Б. Мосійчук

Методика инженерных расчетов биореакторов для биологической очистки природных и доочистки сточных вод

Проанализирована система биологической очистки воды с различными примесями в ней при проточном движении воды через последовательно взаимодействующие сооружения: биореактор (БР) – контактный осветлительный фильтр (КОФ). Разработана методика инженерных расчетов БР для обеспечения процессов насыщения воды кислородом, удаление из воды газов и биохимического окисления примесей, находящихся в исходной воде, с помощью микроорганизмов, иммобилизованных на волокнистой фильтровальной загрузке.

P.D. Horuzhy, S.R. Stasiuk, Ya.B. Mosiychuk

Method of engineering calculations of bioreactors for biological treatment of natural water and advanced treatment of sewage

The system «bioreactor (BR) – contact clarifying filter (CCF)» of biological water purification with various impurities in it in the case of direct water flow through successively interacting structures is analyzed. The method of engineering calculations of the BR that provides saturation of water with oxygen, gases removal from water, and biochemical oxidation of impurities present in the input water, with the help of microorganisms immobilized on fibrous filtering load, is developed.