

УДК 62-624.2

**ВЗАЄМОДІЯ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ТА МЕМБРАННИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ОЧИЩЕННЯ СТІЧНОЇ ВОДИ****В. М. МЕЛЬНИК**, доктор технічних наук, професор,<https://orcid.org/0000-0002-0004-7218>

E-mail: vmm71@i.ua

М. В. ШАФАРЕНКО, <https://orcid.org/0000-0001-9786-4574>

E-mail: nikolajsafarenko1@gmail.com

Ж. І. ОСТАПЕНКО, аспірант, <https://orcid.org/0000-0003-0949-9912>

E-mail: zhanna.ost@gmail.com

В. П. КОСОВА, <https://orcid.org/0000-0002-3441-6536>

E-mail: vera_62@ukr.net

Л. І. РУЖИНСЬКА, кандидат технічних наук, доцент<https://orcid.org/0000-0003-1223-7649>

E-mail: ruzhli@ukr.net

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського[https://doi.org/10.31548/dopovidi6\(106\).2023.002](https://doi.org/10.31548/dopovidi6(106).2023.002)

Анотація. Розглянуто поєднання технологій мікробіологічної та мембранної очистки стічної води від органічних речовин різного походження. Запропоновано експериментальну установку мембранно-дистиляційного біореактора. При проведенні запропонованої очистки стічної води в одному апараті, процес протікає в два етапи. На першому етапі відбувається біологічна очистка при анаеробних умовах отримання біогазу, а на другому – доочищення з використанням мембранної дистиляції на ультрафільтраційних мембранах. Аналізується анаеробне очищення стічної води по горизонтальних каналах шляхом пропускання через носії – тонколистові фільтрувальні завантаження (дренажі), на яких розташовані іммобілізовані мікроорганізми, що утворюють шар біоплівки. Анаеробне очищення супроводжується одержанням біогазу, який збирають і відводять в спеціальний резервуар. Під дією бактерій при ацетогенній фазі, із утворених в попередній фазі речовин, додатково виробляється оцтова кислота, яка при метаногенезі розкладається на метан, вуглекислий газ та воду. Показано, що ультрафільтраційні мембрани використовуються в якості доочищення стічної води. Доведено, що стічна вода дифундує через дренаж під дією перепаду тиску у 200 мм.вод.ст. та за температури 35-38 °С. Окреслено, що вода, яку очищають, може мати великий вміст органічних речовин від 100 до 10⁴ мг•домішок/л•води. В результаті протікання анаеробного процесу, з'ясовано вихід біогазу, який складає від 0,1 до 6 м³ біогазу/(м²•доба) в залежності від вмісту органічних речовин у стічній воді. Запропоновано безперервний процес очищення стічної води по замкнутому технологічному циклу.

Ключові слова: мікробіологічні та мембранні технології, очистка, стічна вода, метан, біоплівка, мікроорганізми

Актуальність. Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) зазначає, що гідрологічний цикл водних ресурсів виходить із рівноваги внаслідок зміни клімату та діяльності людини. Танення снігу, льоду та льодовиків призвело до посилення таких небезпечних явищ, як повені, та загрожує довгостроковій безпеці водних ресурсів багатьох мільйонів людей. Наразі 3,6 мільярда людей стикаються з проблемою недостатнього доступу до води хоча б один місяць на рік, і, за даними механізму «ООН – Вода», очікується, що до 2050 року ця цифра збільшиться до понад 5 мільярдів людей. Протягом усього 2022 року аномалії вологості ґрунту та випаровування повторювали аномалії річкового стоку. Так, наприклад, у Європі через сильну спеку і посуху влітку спостерігалось збільшення випаровування та зниження вологості ґрунту та річкового стоку. Все це призводить до проблем не лише у сільському господарстві. Перехід від Ла-Нінья в 2022 році до Ель-Ніньо в 2023 році впливає на гідрологічний цикл. Льодовики, що охоплюють нагір'я Тибету, Гімалаї, Каракорум, Гіндукуш, Памір і гори Тянь-Шаня, мають життєво важливе значення для водопостачання майже 2 мільярдів людей. У 2022 році висота снігового покриву в Альпах, що грає найважливішу роль у харчуванні

таких великих річок, як Рейн, Дунай, Рона і По, залишалася значно нижчою за середній рівень. У Європейських Альпах спостерігалися безпрецедентні масштаби втрати льодовикової маси [1].

Наше майбутнє вимагає від нас стратегічних рішень для задоволення потреб людства. І, в першу чергу, це питання пов'язані із продовольчою та екологічною складовою. У широкому розумінні поєднання цих проблем окреслює багатовекторні спрямування всього людства. А ми лише спробуємо доєднатися до них у нашій статті для вирішення конкретних питань, пов'язаних із ефективним очищенням «важких» стічних вод від шкідливих домішок.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Поєднання технологій мікробіологічного та мембранного очищення стічної води використовують в очисних спорудах для очищення води, що містить комплекс забруднювачів, до яких, окрім механічних часточок, входять і органічні речовини різного походження. Таку систему використовують у сільському господарстві, зокрема у тваринницьких або тепличних господарствах, а також у харчовій промисловості, особливо на підприємствах цукрово-, молоко- та м'ясопереробної галузі.

Відомо, що для очищення води від поверхнево-активних речовин з біорегенерацією адсорбенту [2] попередньо наносяться мікроорганізми на активоване вугілля (АВ) та піддаються традиційній регенерації, яка їх знищує. Далі відбувалося фільтрування води, яка вміщує високомолекулярні органічні сполуки. Однак таке очищення призводило до низької ефективності та фактично відбувалося дозніщення іммобілізованих на АВ мікроорганізмів при регенерації останнього.

Широке застосування знайшло очищення води від розчинених органічних речовин [2], яке полягає в сполученні біологічних і адсорбційних стадій у єдиному біо-фізико-хімічному процесі. Тут питання адсорбції і біологічного руйнування відбуваються одночасно при очищенні води від розчинених органічних сполук. Показано, що в такому процесі ефективність очищення по використаним речовинам досягала 75-85%, а ресурс роботи АВ складав 250 діб/дм³ АВ. Однак, основним недоліком такого очищення вважається [3] його невисока ефективність видалення з водних розчинів органічних речовин.

Відома праця [4] по очистці води від органічних забруднень включає адсорбційну очистку води на АВ з іммобілізованими мікроорганізмами, у якій очистку води здійснюють до появи у фільтраті концентрації

проскоку органічних речовин, а регенерацію АВ проводять перемінно. Автори наголошують на тому, що відбувається вилучення з забрудненої води до 99% органічних речовин та підвищується термін роботи шару АВ мінімум у два рази. Але, при протіканні стічної води, із активним мулом контактує лише тонкий шар рідини, що знаходиться над поверхнею мулу. Тут виникає протиріччя між необхідністю збільшити швидкість руху потоку і вимогою до його ламінарності. Одним із варіантів вирішення цієї проблеми є використання спеціальних інертних носіїв в декількох видів реакторів. Завантаження у вигляді нерухомого теплоносія найчастіше являють собою структуру розгалуженої площі, яка встановлюється в проточній частині апарата [5].

Численні дослідження метанового зброджування стічної води в реакторах із мікрофлорою, іммобілізованою на інертних носіях, показують, що процес метаногенезу та біодеструкції забруднень іде в декілька разів швидше, ніж в інших типах реакторів. До того ж, в якості носіїв можуть використовуватись різноманітні відходи природного та штучного походження, зокрема, полімери. Таким чином, подібний спосіб очищення стічних вод розв'язує цілий комплекс проблем екології та енергетики [6].

У [7] автори спрямовують питання, пов'язані із одержання біогазу в біореакторі з перемішуючим пристроєм та інертним носієм біоплівки. Акцентують увагу на питаннях, пов'язаних із утримання біоплівки на інертних носіях. Зосереджують увагу на впливі гідродинаміки в біореакторі з рухомим носієм біоплівки в контексті одержання біогазу.

В [8] розглянуто важливе питання ефективної переробки води та поживних речовин. Тут демонструється можливість швидкої переробки відходів у компактній конструкції реактора та пропонує рециркулювати поживні речовини назад у продукти харчування за допомогою гетеротрофного (включаючи метанотрофний, ацетотрофний та термофільний) мікробного росту. Також зазначено, що при регенерації атмосфери буде утворюватися метан.

У [9] проведено дослідження по очистці стічних вод при виробництві морозива з хімічною потребою у кисні (ХПК) 5,2 г/л. У якості обладнання використовувався анаеробний біореактор.

Для отримання базових критеріїв при проектуванні анаеробних реакторів, було оцінено вплив різних температур перетравлення, температурних коливань і навантажень корму на вихід біогазу та вміст метану. Згідно з елементним аналізом, теоретичний вихід біогазу

та метану при стандартній температурі та тиску становив 1,12 л біогазу/г та 0,724 л CH_4/g , відповідно. Температурні коливання від 35 до 30 °C і знову від 30 до 32 °C призвели до зниження швидкості виробництва біогазу, але він швидко відновив значення контрольного реактора [10].

Зважаючи на високе органічне навантаження промислових та господарсько-комунальних стічних вод, зміну їх складу та властивостей, автори спрямували свої думки на створення експериментальної установки для мікробіологічної та мембранної очистки стічних вод, яка б забезпечувала одержання біогазу, високу якість очищеної води, а також безперебійну роботу обладнання при невеликих енерговитратах.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є раціональне поєднання мікробіологічного та мембранно-дистиляційного процесів, що дозволить проводити безперервну циркуляційну очистку стічної води з одержанням очищеної води високої якості та біогазу, а також легко утримувати технологічні параметри процесу на потрібному рівні.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- Створити високоефективне очищення стічної води від концентрації органічних домішок від початкової 10^4 мг/л до концентрації не більше 0,5 мг/л.

- Створити експериментальну установку, яка б забезпечувала

Мельник В. М., Шафаренко М. В., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Ружинська Л. І.

безперервний процес очищення по замкнутому технологічному циклу;

- При проведенні процесу очистки отримати таку важливу сировину, як біогаз, який може бути використаний як джерело одержання теплової енергії.

- Довести, що по встановленим нормам щодо органолептичних показників та концентрації домішок, таку стічну воду можна запропонувати використовувати в якості «технічної води».

Матеріали та методи досліджень. Експериментально-практичні дослідження проводилися на установці мембранно-дистиляційного біореактора з іммобілізованими на інертних носіях мікроорганізмами, призначеному для очищення стічних вод та отриманню біогазу. Вони були реалізовані в навчальній лабораторії тепло- та масообмінних процесів на кафедрі біотехніки та інженерії факультету біотехнології і біотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна).

Об'єктом досліджень слугує процес очищення стічної води та виробництво біогазу в мембранно-дистиляційному біореакторі, який був виготовлений з прозорого матеріалу для візуалізації процесу утворення біогазу. Також перед проведенням експерименту установку продували

азотом для створення анаеробного процесу.

Предметом досліджень – є вплив анаеробного мікробіологічно-мембранного очищення на процес отримання очищеної води та біогазу. Завдяки мікроорганізмам, які іммобілізовані на носії, утворювався шар біоплівки і, тоді, анаеробне очищення відбувається в цьому шарі. В якості носія, на якому розташовані іммобілізовані мікроорганізми, використовуються тонколистові фільтрувальні завантаження (дренажі).

Дослідження проводились на експериментальній установці (рис. 1). У ємність постійного рівня 2 об'ємом 50 л заливали 40 л чистої води. В ємність постійного рівня 1 об'ємом 50 л подавали стічну воду з органічними домішками (концентрація домішок може досягати величини 10^4 мг/л), яка через регулюючі вентиля поступала в канали 10 мембранно-дистиляційного біореактора 3. Подачу та витік стічної води з ємності 1 регулювали таким чином, щоб рівень води в ємності 1 був постійним. Одночасно з ємності 2 через регулюючі вентиля чисту воду подавали в канали 11 мембранно-дистиляційного біореактора 3. Постійний рівень води в ємності 1 забезпечувався регулюючими вентилями. Щоб уникнути явища концентраційної поляризації швидкість води в каналах 10 та 11 підтримували в межах $0,01 \div 0,02$ м/с.

Мельник В. М., Шафаренко М. В., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Ружинська Л. І.

Установка для мікробіологічно-мембранної очистки стічної води має поверхню мембран в 8 м^2 , 16 каналів для стічної та 16 каналів для очищеної води (довжина каналу 1 м, ширина каналу 0,5 м). Канали розташовані

один над одним послідовно. На тонколистовому фільтрувальному завантаженні розміщено 32 кг (по сух. реч.) іммобілізованих мікроорганізмів.

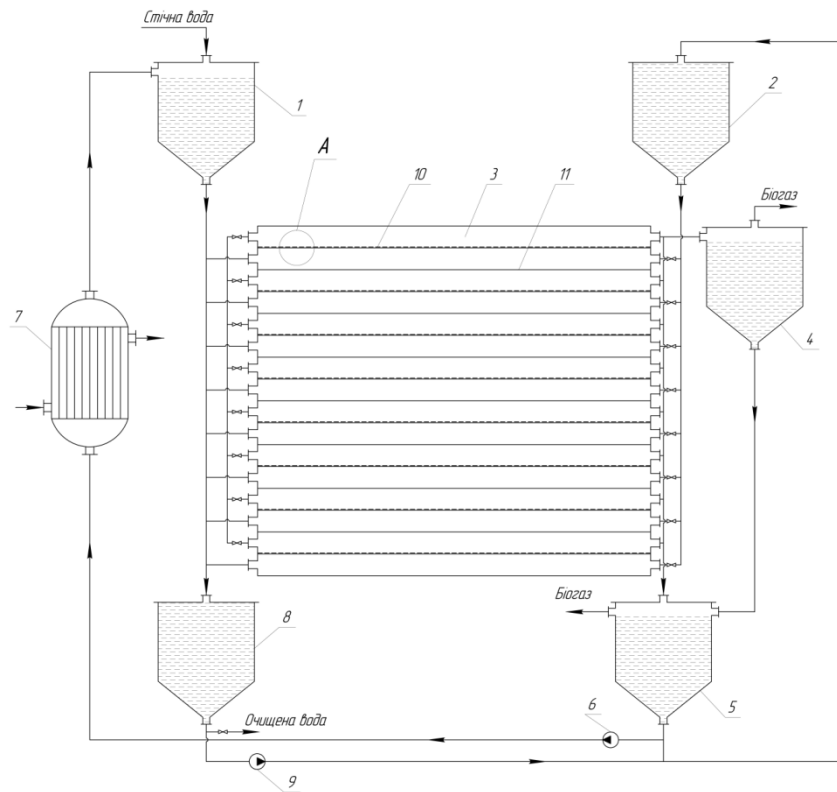


Рис. 1. Експериментальна установка для мікробіологічно-мембранного очищення стічної води: 1 та 2 – ємкості постійного рівня, 3 – мембранно-дистиляційний біореактор, 4 та 5 – ємності для збору стічної води, 6 та 9 – насоси, 7 – контактний-освітлювальний фільтр, 8 – ємності для збору очищеної води, 10 – канали, в які подається стічна вода (16 каналів), 11 – канали, по яких протікає очищена вода (16 каналів). Канали розміщені один над одним

При контактуванні стічної води з мікроорганізмами відбувався анаеробний процес, в результаті якого утворювався біогаз. Стічна вода дифундувала через ультрафільтраційні мембрани, де відбувалася її очистка від органічних домішок та змішування з чистою

водою. При цьому, в очищеній воді концентрація органічних домішок не перевищувала $0,5 \text{ мг/л}$.

Очищена вода з мембранно-дистиляційного біореактора стікала в ємність об'ємом 50 л, з якої частину води відбирали, а іншу частину

Мельник В. М., Шафаренко М. В., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Ружинська Л. І.

подавали насосом в ємність для підтримання постійного рівня.

Забруднену стічну воду, яка була насичена бульбашками біогазу, з біореактора зливали в ємності 4 та 5 об'ємом по 50 л кожна, в яких зі стічної води виділявся біогаз, а забруднену стічну воду насосом 6 через контактну-освітлювальний фільтр 7 подавали в ємність 1. Регулюючі вентилі використовують для створення однакових гідродинамічних режимів в каналах мікробіологічно-мембранного біореактора 3.

Контроль вмісту домішок в очищеній воді здійснюють хроматографічно

Результати досліджень очищення стічної води та утворення біогазу. Дослідження очистки води реалізовували на установці – пристрої для мікробіологічно-мембранної очистки стічної води (рис. 1).

На рис. 2 показано розріз каналу мембранно-дистиляційного біореактора (вид А) на рис. 1, збільшено.

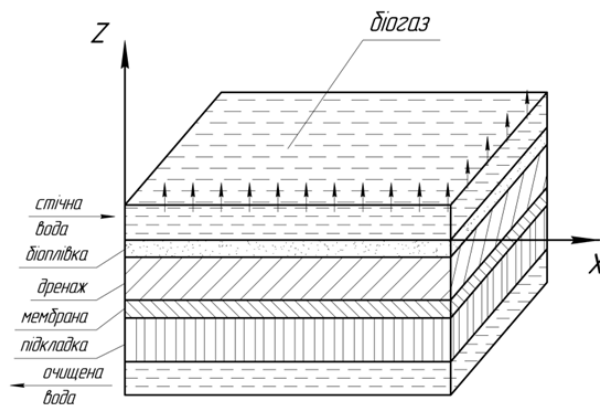


Рис. 2. Розріз каналу мембранно-дистиляційного біореактора (вид А) на рис. 1

У каналах для стічної води 10 на дренажах закріплене тонколистове фільтрувальне завантаження з іммобілізованими мікроорганізмами (біоплівкою), під якими на підкладках розміщені пласкі ультрафільтраційні мембрани.

При протіканні стічної води по каналах 10 органічні домішки з неї дифундують до іммобілізованих мікроорганізмів (біоплівки). Цей процес відбувається під дією різниці

концентрацій органічних домішок в ядрі потоку та в ламінарному шарі стічної води, який омиває фільтрувальне завантаження з біоплівкою.

При контактуванні стічної води з біоплівкою в каналах 10 відбувається анаеробний метаногенний процес. При цьому протікають багатостадійні хімічні реакції, в результаті чого утворюється біогаз та виділяється значна кількість тепла, від якого

Мельник В. М., Шафаренко М. В., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Ружинська Л. І.

нагрівається стічна вода (до температури 35 - 38 °C). Під дією перепаду тиску (200 мм.вод.ст.) та температури, частково очищена стічна вода дифундує через ультрафільтраційні мембрани, при цьому очищається від залишку органічних речовин та потрапляє в канал 11, де змішується з очищеною водою.

Стічну воду подають в ємність постійного рівня 1, а в ємність постійного рівня 2 завчасно заливають очищену воду. Із ємності постійного рівня 1 стічна вода через регулюючі вентилі самопливом поступає в канали 10 мембранно-дистиляційного біореактора 3. В канали 11 мембранно-дистиляційного біореактора 3 (МДБ), які утворені підкладками та плоскими цільними листами, з ємності постійного рівня 2 через регулюючі вентилі протитоком, по відношенню до стічної води, самопливно поступає очищена вода. Рівень стічної води в ємності 1 підтримується на 200 мм вище рівня очищеної води в ємності 2, тим самим між каналами 10 та 11 мембранно-дистиляційного біореактора 3 створюється перепад тиску. Стічна вода, що містить біогаз, з каналів для стічної води 10 мембранно-дистиляційного біореактора 3 самопливом стікає в ємності для збору стічної води 4 та 5, де зі стічної води виділяється біогаз. З ємності для збору стічної води 5 стічна вода насосом 6 через контакт-

освітлювальний фільтр 7, який призначений для освітлення води, поступає в ємність постійного рівня 1. Періодично відбувається промивка контактнo-освітлювального фільтра 7 водою.

Очищена вода з каналів для очищеної води 11 мембранно-дистиляційного біореактора 3 самопливом стікає в ємність для збору очищеної води 8, з якої її частково відбирають, а іншу частину очищеної води насосом 9 перекачують в ємність постійного рівня 2.

Регулюючі вентилі використовують для створення однакових гідродинамічних режимів в каналах мембранно-дистиляційного біореактора 3.

Контроль вмісту домішок в очищеній воді здійснюють хроматографічно.

Припустимо, що концентрація мікроорганізмів в біоплівці коливається в межах від 14-75 кгХСК/м³.

На вході в канал концентрація субстрату в стічній воді буде найбільша, тому біоплівка представляє собою переважно кислотогенну біомасу. Зі зменшенням концентрації оцтової кислоти в біоплівці буде зменшуватись концентрація кислотогенної і збільшуватись концентрація метаногенної біомаси. Тому приймемо, що на вході в канал біоплівка складається тільки з

Мельник В. М., Шафаренко М. В., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Ружинська Л. І.

кислотогенної біомаси, а на виході з каналу – з метаногенної. Причому, концентрації біомас змінюються за лінійною залежністю.

$$X_1(x=0) = X \quad X_1(x=l) = 0;$$

$$X_2(x=0) = 0 \quad X_2(x=l) = X,$$

де l – каналу довжина. Звідси

$$X_1(x) = -\frac{x}{l}x + X; \quad X_2(x) = \frac{x}{l}x. \quad (1)$$

Рівняння конвективної дифузії розподілу концентрації субстрату двовимірної моделі для визначення $S_1(x, z)$ набуде вигляду:

$$\frac{dS_1}{d\tau} = D_1 \left(\frac{\partial^2 S_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_1}{\partial z^2} \right) - \left(W_x \frac{\partial S_1}{\partial x} + W_z \frac{\partial S_1}{\partial z} \right), \quad (2)$$

де W_x, W_z - швидкості стічної води по відповідним координатним осям; D_1 - коефіцієнт дифузії субстрату в потоці.

кожній точці не змінюється з часом, тобто $\frac{dS_1}{d\tau} = 0$. При ламінарному русі стічної води в каналі можна вважати, що $W_x \gg W_z$.

Для сталого процесу в мембранно-дистиляційному біореакторі концентрація субстрату в

$$\text{Тоді, } D_1 \frac{\partial^2 S_1}{\partial x^2} = 0; \quad W_z \frac{\partial S_1}{\partial z} = 0.$$

Отже, рівняння (2) набуде вигляду:

$$D_1 \frac{\partial^2 S_1}{\partial z^2} - W_x \frac{\partial S_1}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Відомо, що при ламінарній течії утвореному двома горизонтальними рідини в щілевидному каналі, пластинами:

$$\frac{d^2 W_x}{dz^2} = \frac{1}{\mu} + \frac{dP}{dX} = A = \text{const}. \quad (4)$$

Рівняння середньої швидкості стічної води:

$$W = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta W_x dz = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta A(z^2 + \delta^2) dz = -\frac{2}{3} \frac{A}{\delta^2}. \quad (5)$$

Тоді, остаточно можна записати:

$$\frac{\partial^2 S_1}{\partial z^2} - \frac{3}{2} \frac{W}{D_1 \delta^2} (\delta^2 - z^2) \frac{\partial S_1}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

У верхній частині каналу по осі z (рис. 2) концентрація субстрату буде мати максимум -

$$\left. \frac{\partial S_1}{\partial x} \right|_{z=0, \delta} = 0. \quad (7)$$

Як відомо, на швидкість виробництва метану та його процентний вміст в біогазі впливає час гідравлічного утримування τ_3 і

$$M = Y_{c_0} l^{\mu(\tau - \tau_3)}, \quad (8)$$

де $Y = \frac{c_1 - c_0}{S_0 - S_1}$; $= \frac{c_1 - c_0}{S_0 - S_1}$; c_1 , c_0 – кінцева та початкова концентрації біомаси, S_0 , S_1 – початкова та кінцева концентрації субстрату.

Для моделі одноетапної реакції з кінетикою першого порядку швидкість реакції буде пропорційна кількості субстрату [11]. Тоді, як для моделі двоступеневої реакції з

$$M = S_1 [1 - \alpha e^{-k_F \tau} - (1 - \alpha) e^{-k_1 \tau}], \quad (9)$$

де α – коефіцієнт розподілу фракцій; k_1 – кінетична константа першого порядку розкладу біоплівки; k_2 – кінетична константа першого порядку розкладу субстрату.

Якщо розглянути два етапи у кожній з фракцій, з яких складається

$$M = S_1 \left[\alpha \left(1 - \frac{k_{HF} e^{-k_{MF} \tau} - k_{MF} e^{-k_{HF} \tau}}{k_{HF} - k_{MF}} \right) + (1 - \alpha) \left(1 - \frac{k_{HL} e^{-k_{ML} \tau} - k_{ML} e^{-k_{ML} \tau}}{k_{HL} - k_{ML}} \right) \right]. \quad (10)$$

швидкість органічного навантаження.

Виробництво метану представимо у вигляді експоненціальної моделі:

кінетикою першого порядку відбувається накопичення виробництва метану [11]. Це означає, що можна розглядати процес, як два паралельні, але незалежні процеси, які відбуваються одночасно. Тоді кількість утвореного метану по реакції на двох швидкостях одного кроку з кінетикою першого порядку.

субстрат, (як для фракції Н, яка швидко розкладається, так і для фракції М, яка повільно розкладається) то загальна кількість утвореного метану буде представлена наступним чином:

Результати експериментальних досліджень показані на рис. 3-6.

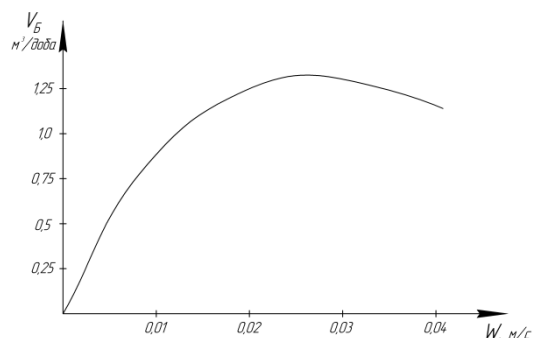
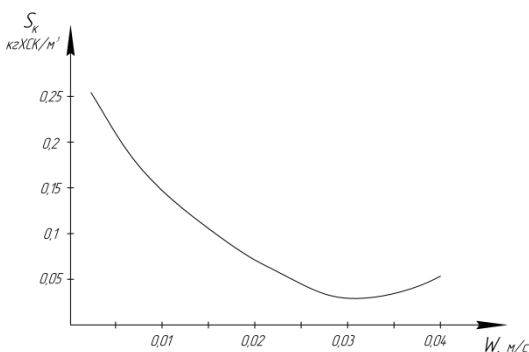


Рис. 3 Залежність кінцевої концентрації субстрату від швидкості стічної води в каналах МДБ

Як видно з рис. 3 та рис. 4 кінцева концентрація субстрату та кількість утвореного біогазу мають екстремум при $W = 0,03$ м/с. Потім зі зростанням W починається

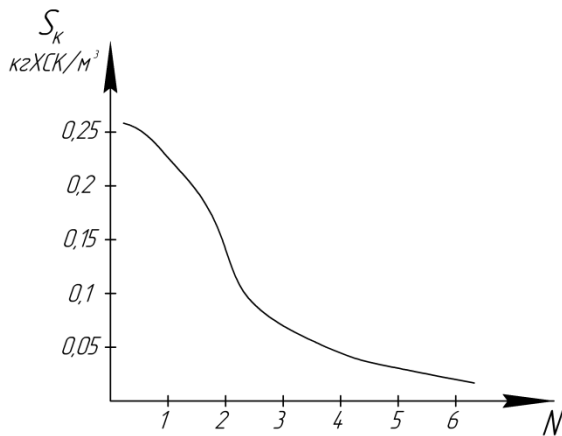


Рис. 5 Залежність кінцевої концентрації субстрату від кратності циркуляції при $W = 0,03$ м/с

Зі зростанням кратності циркуляції (рис. 5 та рис. 6) темп зміни S_k та V_B зменшується. Це явище пояснюється тим, що мікроорганізми не в змозі переробити зростаючі

Рис. 4 Залежність кількості біогазу від швидкості стічної води в каналах МДБ

зменшення цих показників. Це обумовлено тим, що зі збільшенням швидкості стічної води починається відрив біоплівки від дренажу.

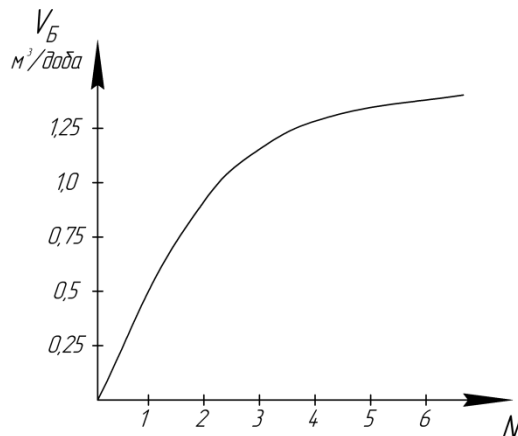


Рис. 6 Залежність кількості біогазу від кратності циркуляції при $W = 0,03$ м/с

кількості субстрату, які збільшуються при зростанні кратності циркуляції.

В таблиці 1 наведені дані по очистці стічної води.

Показники очищення стічних вод

№ п/п	Концентрація домішок в стічній воді, мг/л	Об'ємна витрата очищеної води, л/доба	Проникність мембрани по стічній воді, л/м²•год	Концентрація домішок в очищеній воді, мг/л	Кількість отриманого біогазу, л/доба
1.	10000	190	1,0	0,5	1186
2.	5000	210	1,1	0,4	655
3.	1000	230	1,2	0,35	143
4.	500	250	1,3	0,25	78
5.	100	290	1,5	0,1	18

Наведені в таблиці дані свідчать про те, що концентрація органічних

речовин в очищеній воді в залежності від їх концентрації у стічній воді

Мельник В. М., Шафаренко М. В., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Ружинська Л. І.

складає $(0,5 \div 0,1)$ мг/л або в процентах $(5 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-5})\%$. Вода з таким вмістом органіки наближається до питної. Кількість утвореного біогазу залежить від складу органічних речовин у стічній воді. Вода, яку очищали на установці, належала до промислових стоків. Якщо очищати воду цукрових виробництв, яка містить буряковий цукор, то вихід біогазу досягатиме $(0,725 \div 48)$ м³/доба.

Висновки і перспективи.

Розроблена модельна конструкція мембранно-дистиляційного біореактору для очищення стічних вод з іммобілізованими на інертних носіях мікроорганізмів. Мікроорганізми, іммобілізовані на носії, утворюють шар біоплівки і анаеробне очищення відбувається в цьому шарі, в якості носія, на якому іммобілізовані мікроорганізми, використовують тонколистіві

фільтрувальні завантаження (дренажі)).

Доведено ефективне очищення стічної води від органічних домішок у стічних водах від концентрації домішок 10^4 мг/л до концентрації 0,5 мг/л.

Запропонована технологія безперервного очищення по замкнутому технологічному циклу.

При проведенні процесу анаеробної очистки отримали таку важливу сировину, як біогаз, який може бути використаний як джерело одержання теплової енергії. Вихід біогазу в результаті протікання анаеробного процесу складає від 0,1 до 6 м³ біогазу/(м²•доба) в залежності від вмісту органічних речовин у стічній воді.

Згідно встановленим нормам по органолептичним показникам та концентрації домішок, таку стічну воду можна використовувати в якості «технічної води».

Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, 2006

5. Vorobyova O.V. Determining the influence of wastewater hydrodynamics in bioreactors on the process of mass transfer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (10 (119)), 14–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266015>

6. Shafarenko M., Vorobyova O. (2021). Follow-up to the process of maintaining methane from biogas and pyrolytic gas. Communal government of the city, 1(161), 280–283. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-280-283>

7. Siti Nur Hatika Abu Bakar, Hassimi Abu Hasan, Abdul Wahab Mohammad, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Teow Yeit Haan,

Список використаних джерел

1. WMO is concerned about the state of the Earth's water resources. (n.d.). <https://www.meteoestvi.ru/news/1697100178441-vmo-obespokoena-sostoyaniem-vodnyh-resursov-zemli>

2. N. Klimenko et al. Colloid and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 230 (2003) 141-158

3. Сшивальников В.Н., Яковлев С.В., Морозова К.Н., Начаев И.А., Мирине В.Й. Глубокая очистка природных и сточных вод на биосорберах. Водоснабжение и санитарная техника. Москва. Стройиздат. 1995, №11. С. 6-11

4. UA 76034, C02F 1/28. Спосіб очистки води від органічних забруднень.

Мельник В. М., Шафаренко М. В., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Ружинська Л. І.

Rahmat Ngteni, Khairul Muis Mohamed Yusof. Biogas Production from Organic Wastes Using Moving Bed Biofilm Reactor Technology: A Review. *Journal of Cleaner Production* Volume 171, 10 January 2018, Pages 1532-1545. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.100>

8. Lisa M. Steinberg, Rachel E. Kronyak, Christopher H. House Coupling of anaerobic waste treatment to produce protein- and lipid-rich bacterial biomass/ *Life Sciences in Space Research*. Volume 15, November 2017, Pages 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.07.006>

9. Rafael Borja, Charles J. Bank. Response of an anaerobic fluidized bed reactor treating ice-cream wastewater to organic, hydraulic, temperature and pH shocks/ *Journal of Biotechnology*. Volume 39, Issue 3, 1 May 1995, Pages 251-259 [https://doi.org/10.1016/0168-1656\(95\)00021-H](https://doi.org/10.1016/0168-1656(95)00021-H)

10. K.J. Chae, Am Jang, S.K. Yim, In S. Kim. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*. Volume 99, Issue 1, January 2008, Pages 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.063>

11. Термодинамічні та кінетичні аспекти хімічних реакцій: навч. посіб. / уклад. О. М. Швед, К. С. Ютілова, С. Л. Богза, Г. М. Розанцев. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2021. 144 с.

References

1. WMO is concerned about the state of the Earth's water resources. (n.d.). <https://www.meteoestvi.ru/news/1697100178441-vmo-obespokoena-sostoyaniem-vodnyh-resursov-zemli>

2. Klimenko, N. et al. (2003) Colloid and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 230 141-158

3. Sshyvalnykov, V. et al. (1995). Hlubokaia ochystka pryrodnykh y stochnykh vod na byosorberakh. - Vodosnabzhenye y sanytaruaia tekhnika. Stroiyzdat. №11. S. 6-11

4. Dumanskoho, A. (2006). Sposib ochystky vody vid orhanichnykh zabrudnen (U.A. Patent No76034, C02F 1/28.)

5. Vorobyova, O. (2022, October 29). Determining the influence of wastewater hydrodynamics in bioreactors on the process of mass transfer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (119)), 14–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266015>

6. Shafarenko, M., & Vorobyova, O. (2021, March 26). Research Of Methane Production Process From Biogas And Pyrolysis Gas. *Municipal Economy of Cities*, 1(161), 280–283. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-280-283>

7. Abu Bakar, S. N. H., Abu Hasan, H., Mohammad, A. W., Sheikh Abdullah, S. R., Haan, T. Y., Ngteni, R., & Yusof, K. M. M. (2018, January). A review of moving-bed biofilm reactor technology for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1532–1545. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.100>

8. Steinberg, L. M., Kronyak, R. E., & House, C. H. (2017, November). Coupling of anaerobic waste treatment to produce protein- and lipid-rich bacterial biomass. *Life Sciences in Space Research*, 15, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.07.006>

9. Borja, R. (1995, May 1). Response of an anaerobic fluidized bed reactor treating ice-cream wastewater to organic, hydraulic, temperature and pH shocks. *Journal of Biotechnology*, 39(3), 251–259. [https://doi.org/10.1016/0168-1656\(95\)00021-h](https://doi.org/10.1016/0168-1656(95)00021-h)

10. Chae, K., Jang, A., Yim, S., & Kim, I. S. (2008, January). The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*, 99(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.063>

11. Shved, O. et al. (2021). Термодинамічні та кінетичні аспекти хімічних реакцій: навч. посіб. / Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 144 с.

INTERACTION OF MICROBIOLOGICAL AND MEMBRANE TECHNOLOGIES OF WASTEWATER TREATMENT

V. Mel'nyk, M. Shafarenko, Zh. Ostapenko, V. Kosova, L. Rhuzinska

Abstract. *The combination of microbiological and membrane technologies for wastewater treatment from organic substances of various origins is considered. An experimental installation of a membrane-distillation bioreactor is proposed. When carrying out the proposed wastewater treatment in one device, the process proceeds in two stages. The first stage is biological treatment under anaerobic conditions of biogas production, and the second stage is post-treatment using membrane distillation on ultrafiltration membranes. We analyze anaerobic wastewater treatment through horizontal channels by passing through media - thin-sheet filter loads (drains), which contain immobilized microorganisms that form a biofilm layer. Anaerobic digestion is accompanied by the production of biogas, which is collected and discharged into a special tank. Under the action of bacteria during the acetogenic phase, acetic acid is additionally produced from the substances formed in the previous phase, which is decomposed into methane, carbon dioxide and water during methanogenesis. It has been shown that ultrafiltration membranes are used as a wastewater treatment. It is proved that wastewater diffuses through the drainage under the influence of a pressure drop of 200 mmHg and at a temperature of 35-38 °C. It is determined that the treated water can have a high content of organic matter from 100 to 10⁴ mg of impurities/liter of water. As a result of the anaerobic process, the biogas yield was found to be from 0.1 to 6 m³ of biogas/(m²·day), depending on the content of organic matter in the wastewater. A continuous process of wastewater treatment in a closed technological cycle is proposed.*

Key words: *microbiological and membrane technologies, purification, wastewater, methane, biofilm, microorganisms*