

І. М. Чуб., Т. О. Шевченко

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕМБРАННИХ БІОРЕАКТОРІВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОБУТОВИХ СТІЧНИХ ВОД НА КАНАЛІЗАЦІЙНИХ ОЧИСНИХ СПОРУДАХ УКРАЇНИ

Розглянуто ефективність роботи мембранного біореактору (МБР) при очистці стічних вод біологічним методом. Представлено результати апробації МБР виробництва фірми «Альфа Лаваль» (Данія) для очистки побутових стічних. Вивчено механізм роботи МБР в умовах очистки реальних стічних вод, що дозволяє визначити умови використання МБР в технології біологічної очистки стічних вод.

Ключові слова: *очистка, мембрана, біореактор, мікрофільтрація, азот, фосфор, нітрифікація, денітрифікація, реагент*

Постановка проблеми

Сьогодні для очистки побутових стічних вод переважно використовуються традиційні схеми біологічних очисних споруд з різними варіаціями. Біологічна очистка в аеротенках та відділення очищеної води від активного мулу за допомогою відстоювання вважаються сьогодні економічно доцільними. Аналіз роботи систем водовідведення населених пунктів України показує, що рівень і якість очистки стічних вод є незадовільними, а в окремих регіонах України ці проблеми набули кризового характеру [1].

Загострення проблеми полягає в зростанні навантаження на водні ресурси внаслідок забруднення джерел водопостачання, оскільки основними забруднювачами є господарсько-побутові та промислові стічні води. Специфіка споруд каналізації така, що відмова в її роботі, а тим більше аварії, приносять не тільки економічний збиток, але і знижує природоохоронне значення цих об'єктів.

Основними проблемами очисних споруд водовідведення України є: тривалий період роботи від 20 до 55 років, а середній – 35 років (більшість очисних споруд побудовані в 1960–1980 роках). Понад 70 % споруд водовідведення потребують реконструкції [1].

Застосування наукового підходу і сучасних розробок в області біологічної очистки стічних вод дозволить вирішити проблему реконструкції очисних споруд водовідведення та очистки стічних вод в цілому. Одним з передових напрямів в цій області є застосування мембранних біореакторів (МБР), які набули широкого поширення в країнах Європейського Союзу, США, Японії та ін. [2–4].

Успіхи в розвитку мембранної технології, пов'язані з розробкою мембран і універсальних

мембранних апаратів нового покоління, дозволяють вирішити актуальну проблему – підвищити ефективність роботи господарсько-побутових очисних споруд при скороченні енергоспоживання та займаних площ.

Основними перевагами технології МБР від існуючої технології очистки є: відсутність необхідності первинного відстоювання (необхідне видалення волосся); можливість проведення біологічної очистки при високих концентраціях активного мулу (до 14 г/л), тоді як в класичній схемі концентрація мулової суміші 3–4 г/л; ультрафільтрація – неможливість проскоку за завислими речовинами; гравітаційний режим роботи і промивка без вилучення мембранних модулів з ємностей та без спорожнення ємностей.

Через прогнозований в майбутньому дефіцит площ, що відводяться під очисні споруди, і посилення нормативів, пропонувані до очищеного стоку, слід очікувати більш широкого використання технології МБР вже незабаром.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найбільш перспективною є технологія очистки стічних вод із застосуванням мембранного біореактора (МБР) [5]. В технології МБР процеси мікро- і ультрафільтрації поєднуються з аеробною біологічною очисткою стічних вод. Мембрани (трубчаті, половолоконні або плоскорамі) в біореакторі дозволяють видаляти з води забруднення з високою селективністю, завдяки чому очищена вода містить мінімальну кількість забруднюючих речовин.

В роботі [6] вказано, що протягом останніх двох десятиліть технологія мембранних біореакторів зайняла значну частку ринку в очищенні стічних вод. Очікується, що річні темпи зростання застосування МБР будуть вище, ніж у інших передових технологій

та інших мембранних процесів. Застосування аеробних МБР дозволить забезпечити повторне використання стічних вод. При цьому МБР є дуже компактними та ефективними системами для поділу завислих і колоїдних речовин, які здатні досягти найвищих стандартів якості стічних вод для дезінфекції та очистки. У разі роботи МБР утворюється менше надлишкового активного мулу в результаті того, що збільшується вік активного мулу. Внаслідок цього утворюється менше осадів, які відрізняються від осадів традиційних очисних споруд. Необхідно детально вивчити наслідки цього процесу для структури і метаболізму мікробних суспензій.

Авторами роботи [7] були вивчені особливості застосування технології МБР для очистки висококонцентрованих промислових стічних вод. В результаті аналізу експериментальних даних був зроблений висновок про те, що необхідно враховувати кілька факторів, щоб знайти відповідні робочі параметри для мембран. До них відносяться час роботи мембран до моменту забивання пір, розміри твердих часток, наявність поживних речовин для мікроорганізмів, трансмембранний тиск, гідравлічне навантаження тощо. Фактор забруднення мембран біомасою в МБР обов'язково повинен бути врахований, тому що саме він є основною проблемою, яка впливає на продуктивність МБР та якість стічних вод.

В роботі [8] розглянуто можливість застосування технології МБР для очистки стічних вод з можливим повторним їх використанням для технічних потреб підприємств. Проведено порівняння роботи декількох типів мембран, показані їх технічні та економічні переваги. Проблемою залишається питання утилізації утворюваного осаду, а також промивання і регенерація мембран при роботі з активним мулом.

Більш ніж 10-річний досвід роботи мембранних біореакторів проаналізовано в роботі [9]. Автори вказують на універсальність даного методу, як для очистки міських стічних вод, так і для очистки промислових стоків. Поєднання методу МБР зі зворотним осмосом дозволяє отримувати практично чисту воду, що не містить навіть розчинених домішок. Однак необхідно детально вивчити питання зміни характеристик активного мулу при роботі в МБР.

Авторами роботи [10] запропонована технологія застосування анаеробного мембранного біореактора. Дана технологія показала високу ефективність у зниженні потреби в хімічному кисні (ХПК), при цьому органічна речовина, яка видаляється, перетворюється в корисне джерело енергії – біогаз. Однак автори вказують на необхідність проведення подальших досліджень з вивчення деяких факторів,

що впливають на процес очистки. До них можна віднести скорочення часу гідравлічного утримування, видалення поживних речовин, видалення певних мікробних речовин. Також необхідно вивчити встановлення кількісних масових і енергетичних / економічних балансів та включення ефективного відновлення розчиненого метану.

Українські розробки по біомембранним технологіям були розпочаті близько семи – десяти років тому [13, 14]. В роботі [13] проаналізовані пілотні випробування МБР, виявлені фізіологічні особливості активного мулу. Автор вказує на ефективну роботу мембран і доцільність заміни традиційної схеми очистки «аеротенк – вторинний відстійник» на МБР. В роботі [14] досліджена доцільність застосування МБР. Виконано аналіз існуючих способів боротьби з закупоркою пір мембран в МБР і виділений найбільш ефективний з них. Однак авторами робіт мало приділено уваги протіканню процесів видалення біогенних елементів (азоту і фосфору). Не проаналізовано основні фактори, що впливають на нітри- і денітрифікацію та дефосфотацію стоків.

Формулювання мети статті

Метою проведення досліджень процесу біологічної очистки із застосуванням мембранного біореактору (МБР) було визначення робочих параметрів МБР для забезпечення стабільної та ефективної очистки стічних вод від сполук азоту та фосфору.

В ході проведення експерименту були поставлені такі завдання:

- виявити закономірності видалення сполук азоту та фосфору зі стічних вод при очищенні на МБР;
- встановити особливості роботи мембранного модуля виробництва фірми «Альфа Лаваль» (Данія) при різних режимах роботи біореактора за гідравлічним навантаженням;
- обґрунтувати ефективність і економічну доцільність застосування технології очищення стічних вод із застосуванням МБР.

Виклад основного матеріалу

Експериментальні дослідження проводились період з серпня по жовтень 2017 року. На тестовий мембранний біореактор виробництва фірми «Альфа Лаваль» (Данія) направлялися стічні води після механічної очистки (решітки, пісколовки, первинні відстійники) [15]. Далі в біореакторі стічні води проходять етапи денітрифікації, нітрифікації, в мембранній ємності розділяється мулова суміш. Відокремлені стічні води знезаражувались та прямували на скид у водойму.

Фільтрація мулової суміші проходить на мікрофільтраційних мембранах в мембранному модулі MFM100–25. Це мембрани зануреного типу, які встановлюються в ємність та працюють в гідростатичному режимі, тобто з мембран вода забирається безпосередньо під тиском стовпа рідини (без насосів). Стовп рідини над поверхнею мембрани (верхньою її частиною) становить приблизно 80 см. Це обладнання розроблено під стандартні розміри аеротенків глибиною 3–5 м.

Відмінними рисами роботи мембранного біореактора виробництва фірми «Альфа Лаваль» (Данія) є гравітаційний режим роботи (відсутність частини або всіх насосних груп) та промивка без вилучення мембранних модулів з ємностей та без спорожнення ємностей. Модульна установка МБР обладнана всім необхідним устаткуванням для нормальної експлуатації біореактора: насоси рециркуляції, повітродувки, ТМР – ємність, СІР – ємність, насос СІР промивання, регулюючі клапани, пробовідбірники, система автоматики.

Для розрахунків та налагодження роботи модульної установки МБР були прийняті параметри стічної рідини, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Якісні показники стічних вод

Показник	Значення в стоках, які надходять	Вимоги до скиду у водойму (ХелКом*)	Нормативний допустимий скид
Завислі речовини, мг/л	80–90	+0,25 до фону	7,25
ХПК, мг/л	200–300	15	30
БПК ₅ , мг/л	80–150	2	4
Азот амонійний, мг/л	16–22	0,4	Загальний азот – 10
Нітрати, мг/л	0,1–0,3	9	
Нітроти, мг/л	0,05–0,07	0,02	
Фосфор фосфатів, мг/л	2–4	0,2	Загальний фосфор – 0,5
Фосфор загальний, мг/л	2–5	–	
Температура, °C	20	20	20

Примітка: * – ХелКом – стандарт комісії Хельсінкі по скиданню очищених стічних вод у Балтійське море [16].

У процесі проведення випробувань режим роботи установки змінювався згідно з даними, наведеними у табл. 2.

Початковий період випробувань був проведений на високій витраті – 0,6 м³/год., далі в ході експерименту робота була виведена на найвищу витрату – 0,7 м³/год.

Продовження і завершення тестування проводилося за умов збереження стабільності результатів роботи біологічної очистки. Також в ході проведення робіт була проведена хімічна промивка мембрани методом циркуляції розчину реагенту в системі відведення чистої води мембрани.

Таблиця 2

Режим роботи установки в період проведення експериментальних досліджень (серпень – жовтень 2017 р.)

Номер досліджу	Витрата, л/год	Трансмембранний тиск, мм	Температура, °C	Площа мембрани, м ²
1	300	0–40	22,1	25
2	600	≈200	22,3	25
3	600	≈250	22,4	25
4	600	≈300	21,8	25
5	700	≈400	23,6	25
6	700	≈650	24,4	25
Хімічне промивання мембрани				
7	600	≈200	23,6	25
8	450	≈200	23,1	25
9	450	≈200	23,7	25
10	450	≈200	24,1	25
11	350	≈200	22,4	25
12	350	≈250	22,6	25
13	350	≈300	22,3	25
14	350	≈300	22,0	25
15	350	≈300	21,5	25
16	350	≈300	21,9	25
17	350	≈300	22,4	25
18	350	≈300	22,2	25
19	350	≈350	20,8	25

В якості реагенту використовували 15% -вий розчин гіпохлориту натрію 20 л на кожні 500–600 л чистої води. Промивання тривало протягом 3 годин.

Відбір проб для проведення аналізів до хіміко-бактеріологічної лабораторії очисних споруд проводився два рази на тиждень, а також в необхідні моменти для налагодження роботи установки. При проведенні аналізів використовувалися наступні методи хімічного аналізу: вимірювання показників PO₄³⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₃, ХПК, БПК₅ проводилось колориметричним (турбідиметричним) методом, за інтенсивністю забарвлення; завислих речовин –

гравіметричним методом за методикою виконання вимірювань (МВВ) [17].

Результати аналізу стоків, що надходять на очисні споруди, та очищених стічних вод (дані хіміко-бактеріологічної лабораторії очисних споруд) наведені в табл. 3–4.

У зв'язку з недостатнім видаленням сполук фосфору було прийнято рішення дозувати реагент до зони нітрифікації установки. В якості реагенту прийнятий 10% -ий розчин реагенту сульфату алюмінію, він дозувався насосом-дозатором, який входить до складу установки. Розрахункові дози були прийняті наступні:

- при концентрації фосфатів на вході приблизно 2,9 мг/л – доза реагенту 0,0406 л/год;
- при концентрації фосфатів на вході приблизно 3,3 мг/л – доза реагенту 0,0462 л/год.

Таблиця 3

Результати аналізу стічних вод, які надходять на МБР

Номер досліджу	На вході в мембранний біореактор, мг/л						
	ХПК	БПК ₅	Завислі речовини	NH ₄ ⁻ - N	NO ₃ ⁻ - N	NO ₂ ⁻ - N	PO ₄ ⁻ - P
1	408	180	293	15,5	3,40	0,98	4,6
2	158	80	40	24,7	0,11	0,01	3,2
3	172	103	27	22,2	0,11	0,01	3,5
4	206	120	29	25,3	0,11	0,01	3,1
5	–	–	–	–	–	–	–
6	256	141	31	28,1	0,11	0,01	4,3
7	–	–	–	–	–	–	–
8	–	–	–	–	–	–	–
9	253	87	102	21,9	0,14	0,05	2,6
10	212	103	41	20,4	0,12	0,01	3,8
11	–	–	–	–	–	–	–
12	218	119	20	28,4	0,11	0,05	3,7
13	245	166	41	31,5	0,11	0,04	3,4
14	280	191	96	30,8	0,12	0,01	–
15	238	157	36	30,2	0,11	0,01	–
16	269	130	75	32,1	0,13	0,04	–
17	–	–	–	–	–	–	–
18	257	–	72	24,2	0,11	0,01	3,2
19	214	–	42	26,7	0,11	0,01	3,6

Дозування реагенту було розпочато після 9 серії дослідів. Були отримані наступні результати роботи реагенту (табл. 5–6).

При підборі дози реагенту для видалення фосфатів спостерігалось пригнічення нітрифікації, що було викликано завищеною дозою реагенту (0,3 – 0,4 л/год замість 0,0462 л/год). При налагодженні роботи насоса-дозатора доза реагенту була обрана правильна і процес очистки стічних вод в зоні нітрифікації відновився.

Таблиця 4

Результати аналізу очищених на МБР стічних вод

Номер досліджу	На виході із мембранного біореактору, мг/л						
	ХПК	БПК ₅	Завислі речовини	NH ₄ ⁻ - N	NO ₃ ⁻ - N	NO ₂ ⁻ - N	PO ₄ ⁻ - P
1	18	2,9	<5	0,41	13,3	<0,01	4,40
2	22	0,7	<5	0,30	6,9	<0,01	3,00
3	20	0,9	<5	0,35	9,5	<0,01	3,20
4	–	–	–	–	–	–	–
5	29	1,0	<5	0,37	12,4	<0,01	4,0
6	–	–	–	–	–	–	–
7	16	–	<5	0,30	14,8	<0,01	3,20
8	17	–	–	0,30	11,6	<0,01	–
9	17	0,4	<5	0,53	10,0	<0,01	4,30
10	16	0,9	<5	–	3,5	<0,01	0,07
11	–	–	–	–	4,0	<0,01	–
12	17	1,0	<5	0,36	12,1	<0,01	0,50
13	13	0,3	<5	0,99	10,1	<0,01	0,05
14	13	0,7	<5	0,35	8,6	<0,01	–
15	17	0,2	<5	0,47	7,8	<0,01	–
16	14	0,4	<5	0,31	7,8	<0,01	–
17	–	–	–	0,47	–	–	2,90
18	13	–	<5	0,41	7,3	<0,01	2,20
19	10	–	<5	0,39	8,1	<0,01	1,7

Примітка: завислі речовини визначаються в лабораторії за МВВ, межа вимірювання якої 5 мг/л. Реальне значення досягнутого параметру – близько 1 мг/л.

Таблиця 5
Якісний склад стоків на вході в МБР при введенні реагенту

Номер досліду	На вході в мембранний біореактор, мг/л						
	ХПК	БПК ₅	Завислі речовини	NH ₄ ⁻ - N	NO ₃ ⁻ - N	NO ₂ ⁻ - N	PO ₄ ⁻ - P
10	212	103	41	20,4	0,12	0,01	3,8
11	-	-	-	-	-	-	-
12	218	119	20	28,4	0,11	0,05	3,7
13	245	166	41	31,5	0,11	0,04	3,4
14	280	191	96	30,8	0,12	0,01	-
15	238	157	36	30,2	0,11	0,01	-
16	269	130	75	32,1	0,13	0,04	-
17	-	-	-	-	-	-	-

Таблиця 6

Результати очистки стічних вод з введенням реагенту

Номер досліду	На вході в мембранний біореактор, мг/л						
	ХПК	БПК ₅	Завислі речовини	NH ₄ ⁻ - N	NO ₃ ⁻ - N	NO ₂ ⁻ - N	PO ₄ ⁻ - P
10	16	0,9	<5	13,6	3,5	<0,01	0,065
11	-	-	-	14,9	4,0	<0,01	-
12	17	1,0	<5	0,36	12,1	<0,01	0,5
Налагодження обладнання і призначення правильної дози реагенту та кисню в зоні нітрифікації							
13	13	0,3	<5	0,99	10,1	<0,01	0,047
14	13	0,7	<5	0,35	8,6	<0,01	-
15	17	0,2	<5	0,47	7,8	<0,01	-
16	14	0,4	<5	0,31	7,8	<0,01	-
17	-	-	-	0,47	-	-	-

Протягом вересня відбувалося налагодження процесу денітрифікації та досягнення концентрації нітратів на виході (6–11 серія дослідів). Завищені значення були пов'язані з великими концентраціями кисню в зоні нітрифікації (7–9 мг/л). Як наслідок, при рециркуляції в зону денітрифікації потрапляла підвищена кількість розчиненого кисню. Налагодження привело до зниження дози кисню в зоні нітрифікації до 2–3 мг/л і тоді був відновлений процес денітрифікації.

На рис. 1–2 наведені усереднені дані з ефективності очистки стічних вод на МБР за ХПК, БПК₅ та фосфатам. Були обрані серії дослідів з однаковим гідравлічним навантаженням на мембранну установку та прораховані середні

значення ефективності очистки стоків на МБР за вказаними забрудненнями. Дані для побудови графіків на рис. 3–4 наведені в табл. 7.

Таблиця 7
Усереднені дані ефективності очистки стічних вод на МБР залежно від гідравлічного навантаження

Номер досліду	Гідравлічне навантаження, л/год	Ефективність, %		
		за ХПК	за БПК ₅	за фосфатами
1	300	95,6	99,7	4,4
11–19	350	94,3	98,4	57,8
8–10	450	92,8	99,3	31,6
2–4, 7	600	89,5	99,3	1,6
5–6	700	88,7	99,3	7,0

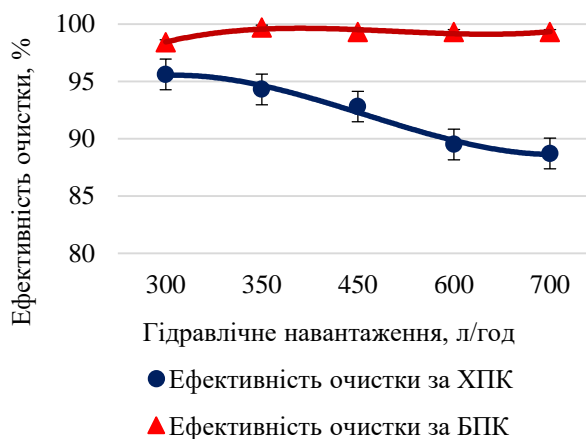


Рис. 1. Ефективність очистки стічних вод на МБР за ХПК та БПК залежно від гідравлічного навантаження

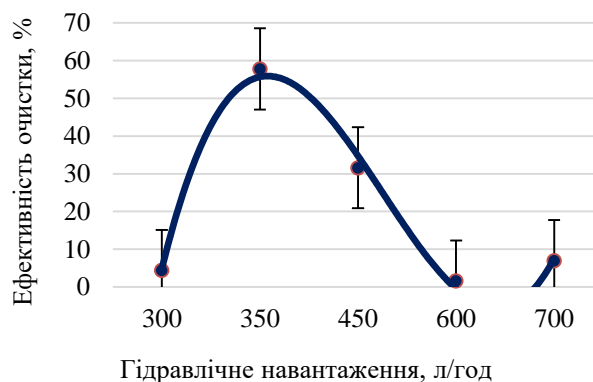


Рис. 2. Ефективність очистки стічних вод на МБР за фосфатами залежно від гідравлічного навантаження

З рис. 1 видно, що ефективність очистки за ХПК та БПК₅ зменшується зі збільшенням продуктивності мембран. Ефективність очистки за ХПК має менші значення через те, що органічні речовини, які не можуть бути окислені біологічним методом, ймовірно представлені в стоках у вигляді колоїдів, тому і затримуються мембраною. Висока ефективність видалення органічних речовин, що біологічно розкладаються в МБР, свідчить про повне протікання процесів біологічного окислення забруднень мікроорганізмами активного мулу.

Дані рис. 2 свідчать про нестабільність видалення фосфатів зі стічних вод на МБР незалежно від продуктивності модуля. Максимальне середнє значення ефективності 57,8% було отримано з урахуванням того, що в серії дослідів 11–19 проводилося дозування реагенту сульфату алюмінію.

Так як концентрація фосфатів в стоці без введення реагенту перевищувала встановлену межу на скид (табл. 4, досліди 1–9), то для інтенсифікації процесу дефосфатації дозували 10 % -вий розчин сульфату алюмінію з витратою 0,0406–0,0462 л/год. Дозування реагенту коливалося в межах 40–50 мг/л, воно залежить від вихідного вмісту фосфатів в стоках до очистки (табл. 5). На рис. 3 наведені порівняльні дані з видалення фосфатів при однаковому гідравлічному навантаженні на МБР в 350 л/год з додаванням реагенту (досліди 10, 12, 13) та без нього (досліди 17–19).



Рис. 3. Вміст фосфатів в очищених стічних водах після МБР

Аналіз рис. 3 показує, що введення реагенту дозволяє знизити концентрацію фосфатів в стічних водах до вимог на скид. При цьому ефективність видалення фосфатів зростає з 31,3–52,8 % до 86,5–98,5 %.

Вплив дози введеного реагенту на процес нітрифікації показано на рис. 4. Доза реагенту становила 300 мг/л та 40–50 мг/л. Гідравлічне навантаження на мембранну установку становило 350 л/год.

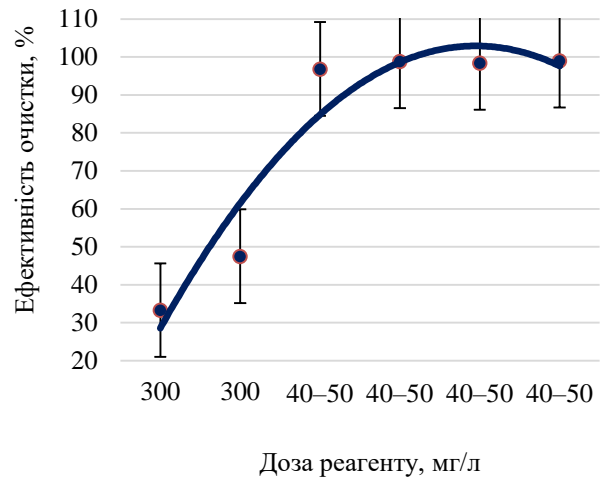


Рис. 4. Вплив дози реагенту сульфату алюмінію на процес видалення амонійного азоту

Аналіз рис. 4 дозволяє виявити наступне: підвищені дози реагенту сульфату алюмінію в 300 мг/л призвели до пригнічення мікроорганізмів активного мулу. Як наслідок цього було встановлено зниження швидкості окислення амонійного азоту до нітратів. Зменшення дози реагенту до 40–50 мг/л привело до відновлення життєдіяльності мікроорганізмів-нітрифікаторів та забезпечило ефективність очистки за амонійним азотом до 98,44–99,03 %.

Для оцінки економічної ефективності застосування мембранного біореактора на базі модульної установки MFM100–25 виробництва фірми «Альфа Лаваль» (Данія) було прораховано енергоспоживання всієї установки.

Споживання електроенергії склало 4,35 кВт·год, в тому числі:

- компресор для біологічних процесів – 0,7 кВт постійно;
- компресор для обдування мембран – 0,3 кВт постійно;
- мішалка для біологічних процесів – 0,4 кВт постійно;
- циркуляційний насос мембранна ємність – нітрифікація – 1,5 кВт в проміжках часу 2:1;
- циркуляційний насос мембранна ємність – денітрифікація – 1,5 кВт в проміжках часу 2:1.

Відповідно, питоме енергоспоживання пілотної мембрани складе $(0,3 \text{ кВт} \cdot 0,6 \text{ м}^3/\text{год}) = 0,18 \text{ кВт} \cdot \text{м}^3$ ($0,3 \text{ кВт} - \text{енергоспоживання окремої мембрани}; 0,6 \text{ м}^3/\text{год} - \text{продуктивність мембрани}$).

Площа мембранного модуля становить 154 м², відповідно загальне енергоспоживання модульної установкою складе $(0,3 \text{ кВт} \cdot 154 \text{ м}^2)/25 \text{ м}^2 = 1,8 \text{ кВт}$.

Споживання енергії біологічною системою очистки будується з споживання енергії повітрорудками для аерації активного мулу та споживання мішалкою в зоні денітрифікації. Також енергію витрачають насоси рециркуляції. При оцінці

даного типу енергоспоживання необхідно враховувати початкові якісні параметри стоку та його витрату. При роботі установки витрата електроенергії на біологічні процеси становила 0,18 кВт/м³. При цьому відомо, що питома витрата електроенергії при застосуванні традиційної біологічної очистки стічних вод в аеротенках коливається в межах 0,7–1 кВт/м³ і більше [18].

Висновки

1. При проведенні експериментальних досліджень з очистки стічних вод на МБР було виявлено, що процес нітрифікації залежить від повноти протікання біологічних процесів окислення. Концентрація амонійного азоту та нітратів в очищеному стоці залежить від вихідної концентрації цих забруднень в стічних водах, концентрації кисню в зоні нітрифікації. Також на ефективність протікання процесу нітрифікації впливає введення хімічних реагентів. Так, при проведенні досліджень спостерігалось пригнічення процесу нітрифікації за рахунок завищеної дози реагенту сульфату алюмінію. При дозі реагенту 40–50 мг/л та концентрації кисню 2–3 мг/л в зоні нітрифікації зменшення амонійного азоту при вихідному вмісті 30,2–32,1 мг/л, продуктивності модульної мембранної установки 350 л/год склала 98,5 %. Вміст нітратів в цьому випадку не перевищував установленого нормативу на скид та склав 7,8–8,6 мг/л.

Однак очистка стоків в МБР з видалення фосфатів показала низьку ефективність в 21,8 %. У зв'язку з цим проводилося дозування реагенту сульфату алюмінію з дозою 40–50 мг/л. Для ефективного протікання процесу дефосфатації (98,6 %) необхідно постійно дозувати реагент.

2. Встановлено, що при проведенні досліджень на мембранному модулі виробництва фірми «Альфа Лаваль» (Данія) при різному гідравлічному навантаженні на мембрани не виникало стрибків параметрів очистки стоків. Однак слід зазначити, що зі збільшенням гідравлічного навантаження на мембранний модуль до 700 л/год знижується фільтраційна здатність мембран. В цьому випадку ефективність за ХПК склала 88,7 %, за БПК – 99,3 %. Промивання мембран дозволило відновити фільтраційну здатність та забезпечити ефективність очистки за ХПК в 92,8 % при гідравлічному навантаженні 450 л/год.

3. У процесі апробації мембранного біореактора на базі модульної установки виробництва фірми «Альфа Лаваль» (Данія) для очистки побутових стічних вод обґрунтована ефективність застосування технології МБР. В процесі проведення досліджень було досягнуто режим очистки, що відповідає вимогам на скид.

Розрахунок питомого енергоспоживання (0,18 кВт/м³) на роботу мембранної установки показав економічну доцільність застосування МБР для очистки стічних вод у порівнянні з традиційною схемою очистки в аеротенках (0,7–1 кВт/м³). Для повного техніко-економічного порівняння технології МБР та традиційної біологічної очистки необхідно також враховувати й інші економічні чинники. Серед них можна виділити термін служби мембран, капітальні та експлуатаційні витрати.

Література

1. Вергун, О. М. Аналіз актуальних чинників погіршення якості питного водопостачання в контексті національної безпеки України. Аналітична записка [Електронний ресурс] / О.М. Вергун // Національний інститут стратегічних досліджень. - 2012. - Режим доступу: <http://www.niss.gov.ua/articles/1037/>.
2. Johansson, T. (2012). Application of membrane bioreactors in the pulp and paper industry. *Department of Earth Sciences, Geotryckeriet, Uppsala University, Uppsala*, 94.
3. Visvanathan, C., Ben Aim, R. Visvanathan, C. (2014) Membrane Bioreactor Applications in Wastewater Treatment. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/237597440_Membrane_Bioreactor_Applications_in_Wastewater_Treatment
4. Lei, Q., Zhang, M., Shen, L., Li, R., Liao, B.-Q., Lin, H. (2016). A novel insight into membrane fouling mechanism regarding gel layer filtration: Flory-Huggins based filtration mechanism. *Scientific Reports*, 6 (1). doi: 10.1038/srep33343.
5. Мурашев С. В. Опыт апробации технологии очистки сточных вод на основе мембранного биореактора [Текст] / С.В. Мурашев // *Водоснабжение и санитарная техника*. - 2016. - № 2. - ООО «Издательство ВСТ». - С. 52–57.
6. Delgado, S., Villaruel, R., Gonzalez, E., Morales, M. (2011). Aerobic Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment – Performance Under Substrate-Limited Conditions. *Biomass – Detection, Production and Usage*. doi: 10.5772/17409
7. Mutamim, N. S. A., Noor, Z. Z., Hassan, M. A. A., Yuniarto, A., Olsson, G. (2013). Membrane bioreactor: Applications and limitations in treating high strength industrial wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 225, 109–119. doi: 10.1016/j.cej.2013.02.131
8. Jyoti, J., Alka, D., Kumar, S. J. (2013). Application of Membrane-Bio-Reactor in Waste-Water Treatment: A Review. *International Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 3 (2), 115–122.
9. Lay, W. C. L., Lim, C., Lee, Y., Kwok, B. H., Tao, G., Lee, K. S. et. al. (2017). From R&D to application: membrane bioreactor technology for water reclamation. *Water Practice and Technology*, 12 (1), 12–24. doi: 10.2166/wpt.2017.008
10. Dvořák, L., Gómez, M., Dolina, J., Čermín, A. (2015). Anaerobic membrane bioreactors – a mini review with emphasis on industrial wastewater treatment: applications, limitations and perspectives. *Desalination and Water Treatment*, 57(41), 19062–19076. doi: 10.1080/19443994.2015.1100879
11. Wang, Y.-K., Sheng, G.-P., Shi, B.-J., Li, W.-W., Yu, H.-Q. (2013). A Novel Electrochemical Membrane Bioreactor as a

- Potential Net Energy Producer for Sustainable Wastewater Treatment. *Scientific Reports*, 3 (1). doi: 10.1038/srep01864
12. Нечитайло, Н. П. Применение технологии микро- и ультрафильтрации на стадиях биологической очистки и доочистки сточных вод [Текст] / Н.П. Нечитайло // Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения. - 2015. - Вып. 80. - С. 216–221.
 13. Трунов, П. В. Особенности процесса очистки сточных вод в погружных мембранных биореакторах [Текст] / П.В. Трунов // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сборник / Харьк. нац. акад. гор. хоз-ва. Харьков, - 2010. - Вып. 93. - С. 133–137.
 14. Сербов, В. О. Очистка промышленных сточных вод с использованием мембранных биореакторов [Текст] / В.О. Сербов // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». - № 12 (22), 1 т. - 2016. - С. 124–128.
 15. Shevchenko, T., Chub, I., Didrikh, D. (2018) Experimental study of the biological wastewater treatment process with the use of the membrane bio-reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/10 (93), 43-50.
 16. HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan – Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea (2013). Denmark, 19. Retrieved from: <http://www.helcom.fi/Documents/Ministerial2013/Ministerial%20declaration/2013%20Copenhagen%20Ministerial%20Declaration%20w%20cover.pdf>
 17. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений содержания взвешенных веществ и общего содержания примесей в пробах природных и очищенных сточных вод гравиметрическим методом. ПНД Ф 14.1:2.110-97 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.alppp.ru/law/okruzhayuschaja-sreda-i-prirodnye-resursy/ispolzovanie-i-ohrana-vod/6/kolichestvennyj-himicheskij-analiz-vod--metodika-vypolnenija-izmerenij-soderzhanij-vzveshe.html>.
 18. Снижение потребления электроэнергии в системах коммунального водоснабжения и водоотведения [Электронный ресурс] // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». - № 10. - 2004. - Режим доступа: http://journal.esco.co.ua/2004_10/art47.htm.
- ### References
1. Vergun, O. M. (2012) Analysis of the actual factors of deterioration of the quality of drinking water supply in the context of national security of Ukraine. Analytical note. *National Institute for Strategic Studies*. Retrieved from: <http://www.niss.gov.ua/articles/1037/>
 2. Johansson, T. (2012). Application of membrane bioreactors in the pulp and paper industry. *Department of Earth Sciences, Geotryckeriet, Uppsala University, Uppsala*, 94.
 3. Visvanathan, C., Ben Aim, R. Visvanathan, C. (2014) Membrane Bioreactor Applications in Wastewater Treatment. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/237597440_Membrane_Bioreactor_Applications_in_Wastewater_Treatment
 4. Lei, Q., Zhang, M., Shen, L., Li, R., Liao, B.-Q., Lin, H. (2016). A novel insight into membrane fouling mechanism regarding gel layer filtration: Flory-Huggins based filtration mechanism. *Scientific Reports*, 6 (1). doi: 10.1038/srep33343.
 5. Murashev, S. V., Solovyova, E. V., Shilova, N. K. (2016). Experience of approbation of wastewater treatment technology based on membrane bioreactor. *Water supply and sanitary engineering*, 2, 52–57.
 6. Delgado, S., Villarroel, R., Gonzalez, E., Morales, M. (2011). Aerobic Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment – Performance Under Substrate-Limited Conditions. Biomass – Detection, Production and Usage. doi: 10.5772/17409
 7. Mutamim, N. S. A., Noor, Z. Z., Hassan, M. A. A., Yuniarto, A., Olsson, G. (2013). Membrane bioreactor: Applications and limitations in treating high strength industrial wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 225, 109–119. doi: 10.1016/j.cej.2013.02.131
 8. Jyoti, J., Alka, D., Kumar, S. J. (2013). Application of Membrane-Bio-Reactor in Waste-Water Treatment: A Review. *International Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 3 (2), 115–122.
 9. Lay, W. C. L., Lim, C., Lee, Y., Kwok, B. H., Tao, G., Lee, K. S. et. al. (2017). From R&D to application: membrane bioreactor technology for water reclamation. *Water Practice and Technology*, 12 (1), 12–24. doi: 10.2166/wpt.2017.008
 10. Dvořák, L., Gómez, M., Dolina, J., Černín, A. (2015). Anaerobic membrane bioreactors – a mini review with emphasis on industrial wastewater treatment: applications, limitations and perspectives. *Desalination and Water Treatment*, 57(41), 19062–19076. doi: 10.1080/19443994.2015.1100879
 11. Wang, Y.-K., Sheng, G.-P., Shi, B.-J., Li, W.-W., Yu, H.-Q. (2013). A Novel Electrochemical Membrane Bioreactor as a Potential Net Energy Producer for Sustainable Wastewater Treatment. *Scientific Reports*, 3 (1). doi: 10.1038/srep01864
 12. Nechitailo, N. P. (2015). Application of micro- and ultrafiltration technology at the stages of biological treatment and post-treatment of wastewater. *Building, Material Science, Mechanical Engineering: Starodubov Readings*, 80, 216–221.
 13. Trunov, P. V. (2010). Features of the process of wastewater treatment in submerged membrane bioreactors. *Municipal economy of cities*, 93, 133–137.
 14. Serbov, V. O., Motronenko, V. V. (2016). Purification of industrial waste water using membrane bioreactors. *International scientific magazine "Internauca"*, 12 (1), 124–128.
 15. Shevchenko, T., Chub, I., Didrikh, D. (2018) Experimental study of the biological wastewater treatment process with the use of the membrane bio-reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/10 (93), 43-50.
 16. HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan – Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea (2013). Denmark, 19. Retrieved from: <http://www.helcom.fi/Documents/Ministerial2013/Ministerial%20declaration/2013%20Copenhagen%20Ministerial%20Declaration%20w%20cover.pdf>
 17. Quantitative chemical analysis of waters. Method of measuring the contents of suspended solids and the total content of impurities in samples of natural and treated wastewater by gravimetric method. HDPE F 14.1:2.110-97. (n.d.) Retrieved from: <http://www.alppp.ru/law/okruzhayuschaja-sreda-i-prirodnye-resursy/ispolzovanie-i-ohrana-vod/6/kolichestvennyj-himicheskij-analiz-vod--metodika-vypolnenija-izmerenij-soderzhanij-vzveshe.html>

18. Reduction of electricity consumption in public water supply and sanitation systems (2004). *Electronic Journal of Energy Service Company "Environmental Systems"*, 10. Retrieved from: http://journal.esco.co.ua/2004_10/art47.htm

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. С. Душкін, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Автор: ЧУБ Ірина Миколаївна
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова
E-mail - irina.chub@kname.edu.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5546-3286>

Автор: ШЕВЧЕНКО Тамара Олександрівна
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова
E-mail - tamara.shevchenko@kname.edu.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4513-6759>

POSSIBILITIES OF MEMBRANE BIOREACTORS APPLICATION FOR THE CLEANING OF DOMESTIC WATER TREATMENT ON THE CANALIZATIONAL EDUCATIONAL SPIRITS OF UKRAINE

I. Chub, T. Shevchenko

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The effectiveness of the membrane bioreactor (MBR) in the treatment of wastewater by a biological method is considered. Experimental studies were conducted on a test membrane bioreactor manufactured by Alfa Laval (Denmark). The process of biological treatment of wastewater using a membrane bioreactor makes it possible to intensify the operation of biological treatment facilities due to the lack of facilities for settling drains, increasing the dose of activated sludge to 12–13 g / l, the precipitation process is replaced by filtration, washing the membrane modules can be carried out without emptying the tanks and without withdrawal of modules from tanks. In the process of testing a membrane bioreactor on the basis of a modular unit manufactured by Alfa Laval (Denmark) for purification of domestic wastewater, a cleaning regime was achieved that meets the requirements for discharge.

The effectiveness of cleaning in the main indicators was: COD - 93%, BOD5 - 99%, suspended solids - 98.5%, ammonium nitrogen - 98.5%. For nitrates, the efficiency of MBR was 89% after adjusting the reagent dose (40–50 mg / l) and oxygen dose in the nitrification zone (2–3 mg / l). A phosphate efficiency of 98.6% was achieved after the introduction of aluminum sulfate reagent with a dose of 40–50 mg / l.

The conducted research allowed us to obtain a stable mode of operation of ICBMs with the provision of an efficient wastewater treatment process. The dependences of the efficiency of wastewater treatment on MBR by major pollutants (COD, BOD5, nitrogen and phosphorus compounds) are given. This allows you to achieve stringent requirements for the discharge of wastewater into water bodies and reduce the cost of treatment by reducing energy consumption.

The mechanism of the operation of MBR under conditions of purification of real wastewater is studied, which allows determining the conditions for using MBR in biological wastewater treatment technology.

Keywords: purification, membrane, bioreactor, microfiltration, nitrogen, phosphorus, nitrification, denitrification, reagent