

УДК 628.543.15:636

Ковальчук В. А., д.т.н., професор, Марчук Ю. В., магістрант, Ковальчук О. В., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДО ПИТАННЯ ПРО РОЗРАХУНОК МЕМБРАННИХ БІОРЕАКТОРІВ

Встановлено, що розрахунки мембранних біореакторів за методикою НДІ ВОДГЕО і за навантаженням на активний мул дають приблизно однакові результати, однак розрахунок за навантаженням більш простий і не потребує спеціального попереднього визначення необхідних коефіцієнтів і констант.

Ключові слова: мембранні біореактори, розрахунок за кінетикою окислення забруднень, розрахунок за навантаженням на мул.

Мембранний біореактор (МБР) є аеротенком із розділенням мулової суміші за допомогою ультрафільтраційних мембран. Основним елементом МБР є мембранні модулі із плоских, рулонних або капілярних (порожнистоволоконних) полімерних мембран. Мембранні модулі можуть занурюватися у мулову суміш безпосередньо в аеротенку (МБР із зануреним модулем) або бути розміщеними зовні аеротенка (МБР із зовнішнім модулем). Застосування МБР дозволяє: – виключити із технологічної схеми очистки стічних вторинні відстійники для гравітаційного розділення мулової суміші; – інтенсифікувати процес біологічної очистки в аеротенках за рахунок збільшення дози активного мулу до 15-20 г/дм³; – забезпечити ступінь очистки стічних вод на рівні норм скиду у водойми рибогосподарського призначення. Зазначені переваги роблять МБР найбільш ефективними сучасними спорудами для біологічної очистки стічних вод [1, 2, 3]. Хоча вітчизняне виробництво ультрафільтраційних мембран для МБР ще не налагоджене на український ринок поставляються мембрани, вироблені провідними закордонними фірмами, такими як Zenon, Kubota, Mitsubishi, Rayon, Norit, Huber, Memcor, Toray та іншими.

Не дивлячись на тривалий, більш ніж 15-річний, досвід застосування мембранних біореакторів у закордонній практиці і постійно збільшуване застосування МБР для очистки стічних вод в Україні, **донині відсутні вітчизняні методики** їх розрахунку. Частково, таке становище може бути пояснене переважно рекламним характером публікацій, присвячених МБР, у закордонній практиці. Будівництво очисних спо-

руд з МБР в Україні здійснюється шляхом закордонної розробки інжинірингових рішень та постачання відповідного імпортного обладнання. Не останню роль відіграють також відмінності у вітчизняних та закордонних методиках розрахунку власне аеротенків. Тому **метою даної роботи** є аналіз закордонних методик розрахунку мембранних біореакторів з метою вибору найбільш придатної для розрахунку МБР.

У загальному випадку розрахунок мембранних біореакторів полягає у розрахунку власне їх об'єму, витрати повітря та приросту мулу, визначенні продуктивності мембран за пермеатом та необхідної їх площі поверхні, встановленні режимів зворотної промивки мембран у процесі роботи, та режимів хімічних промивок мембран у процесі регенерації. У даній роботі автори обмежилися лише розглядом методик визначення об'ємів мембранних біореакторів.

В основі методики розрахунку аеротенків, закладеної у СНиП 2.04.03-85 і перенесеної у проект нових вітчизняних ДБН [4], лежать рівняння кінетики ферментативних реакцій. Головним параметром для розрахунку об'єму аеротенків є питома швидкість окислення забруднень стічних вод, яка визначається за модифікованим рівнянням бісубстратної ферментативної реакції, що враховує вплив продуктів метаболізму активного мулу [5].

Питома швидкість окислення забруднень, у мг БПК_{повн} на 1 г беззольної речовини активного мулу, при температурі 15 °C складає

$$\rho = \rho_{\max} \frac{L_{ex} C_o}{L_{ex} C_o + K_I C_o + K_o L_{ex}} \cdot \frac{1}{1 + \varphi a_i}, \text{ мг}/(\text{г} \cdot \text{год}), \quad (1)$$

де ρ_{\max} – максимальна швидкість окислення забруднень, яка становить для міських стічних вод 85 мг БПК_{повн}/(г.год); C_o – концентрація розчиненого кисню, мг/л; L_{ex} – БПК_{повн} очищених стічних вод, мг/л; K_I – константа, що характеризує властивості органічних домішок стічних вод, яка для міських стічних вод становить 33 мг БПК_{повн}/дм³; K_o – константа, що характеризує вплив кисню, яка складає для міських стічних вод 0,625 мг O₂/дм³; φ – коефіцієнт інгібування продуктами розпаду активного мулу, який становить для міських стічних вод 0,07 дм³/г; a_i – доза мулу, г/дм³.

Формула (1) використовується для розрахунку питомих швидкостей окислення забруднень при повній біологічній очистці стічних вод ($L_{ex} = 15$ мг/дм³) при дозах мулу до 5 г/дм³, однак другий множник у

цій формулі враховує вплив на швидкість окислення забруднень продуктів метаболізму активного мулу. При дозі активного мулу у мембранному біореакторі 20 г/дм³ значення згаданого множника становитиме 0,42, тобто внаслідок впливу продуктів метаболізму швидкість окислення забруднень має зменшитися більш ніж у два рази. Однак, наприклад, для випадку очистки в МБР стічних вод молокозаводу питома швидкість окислення забруднень становить за БПК₅ 6,23 мг/(г.год), що характерно для звичайних аеротенків [2]. Ця обставина вказує, зокрема, на необхідність коригування множника, що враховує вплив продуктів метаболізму мулу при його високих концентраціях.

У **методиці** розрахунку мембранних біореакторів, розробленої в **НДІ ВОДГЕО**, визначення питомої швидкості окислення забруднень здійснюється за рівнянням кінетики для випадку гальмування субстратом [6]

$$\rho = \rho_{\max} \frac{L_{ex}}{K_l + L_{ex} + L_{ex}^2 / K_l \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{1 + \varphi \alpha_i}, \text{ мг/(г.год)}. \quad (2)$$

На основі експериментальних досліджень роботи МБР, виконаних на міських стічних водах, були отримані кінетичні константи та коефіцієнти, значення яких наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Кінетичні константи і коефіцієнти для технологічного розрахунку аеротенків і мембранних біореакторів [6]

Найменування констант і коефіцієнтів	Одиниця вимірювання	Аеротенк	МБР
Максимальна швидкість окислення, ρ_{\max}	мг/(г.год)	22	43
Константа Міхаеліса, K_l	мг/дм ³	13	13
Константа гальмування субстратом, α	-	0,18	0,1
Коефіцієнт інгібування продуктами метаболізму активного мулу, φ	дм ³ /г	0,023	0,023

У **закордонній практиці** розрахунок мембранних біореакторів здійснюють за навантаженням на активний мул. Значення розрахункових параметрів та ефективність роботи мембранних біореакторів наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри та ефективність роботи мембранних біореакторів [7]

Найменування параметрів	Одиниця вимірювання	Значення параметрів
Об'ємне навантаження за ХПК	кг/(м ³ .добу)	1,2-3,2
Доза активного мулу: - за сухою речовиною - за беззольною речовиною	мг/дм ³ мг/дм ³	5000-20000 4000-16000
Навантаження на беззольну речовину мулу за ХПК	мг/(г.добу)	100-400
Тривалість перебування мулу	дів	5-20
Продуктивність за пермеатом	дм ³ /(м ² .добу)	600-1100
Вакуум	кРа	4-35
Концентрація розчиненого кисню	мг/дм ³	0,5-1,0
Концентрації забруднень в очищених стічних водах: - БПК ₅ - ХПК - NH ₃ - загальний азот	мг/дм ³ мг/дм ³ мг/дм ³ мг/дм ³	< 5 < 30 < 1 < 10

Порівняння двох розглянутих методик розрахунку мембранних біореакторів здійснювали на основі експериментальних даних, отриманих А.В. Киристеєвим на міських стічних водах [6]. Для виключення із розрахунків витрати очищуваних стічних вод і порівняння ефективності застосування мембранних біореакторів із звичайними аеротенками, розглядали відношення об'єму мембранних біореакторів до об'єму звичайного аеротенка. У варіанті із застосуванням мембранних біореакторів попереднє відстоювання очищуваних стічних вод не передбачалося (таблиця 3). Результати розрахунків наведені на рисунку.

Як слідує із отриманих результатів, вплив дози активного мулу на об'єм мембранних біореакторів, визначений за двома методиками розрахунку, має подібний характер. Із збільшенням дози мулу у мембранних біореакторах їх об'єм суттєво зменшується. При дозі мулу 20 г/дм³ за сухою речовиною об'єми мембранного біореактора становлять лише 8-33% від об'єму звичайного аеротенка при набагато вищій якості очистки стічних вод. Однак, автор роботи [6] приходить до висновку, що збільшувати дозу мулу в МБР вище 8 г/дм³ недоцільно через процеси самоокислення мулу, накопичення продуктів метаболізму та помітного погіршення умов масопередачі. При цьому об'єм мембранного біореактора буде становити приблизно половину від об'єму аеротенка, що не

повністю дозволить реалізувати його переваги. На відміну від методики ВНДІ ВОДГЕО, у іншій методиці розрахунку мембранних біореакторів гранична доза мулу встановлюється на рівні 20 г/дм³.

Таблиця 3

Вихідні дані до розрахунку мембранних біореакторів [6]

Вихідні дані	МБР без первинного відстійника	Аеротенк із вторинним відстійником
Завислі речовини у вихідній воді, мг/дм ³	154	154
Ефект відстоювання, частка одиниці	0	0,5
Завислі речовини на вході в аеротенк, мг/дм ³	154	77
ХПК вихідної води, мг/дм ³	260	260
БПК ₃ вихідної води, мг/дм ³	169	169
ХПК на вході в аеротенк, мг/дм ³	260	208
ХПК очищеної води, мг/дм ³	30	50
БПК ₃ на вході в аеротенк, мг/дм ³	169	135
БПК ₃ очищеної води, мг/дм ³	< 1	6
Доза мулу, г/дм ³	3-20	3
Зольність мулу, частка одиниці	0,3	0,3

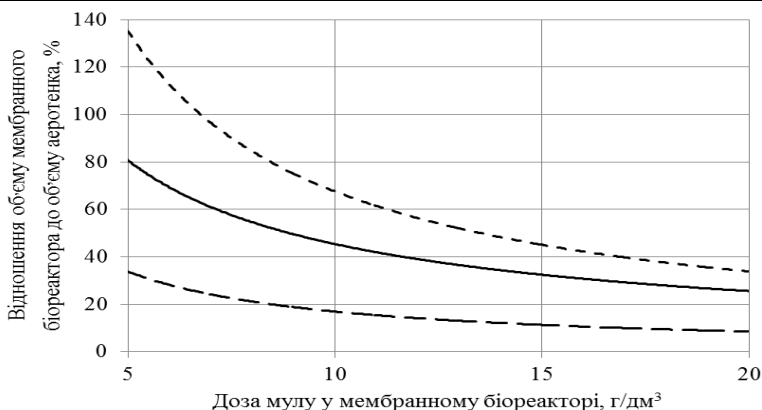


Рисунок. Залежність відношення об'єму мембранного біореактора до об'єму аеротенка від дози мулу в МБР. Розрахунки здійснювалися: 1, 3 – за навантаженням на беззольну речовину активного мулу за ХПК (значення, відповідно, 100 і 400 мг/(г.добу)); 2 – за методикою НДІ ВОДГЕО

Нескладні розрахунки показують, що крива 2, отримана за методикою ВНДІ ВОДГЕО, практично повністю співпадає із кривою, отриманою за навантаження на активний мул, яке становить 248 мг ХПК/(г.добу). Це дозволяє зробити декілька висновків. По-перше, методика розрахунку мембранних біореакторів за навантаженням на активний мул є більш універсальною і з достатньою точністю описує випадок очистки у мембранних біореакторах міських стічних вод. По-друге, ця методика є більш простою, не вимагає попереднього проведення спеціальних досліджень, необхідних для визначення максимальної швидкості окислення забруднь, константи Міхаеліса, константи гальмування субстратом і коефіцієнта інгібування продуктами метаболізму активного мулу тощо. По-третє, для випадку очистки у мембранних біореакторах характерні навантаження на активний мул за ХПК, властиві для аеротенків продовженої аерації.

Останній висновок підтверджується даними, наведеними у таблиці 4. При очистці міських стічних вод у мембранних біореакторах навантаження за ХПК на суху речовину активного мулу у більшості випадків знаходиться у межах 79-302 мг ХПК/(г.добу).

Таблиця 4

Параметри роботи мембранних біореакторів при очистці міських стічних вод

Доза мулу за сухою речовиною, г/дм ³	Зольність мулу, частка одиниці	Об'ємне навантаження за ХПК, г/(м ³ .добу)	Навантаження за ХПК на суху речовину активного мулу, мг/(г.добу)	Література
18-20	0,75	1700	89-94	[8]
12-18	-	1000-2000	100*	[9]
5,7-9	0,74-0,76	1200	133-210	[10]
9,2-9,5	0,65-0,76	2000	210-217	[10]
15,6-21,7	0,59-0,65	3300	152-212	[10]
10,4-22,0	0,67-0,68	2700	123-260	[10]
11,6-22,7	0,69-0,75	3500	154-302	[10]
9,0	-	1170	130	[11]
6,7-14,2	-	800-1700	120	[12]
12,0	-	1043	87	[13]
18-20	-	1200-1800	79*	[14]

*Отримані за середніми значеннями дози мулу та об'ємного навантаження за ХПК.

Висновки:

1. Методика розрахунку аеротенків, закладена у СНиП 2.04.03-85, при розрахунку мембранних біореакторів дає невірні результати, і, таким чином, не може застосовуватися.
2. Методика НДІ ВОДГЕО і методика розрахунку мембранних біореакторів за навантаженням на активний мул дають близькі результати, однак остання є більш простою, не вимагає попереднього визначення ряду коефіцієнтів і констант.
3. При розрахунку мембранних біореакторів за навантаженням на активний мул його значення може прийматися як для аеротенків продовженої аерації.

1. Judd S. The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment / S. Judd, C. Judd. – Elsevier, 2006. – 325 p.
2. Wang L.K. Advanced Biological Treatment Processes (Handbook of Environmental Engineering, Volume 9) / L.K. Wang, N.K. Shamma, Y-T. Hung. – Humana Press, 2009. – 738 p.
3. Ковальчук В. А. Использование MBR-технологий при строительстве и реконструкции сооружений для очистки сточных вод / В. А. Ковальчук, А. В. Ковальчук // Сотрудничество для решения проблемы отходов : Матер. VII Междунар. конф., (Харьков, 7-8 апреля 2010 г.). – X. : ЭкоИнформ, 2010. – С. 139-141.
4. «Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування» ДБН В.2.5 - ... : 201X. (Проект, друга редакція). – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012. – 213 с.
5. Биологическая очистка производственных сточных вод : процессы, аппараты и сооружения / С. В. Яковлев, И. В. Скирдов, В. Н. Швецов и др.; под ред. С. В. Яковлева. – М. : Стройиздат, 1985. – 208 с.
6. Киристаев А. В. Очистка сточных вод в мембранном биореакторе: автореф. Дис.. на соискание уч. Степени канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водоснабжение, канализация и строительные системы охраны водных ресурсов» / А. В. Киристаев. – М., 2008. – 27 с.
7. Tchobanoglous G. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse / G. Tchobanoglous, F. L. Burton, H. D. Stensel. – McGraw-Hill Professional, 2002. – 1848 p.
8. Naghizadeh A. Evaluation of Hollow Fiber Membrane Bioreactor Efficiency for Municipal Wastewater Treatment / A. Naghizaden, A. H. Mahvi, F. Vaezi, K. Naddafi // Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng. – 2008. – Vol. 5, No. 4. – P. 257-268.
9. Holler S. Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates / S. Holler, W. Trosch // Journal of Biotechnology. – 2001 (92). – P. 95–101.
10. Wang Z. Relationship between sludge characteristics and membrane flux determination in submerged membrane bioreactors / Z. Wang, Z. Wu, G. Yu, J. Liu, Z. Zhou // Journal of Membrane Science. – 2006. – Vol. 284, Issues 1–2, 1. – P. 87–94.
11. Grelot A. Evaluation of a novel flat sheet MBR filtration system / A. Grelot, A. Tazi-Paina, L. Weinrichb, B. Lesjeanc, A. Grasmickd // Desalination. – 2009. – 236. – P. 111–119.
12. Pollice A. Biomass growth and activity in a membrane bioreactor with complete sludge retention /

A. Pollice, G. Laera, M. Blonda. – Water Research. – 2004. – 38. – P. 1799–1808.
13. Blstakova A. Operation of the Biggest Membrane Waste Water Treatment Plant in Europe / A. Blstakova, N. Engelhardt, K. Drensla, I. Bodik // 36th International Conference of SSCHE. – May 25–29, 2009, Tatransk'e Matliare, Slovakia. – P. 142–151. **14.** Kwannate (Manoonpong) Sombatsompop. Membrane Fouling Studies in Suspended and Attached Growth Membrane Bioreactor Systems. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Technical Science in Environmental Engineering and Management. – Asian Institute of Technology, School of Environment, Resources and Development. – Thailand, May 2007. – 156 p.

Рецензент: д.т.н., професор Гіроль М. М. (НУБГП)

Kovalchuk V. A., Doctor of Engineering, Professor, Marchuk Y. V., Applicant, Kovalchuk O. V., Graduate Student (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

ON THE MEMBRANE BIOREACTOR CALCULATION

Found that the estimates of membrane bioreactors by the method NII VODGEO and load activated sludge yield similar results, but the calculation of the load easier and does not require the prior definition of the necessary coefficients and constants.

Keywords: membrane bioreactor, the calculation of the kinetics of oxidation of pollutants, the calculation for the load on sludge.

Ковальчук В. А., д.т.н., професор, Марчук Ю. В., магистрант, Ковальчук О. В., аспірант (Національний університет водного господарства и природопользования, г. Ровно)

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ МЕМБРАННЫХ БИОРЕАКТОРОВ

Установлено, что расчеты мембранных биореакторов по методике НИИ ВОДГЕО и по нагрузке на активный ил дают примерно одинаковые результаты, однако расчет по нагрузке более простой и не требует специального предварительного определения необходимых коэффициентов и констант.

Ключевые слова: мембранные биореакторы, расчет по кинетике окисления загрязнений, расчет по нагрузке на ил.
