

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ АНАЕРОБНОГО БІОРЕАКТОРА
ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД****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

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

E-mail: ruzhli@ukr.net

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

А. Д. ГОРБУНОВ, магістр, <https://orcid.org/0009-0006-2433-8710>

E-mail: artixx3590@gmail.com

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського[https://doi.org/10.31548/dopovidi4\(104\).2023.001](https://doi.org/10.31548/dopovidi4(104).2023.001)

Анотація. Об'єктом дослідження обрано процес одержання біогазу в біореакторі з перемішуючим пристроєм та інертним носієм біоплівки. Проблемним залишається питання утримання біоплівки на інертних носіях за певної кількості обертів перемішуючого пристрою. Представлена схема лабораторної установки для дослідження процесу виділення біогазу в біореакторі з інертним носієм. Була визначена важлива величина – питома швидкість виділення субстрату $r_{X,M}$, без якої неможливо розрахувати поверхню біоплівки та визначити кількість виділеного метану. Було з'ясовано вплив гідравлічного руху течії (критерій Рейнольдса) на утворення метану. Підібрано число обертів перемішуючого пристрою для утримання біоплівки на інертних носіях та унеможливлення її відриву. Розглянуто процес масопереносу субстрату зі стічної води до поверхні біоплівки; перетворення субстрату активною кислотогенною біомасою в оцтову кислоту; перетворення оцтової кислоти метаногенною біомасою в біогаз. Акцентовується перевага пропонуємого дослідження впливу гідродинаміки на процес одержання біогазу в анаеробних умовах від процесу псевдозрідження, при якому, у наслідок інтенсивної циркуляції рідини можливий відрив біоплівки від поверхні інертних носіїв. Пропонується створення оптимального апарату біореактора, який би забезпечував, у повній мірі, такий технологічний процес. За оптимального режиму роботи біореактора число обертів перемішуючого пристрою $n=2$ об/с. Кінцева концентрація субстрату у стічній воді досягає значення $S_2=0,1$ кг ХСК/м³. Кількість одержаного метану складає $V_{CH_4}=0,409$ м³/добу. Може

Мельник В. М., Шафаренко М. В., Ружинська Л. І., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Горбунов А. Д. використовуватись на практиці при очищенні стічних вод наступних виробництв: молокозаводів, м'ясопереробних виробництв, при виробництві соків та вин на харчових виробництвах. Так як на цих підприємствах великий вміст органічних речовин в стічних водах. Це приводить до підвищеної кількості одержаного біогазу.

Ключові слова: конструкція біореактору, отримання біогазу, анаеробні умови, рухомий носій біоплівки

Актуальність. Пошуки економічно вигідних та екологічно прийнятних методів очищення промислових та господарсько-комунальних стічних вод були і залишаються вкрай актуальними у великому місті. Постійно зростаюча чисельність жителів міста, розгалужена інфраструктура, інтенсивне функціонування харчових, мікробіологічних, фармацевтичних та багатьох інших виробництв призводять до щоденного зростання обсягів стічних вод, забруднених органікою. Зростає потреба у чистій воді. Донедавна більш перспективною технологією вважалася аеробна очистка, анаеробна ж технологія розглядалася лише як попередня стадія очистки стоків високої концентрації або осадів [1]. Введення анаеробних біореакторів із іммобілізованою мікрофлорою, інтенсифікувало процес очищення, що разом з іншими перевагами, такими, як низька енергоємність, отримання палива, компактність та гігієнічність дозволило анаеробній технології вдало конкурувати із аеробною. Вибір найбільш ефективних проєктних рішень потребує детального вивчення

і математичного опису основних закономірностей процесу [2]. Під час протікання стічної води, із активним мулом контактує лише тонкий шар рідини, що знаходиться над поверхнею мулу. До того ж за турбулізації потоку відбувається винос мулу стічними водами. Отже, 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 [3]. Анаеробне очищення стічних вод на інертних носіях є складним багатофазовим та багатостадійним процесом, фізичні, хімічні та мікробіологічні явища якого тісно взаємопов'язані та взаємозалежні. На даному етапі активно ведеться розробка анаеробних процесів, проте їх результати є фрагментарними і розрізненими. У цій роботі представлено математичну модель процесу очищення стічних вод

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

мікроорганізмами, іммобілізованими на нерухомих інертних носіях.

Актуальним, і до тепер, залишається питання утримання біоплівки на інертних носіях при певній кількості обертів перемішуючого пристрою (певне значення критерія Рейнольдса Re). Все це може стати підґрунтям для рекомендації зі створення оптимального апарату біореактора, який би забезпечував, у повній мірі, технологічний процес.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відоме використання технології біоплівкового реактора з рухомим шаром як ефективної аеробної полірувальної установки очищення стоків заводу з виробництва пальмової олії в роботі [4]. Приділяється увага поточним методам очищення та найсучаснішій технології біоплівкового реактора з рухомим шаром для очищення стічних вод комбінату з виробництва пальмової олії. Досліджено проєкт технології реактора з біоплівкою з рухомим шаром, який спільно підтримується біоплівками, включаючи конфігурацію потоку, режим і типи аерації та характеристики середовища. Крім того, також обговорюється інтеграція реакторів з рухомим шаром біоплівки з іншими процесами очисних установок, такими як мембрани та коагуляція. Але залишилися поза увагою питання анаеробного процесу в біореакторі.

У праці [5], завдяки біоплівковим реакторам, використовують мікробний плівковий підхід. Тут середовище або носій вводять у систему, і реактор працює для створення високої концентрації біомаси, яка необхідна для ефективної анаеробної обробки відходів. Також шар біоплівки вважається критичним фактором для ефективності травлення. Модифіковані анаеробні реактори здатні запобігати мікробному вимиванню завдяки сприянню агрегації мікробів, що має хороші властивості осідання, або розвитку бактеріальних і архейних біошарів на поверхні інертних носіїв і опорних матеріалів. Не висвітлені питання утворення та отримання біогазу.

Проводились дослідження ефективності використання біоплівкового реактора з рухомим шаром для очищення стічних вод з високим вмістом органічних речовин [6]. Біоплівка – мікробіологічна колонія, що складається з бактерій, найпростіших, і гриби, які співіснують і процвітають на твердій поверхні. Спеціально розроблені носії біоплівки мають глибокий вплив на зростання біомаси, утримання мікроорганізмів і видалення забруднюючих речовин, що призводить до значного покращення продуктивності реактора.

У статті [7] автори дослідили ефективність використання біоплівкового реактора з рухомим

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

шаром для очищення стічних вод при помірних і низьких температурах. Завдяки анаеробним процесам, в основному, йде перетворення органічної речовини на метан, який є енергоносієм, або паливом з потенціалом для виробництва електроенергії чи тепла. Але не було розглянуто вплив швидкості стічної води на процес отримання біогазу.

Отже, багато уваги приділяється питанням, пов'язаним із впливом гідродинаміки на рідину та очисткою стічних вод від органічних домішок. Разом з тим, при анаеробному очищенні одержують такий важливий енергоносіє як біогаз.. Тому в даному дослідженні увага зосереджена на впливі гідродинаміки в біореакторі з рухомим носієм біоплівки на процес одержання біогазу. Пропонується сконцентрувати увагу на підборі оптимального числа обертів різних типів перемішувачів пристроїв у біореакторі. Це дозволить з'ясувати характер поверхні теплообміну біореактора, яка необхідна для відведення тепла та яке виділяється в процесі одержання біогазу.

Мета і задачі дослідження.

Метою є створення умов іммобілізації біоплівки на інертних носіях для одержання високопродуктивного анаеробного процесу виробництва біогазу. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі: визначити кількості утвореного біогазу та швидкість виділення субстрату; визначити кількість

утвореного метану від впливу гідродинамічного процесу; – з'ясувати вплив числа обертів перемішувача пристрою на процес утримання біоплівки на інертних носіях та її відриву.

Матеріали та методи досліджень. Предмет дослідження – вплив гідродинаміки на процес одержання біогазу.

Об'єкт дослідження – процес одержання біогазу в біореакторі з перемішувачем пристроєм та інертним носієм біоплівки. Використовувалась стандартна методика, яка заснована на процесі нагрівання стічної води в скляній колбі з подальшою конденсацією її в холодильнику та використанням хімічних реактивів. Кількість ХПК у стічній воді визначалась на приладі «Хімічного споживання кисню». Процес виділення біогазу в біореакторі з інертним носієм біомаси досліджувався на лабораторній установці, схема якої представлена на рис. 1. Установка складається з біореактора 1, який обладнаний якірною мішалкою та має сорочку зі спіральними каналами, в які подається теплоносіє. Гарячий теплоносіє подається в сорочку з термостата 2, а в якості холодного теплоносія використовується водопровідна вода. Для визначення об'єму біогазу, який виділяється, використовуються дві протаровані ємності 3 і 4, одна з яких заповнена водою.

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

Установка працює наступним чином. У біореактор 1 загрузається активоване вугілля, на яке нанесено біомасу – шар активного мулу. Потім в біореактор заливається стічна вода і відбувається продувка азотом для створення анаеробних умов. Після продувки вмикається перемішуючий пристрій і в сорочку біореактора з термостата 2 подається гарячий

теплоносій для нагрівання стічної води. Після досягнення в біореакторі температури $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ термостат вимикається, і в сорочку подається холодний теплоносій. Біогаз, який виділяється в ході процесу, поступає в ємність 3 і витісняє воду в ємність 4. За об'ємом витісненої води визначається об'єм біогазу.

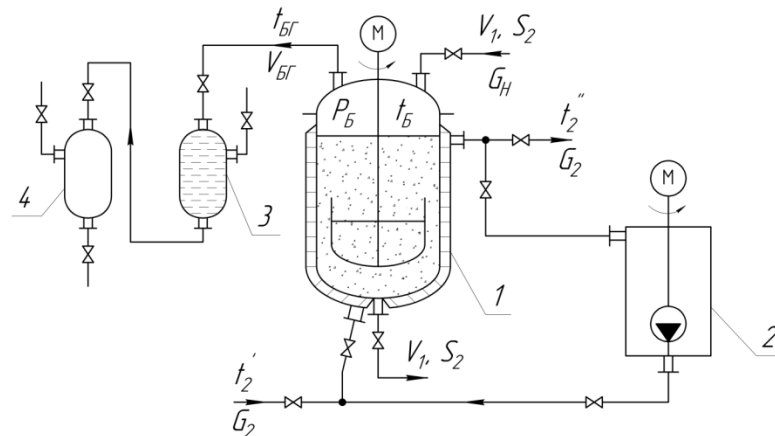


Рис. 1. Схема лабораторної установки для дослідження процесу виділення біогазу в біореакторі з інертним носієм: 1 – біореактор; 2 – термостат; 3, 4 – ємності

Схема біореактора показана на рис. 2. Біореактор обладнаний сорочкою з поперечними перегородками, які утворюють канали, та перемішуючим пристроєм. Стічна вода періодично загрузається

в біореактор з одночасним відводом продуктів розкладу. Біогаз, який утворюється, відводиться через штуцер в кришці біореактора. Біореактор охолоджується водою, яка подається в канали сорочки.

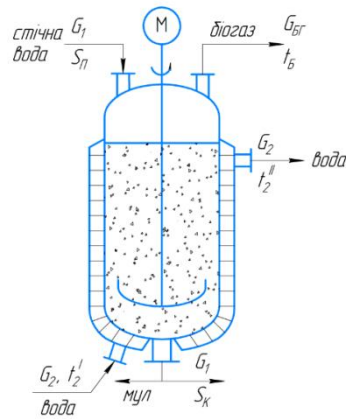


Рис. 2. Схема біореактора з перемішуючим пристроєм та інертним носієм біоплівки

Перед початком дослідів фіксувались значення величин, які не змінюються при проведенні анаеробного процесу, це:

- об'єм стічної води $V_1=0,025\text{ м}^3$;
- початкова концентрація органічних домішок (субстрату) в стічній воді: $S_1 = 40\text{ кгХСК} / \text{м}^3$;
- маса інертного носія (активованого вугілля АГ-3) $G_H=10\text{ кг}$;
- середній діаметр частинки інертного носія $d_H=3,6\cdot 10^{-3}\text{ м}$;
- концентрація активного мулу в біоплівці $X_M=30\text{ кгХСК}/\text{м}^3$;
- товщина біоплівки $\delta_{БП}=2\cdot 10^{-3}\text{ м}$;
- діаметр явірної мішалки $d_M=0,45\text{ м}$.

При проведенні дослідів вимірювались наступні величини:

- температура в біореакторі $t_B=37\text{ }^\circ\text{C}$;
- температура біогазу $t_{БГ}=37\text{ }^\circ\text{C}$;

– тиск в біореакторі $P_B=0,1-0,105\text{ МПа}$;

– об'єм зібраного біогазу: $V_{БГ}=0,31-0,58\text{ м}^3/\text{добу}$;

– температура холодного теплоносія на вході в сорочку біореактора $t_2' = 20\text{ }^\circ\text{C}$;

– температура холодного теплоносія на виході з сорочки біореактора $t_2'' = 25-30\text{ }^\circ\text{C}$;

– кінцева концентрація органічних домішок (субстрату) в стічній воді:

$$S_1 = 0,1-20\text{ кгХСК} / \text{м}^3;$$

- число обертів явірної мішалки $n=0,25-2, \text{ с}^{-1}$.

Результати досліджень та їх обговорення.

1. З'ясуємо кількість утвореного метану та питому швидкість виділеного субстрату

Теоретична кількість утвореного метану [8]:

$$V_{CH_4}^T = V_1(S_1 - S_2) \cdot 0,38, \quad (1)$$

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

де $0,38 \text{ м}^3\text{CH}_4/\text{кгХКС}$ – коефіцієнт Кількість метану, який перерахунку між ХКС та метаном при виділяється в біореакторі, при проведенні експериментальних досліджень:

$$V_{\text{CH}_4} = X_{\text{CH}_4} V_{\text{БГ}}, \quad (2)$$

де X_{CH_4} – об'ємний вміст метану в біогазі. Питома швидкість виділення субстрату (органічних домішок):

$$r_{\text{ХМ}} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{f_{\text{H}} x_{\text{M}} \delta_{\text{БП}} \cdot 0,38}, \quad (3)$$

де f_{H} – площа поверхні інертних носіїв, м^2

$$f_{\text{H}} = \frac{6G_{\text{H}}}{d_{\text{H}} \rho_{\text{H}}}, \quad (4)$$

де $\rho_{\text{H}}=1450 \text{ кг/м}^3$ – густина Рейнольдса) на утворення метану. Значення критерія Рейнольдса [9]:

2. Дослідимо вплив гідравлічного руху течії (критерій

$$\text{Re}_{\text{ц}} = \frac{nd_{\text{M}}^2 \rho_{\text{C}}}{\mu_{\text{C}}}, \quad (5)$$

де ρ_{C} – густина суміші; μ_{C} – коефіцієнт динамічної в'язкості суміші в біореакторі:

$$\rho_{\text{C}} = \rho_{\text{H}} \varepsilon + \rho_1 (1 - \varepsilon), \quad (6)$$

$$\mu_{\text{C}} = \mu_1 (1 + 4,5\varepsilon), \quad (7)$$

де ρ_1, μ_1 – відповідно густина та стічної води; ε – об'ємна доля коефіцієнт динамічної в'язкості інертних носіїв в суміші:

$$\varepsilon = \frac{\frac{G_{\text{H}}}{\rho_{\text{H}}}}{\frac{G_{\text{H}}}{\rho_{\text{H}}} + V_1}. \quad (8)$$

Результати експерименту представлені в табл. 1 та на рис. 3, 4:

Результати досліджень

№ експерименту	$n, \text{с}^{-1}$	$S_2, \text{кгХКС} / \text{м}^3$	$V_{\text{CH}_4}^T \frac{\text{м}^3}{\text{доба}}$	$V_{\text{CH}_4} \frac{\text{м}^3}{\text{доба}}$	$r_{\text{ХМ}} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{доба}}$	$\text{Re}_{\text{ц}}$
----------------	--------------------	----------------------------------	--	--	--	------------------------

1	0,25	20	0,19	0,22	0,839	$40 \cdot 10^3$
2	0,5	18	0,209	0,24	0,915	$80 \cdot 10^3$
3	0,75	14	0,247	0,265	1,01	$120 \cdot 10^3$
4	1,0	9	0,295	0,334	1,274	$160 \cdot 10^3$
5	1,25	5	0,333	0,352	1,342	$200 \cdot 10^3$
6	1,5	2	0,361	0,393	1,499	$240 \cdot 10^3$
7	1,75	1	0,371	0,401	1,504	$280 \cdot 10^3$
8	2,0	0,1	0,379	0,409	1,56	$320 \cdot 10^3$

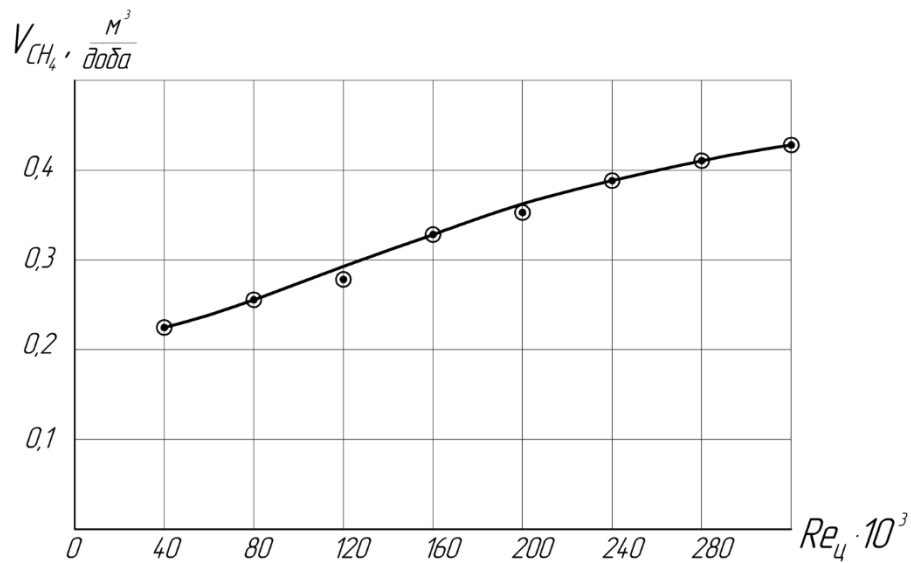


Рис. 3. Залежність кількості утвореного метану від критерія Рейнольдса

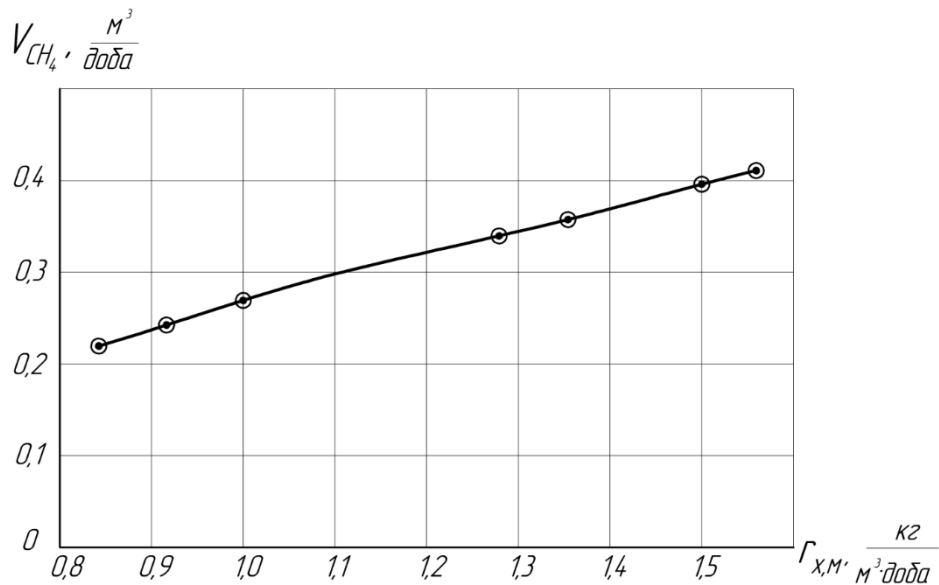


Рис. 4. Залежність кількості утвореного метану від швидкості виділення субстрату

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

При проведенні анаеробного процесу в біореакторі виділяється значна кількість тепла ($16,8 \cdot 10^3$ кДж/(кгсух.реч)). При мезофільному процесі температура в біореакторі повинна підтримуватись в межах 35–40 °С. Тому, відведення тепла в процесі одержання біогазу має дуже велике значення.

Для забезпечення достовірності отриманих експериментальних досліджень проведемо чисельні розрахунки біореактора з рухомим носієм біоплівки. Використаємо рівняння, які описують процес отримання біогазу, гідродинаміки та теплообмін в біореакторі. При проведенні анаеробного процесу в такому біореакторі, великий вплив на кількість одержаного біогазу має гідродинаміка, яка, в свою чергу,

обумовлена типом перемішуючого пристрою та числом його обертів.

3. Вплив числа обертів перемішуючого пристрою на процес утримання біоплівки на інертних носіях та її відрив

Розглянемо найбільш суттєві аспекти для роботи перемішуючого пристрою у біореакторі з інертним носієм біомаси (рис. 3). Перемішуючий пристрій створює сприятливі умови для виділення тепла в усьому об'ємі біореактора.

Як відомо, об'єм біореактора складається з об'єму стічної води, яка знаходиться в біореакторі, об'єму інертних носіїв біомаси та вільного об'єму, який враховується коефіцієнтом заповнення біореактора [8]:

$$V = \frac{V_1 + V_H}{\varphi}, \quad (9)$$

де V_1 – об'єм стічної води в біореакторі, м³/доба, φ – коефіцієнт заповнення біореактора, V_H – об'єм інертних носіїв, [м³].

Враховуючи, що об'єм інертних носіїв [20]:

$$V_H = \frac{\pi d_H^3}{6} n_H = \frac{\pi d_H^3}{6} \frac{f_H}{\pi d_H^2} = \frac{f_H d_H}{6}, \quad (10)$$

де n_H – кількість інертних носіїв.

Тоді:

$$n_H = \frac{f_{БП}}{\pi \left[d_H^2 + (d_H + 2\delta_{БП})^2 \right]}, \quad (11)$$

де $f_{БП}$ – площа поверхні біоплівки, м²
 d_H – діаметр інертного носія біоплівки (активоване вугілля АГ-3)=0,0036 м;

$\delta_{БП}$ – товщина біоплівки на інертних носіях =0,002м.

Враховуючи, що:

$$f_{БП} = \frac{V_1(S_1 - S_2)}{r_x \chi_m \delta_{БП}}, \quad (12)$$

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

де V_1 – об'єм стічної води в виділення субстрату; x_M – біореакторі; S_1 – початкова концентрація активного мулу в концентрація органічних домішок (субстрату) в стічній воді; S_2 – кінцева концентрація органічних домішок в стічній воді; γ_x – питома швидкість визначимо наступним чином [8]:

$$V_{BP} = \frac{\pi}{6} \left[(d_H + 2\delta_{BP})^3 - d_H^3 \right] \cdot n_H. \quad (13)$$

Для інтенсифікації процесу теплообміну сорочку біореактора розділяють поперечними перегородками на спіральні канали.

Як відомо, маса біоплівки, яка знаходиться на інертних носіях:

$$G_{BP} = V_{BP} \rho_{BP}. \quad (14)$$

Тоді, маса інертних носіїв:

$$G_H = V_H \rho_H. \quad (15)$$

Знайдемо об'єм виділеного метану [10]:

$$V_{CH_4} = V_1 (S_1 - S_2) \cdot 0.38, \quad (16)$$

де $0,38 \text{ м}^3 \text{ CH}_4 / \text{кг ХСК}$ – коефіцієнт перерахунку при 25°C та об'єм виділеного біогазу:

$$V_{BG} = \frac{V_{CH_4}}{X_{CH_4}}. \quad (17)$$

Тоді, маса виділеного біогазу [2]:

$$G_{BG} = V_{BG} \rho_{BG}, \quad (18)$$

де ρ_{BG} – густина біогазу:

$$\rho_{BG} = \left[X_{CH_4} \rho_{CH_4}^0 + (1 - X_{CH_4}) \rho_{CO_2}^0 \right] \frac{273}{273 + t_{BG}}, \quad (19)$$

де $t_{BG} = 25^\circ \text{C}$ – середня температура біогазу;

$$\rho_{CH_4}^0 = 0,72 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$\rho_{CO_2}^0 = 1,98 \text{ кг} / \text{м}^3$ – густина відповідно метану та двоокису вуглецю при 0°C [9].

Процес утворення біогазу відбувається при постійному

перемішуванні суспензії в біореакторі. Визначальним фактором є число обертів перемішуючого пристрою. Враховуючи рівняння об'ємної концентрації дисперсної фази в біореакторі, густину та коефіцієнт динамічної в'язкості суспензії, знайдемо критерій Архімеда [4]:

$$Ar = \frac{g(d_n + 2\delta_{БП})^3}{\nu_1^2} \cdot \frac{\rho_d - \rho_1}{\rho_1}, \quad (20)$$

де $\nu_1 = 0,705 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості води при температурі $t_B = 37^\circ \text{C}$ [3].

Для визначення умови утворення суспензії в біореакторі з рамною мішалкою скористаємось рівнянням (17) [10]:

$$\frac{n_o d_M \rho_c}{\mu_c} = 4,9 Ar \left(\frac{d_n + 2\delta_{БП}}{d_M} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{D}{d_M} \right)^0. \quad (21)$$

Тоді, число обертів перемішуючого пристрою:

$$n_o = 4,9 Ar \left(\frac{d_n + 2\delta_{БП}}{d_M} \right)^{0,5} \cdot \frac{\mu_c}{d_M \rho_c}, \quad (22)$$

де d_M – діаметр рамної мішалки.

Як правило, у біореакторах з інертним носієм біоплівки використовують рамні, якірні,

пропелерні та турбінні мішалки. На рис. 5 аналізується найбільший приріст кількості метану, який досягається при значенні $Re_c = 160 \cdot 10^3$.

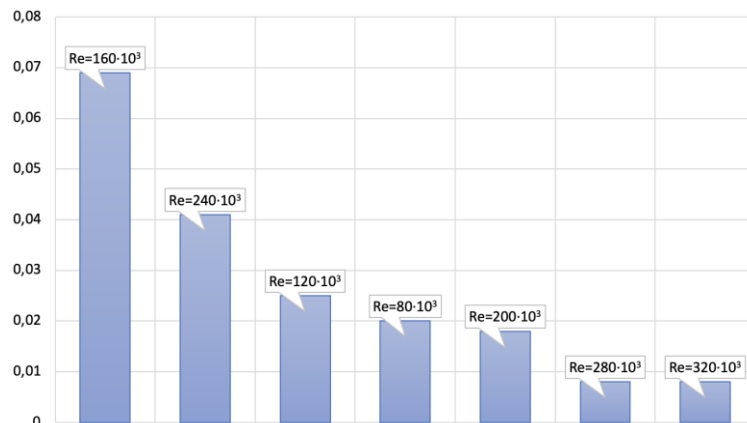


Рис. 5. На діаграмі відображено приріст кількості метану для різних значень критерію Рейнольдса від об'єму виділеного метану

У процесі досліджень були виміряні об'єми виділеного біогазу при різних числах обертів перемішуючого пристрою та розраховані значення критерія Рейнольдса, який характеризує вплив гідродинаміки на процес одержання біогазу, при відповідних обертах. Графічна залежність $V_{CH_4} = f(Re_u)$

(рис. 3), яка наглядно демонструє збільшення кількості виділеного біогазу при зростанні критерію Рейнольдса (5) до певної величини. При цьому, темп збільшення кількості метану, який виділяється в біореакторі (2) V_{CH_4} спадає. Це тому, що біоплівка утримується на інертних носіях до певного значення числа

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

обертів перемішуючого пристрою. При перевищенні цієї величини відбувається відрив біоплівки від носіїв, що призводить до зменшення кількості виділеного біогазу.

У ході проведених досліджень була визначена ще одна важлива величина – питома швидкість виділення субстрату (3) $r_{x,m}$, без якої неможливо розрахувати поверхню біоплівки, тобто провести розрахунки продуктивності біореактора. Побудований графік залежності кількості утвореного метану від швидкості виділення субстрату (рис. 4) вказує на зменшення темпу росту кількості метану. У результаті з'ясувалося, що найбільший приріст кількості метану досягається при значенні $Re_{ц}=160 \cdot 10^3$ (16), (рис. 5). Це досягається підібраними за технічними характеристиками типами перемішуючих пристроїв. Серед багатьох типів перемішуючих пристроїв перевага надана рамним і якірним мішалкам. По-перше, ці мішалки працюють при низьких числах обертів, що сприяє утриманню біоплівки на поверхні інертних носіїв. По-друге, геометричні параметри мішалок цих типів значно зменшують контактування інертних носіїв біоплівки зі стінкою біореактора, та заважаючи відриву біоплівки.

Висновки і перспективи.

1. Проведені дослідження впливу гідродинаміки на процес одержання біогазу в анаеробних умовах. Так, в біореакторі з перемішуючим

пристроєм створюється режим подібний до режиму псевдозрідження, але спостерігається такий стан, при якому не руйнується біоплівка і утримується на носіях.

2. Використання розрахункових залежностей біореактора з перемішуючим пристроєм та рухомим носієм біоплівки дозволило з'ясувати характер процесу. На рис. 4 показана графічна залежність кількості утвореного метану від швидкості виділення субстрату $V_{CH_4} = f(r_{x,m})$. При чому темп росту кількості метану зменшується. Це пов'язано з тим, що концентрація ХСК в стічній воді зі збільшенням швидкості виділення субстрату зменшується.

3. Підбір оптимального числа обертів різних типів перемішуючих пристроїв від $0,25c^{-1}$ до $2c^{-1}$ дозволяє забезпечити поверхню теплообміну біореактора, яка необхідна для відведення тепла та виділяється в процесі одержання біогазу. Для кожного числа обертів перемішуючого пристрою визначалась кількість зібраного біогазу при умові не руйнування біоплівки. Виходячи із проведених в роботах [6, 7] досліджень на процес утворення біогазу в запропонованій конструкції, біореактор із перемішуючим пристроєм можна віднести до високопродуктивних процесів.

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

Список використаних джерел

1. Singh, V. Effect of corn quality on bioethanol production. *Biocanal. Agric. Biotechnol.*, 2012. 1, 353-355. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2012.06.001>
2. Eriksen, N.T. The technology of microalgal culturing. *Biotechnol.*, 2008. 30, 1525-1536. <https://doi.org/10.1007/s10529-008-9740-3>.
3. Мельник В., Ружинська Л., Воробйова О. Аналіз існуючих біореакторів з іммобілізованими мікроорганізмами. *Комунальне господарство міст.* 2019. 3(149), 51-57. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-3-149-51-57>.
4. Siti Nur Hatika Abu Bakar, Hassimi Abu Hasan, Abdul Wahab Mohammad, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Teow Yeit Haan, 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>
5. Roent Dune A Cayetano, Gi-Beom Kim, Jungsu Park, Yung-Hun Yang, Byong-Hun Jeon, Min Jang, Sang-Hyoun Kim. Roent Dune A. et al. Cayetano Biofilm formation as a method of improved treatment during anaerobic digestion of organic matter for biogas recovery. *Bioresour Technol.* 2022 Jan;344(Pt B):126309. Epub 2021 Nov 16. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126309>
6. Santhana Raj Deena, Gopalakrishnan Kumar, A.S. Vickram, Reeta Rani Singhania, Cheng-Di Dong, Karunakaran Rohini, K. Anbarasu, S. Thanigaivel, Vinoth Kumar Ponnusamy. Efficiency of various biofilm carriers and microbial interactions with substrate in moving bed-biofilm reactor for environmental wastewater treatment. *Bioresour Technol.* 2022 September. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127421>
7. F. Morgan-Sagastume, S. Jacobsson, L.E. Olsson, M. Carlsson, M. Gyllenhammar, I. Sárvári Horváth. Anaerobic treatment of oil-contaminated wastewater with methane production using anaerobic moving bed biofilm reactors. *Water Research.* Volume 163, 15 October 2019, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.07.018>

8. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов/Под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова, 10-е изд. перераб. и доп. Л.: Химия, 1987, 576 с.

9. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972, 720с.

10. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд., пер.и доп, М., Химия, 1973, 754с.

References

1. Singh, V. (2012). Effect of corn quality on bioethanol production. *Biocanal. Agric. Biotechnol.*, 1, 353-355. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2012.06.001>
2. Eriksen, N.T. (2008). The technology of microalgal culturing. *Biotechnol.*, 30, 1525-1536. <https://doi.org/10.1007/s10529-008-9740-3>.
3. Mel'nick V., Rhuzinska L., Vorobiova O. (2019). Analysis of existing bioreactors with immobilized microorganisms. *Municipal Economy of Cities*, 3(149), 51-57. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-3-149-51-57>.
4. Siti Nur Hatika Abu Bakar, Hassimi Abu Hasan, Abdul Wahab Mohammad, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Teow Yeit Haan, 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>
5. Roent Dune A Cayetano, Gi-Beom Kim, Jungsu Park, Yung-Hun Yang, Byong-Hun Jeon, Min Jang, Sang-Hyoun Kim. Roent Dune A. et al. Cayetano (2022). Biofilm formation as a method of improved treatment during anaerobic digestion of organic matter for biogas recovery. *Bioresour Technol.* 2022 Jan;344(Pt B):126309. Epub 2021 Nov 16. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126309>
6. Santhana Raj Deena, Gopalakrishnan Kumar, A.S. Vickram, Reeta Rani Singhania, Cheng-Di Dong, Karunakaran Rohini, K. Anbarasu, S. Thanigaivel, Vinoth Kumar Ponnusamy. (2022). Efficiency of various

Мельник В. М., Шафarenко М. В., Ружинська Л. І., Остапенко Ж. І., Косова В. П., Горбунов А. Д.

biofilm carriers and microbial interactions with substrate in moving bed-biofilm reactor for environmental wastewater treatment. Bioresource Technology Volume 359, September 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127421>

7. Morgan-Sagastume F., Jacobsson S., Olsson L.E., Carlsson M., Gyllenhammar M., Sárvári I. Horváth (2019). Anaerobic treatment of oil-contaminated wastewater with methane production using anaerobic moving bed biofilm reactors. Water Research. Volume 163, 15 October 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.07.018>

8. Pavlov K.F., Romannoe P.G., Noskov A.A. (1987). Examples and tasks for the course of Processes and devices of chemical technology. Leningrad: Chemistry, 576. ISBN 9785918720318

9. Vargaftik N.B. (1972). Handbook on thermophysical properties of gases and liquids. M.: Nauka. 720.

10. Kasatkin A.G. (1973). Basic processes and apparatuses of chemical technology. 9th ed., trans. and additional. M. Chemistry. 754.

EFFICIENCY OF USING AN ANAEROBIC BIOREACTOR FOR WASTEWATER TREATMENT

V. Mel'nyk, M. Shafarenko, L. Rhuzinska, Z. Ostapenko,
V. Kosova, A. Gorbunov

Abstract. *The object of study is the process of biogas production in a bioreactor with a stirring device and an inert biofilm carrier. The problematic issue is the retention of biofilm on inert media at a certain number of revolutions of the stirrer. A scheme of a laboratory setup for studying the process of biogas production in a bioreactor with an inert carrier is presented. An important value was determined - the specific rate of substrate release $r_{X,M}$, without which it is impossible to calculate the biofilm surface and determine the amount of methane released. The influence of hydraulic flow (Reynolds criterion) on methane formation was determined. The number of revolutions of the stirring device was selected to keep the biofilm on inert media and prevent its detachment. The process of mass transfer of the substrate from wastewater to the surface of the biofilm; conversion of the substrate by active acidogenic biomass into acetic acid; conversion of acetic acid by methanogenic biomass into biogas is considered. The advantage of the proposed study of the influence of hydrodynamics on the process of biogas production in anaerobic conditions from the process of fluidization, in that, due to the intensive circulation of the liquid, it is possible to detach the biofilm from the surface of the inert media, is emphasized. It is proposed to create an optimal bioreactor apparatus that would fully ensure such a technological process. In the optimal mode of operation of the bioreactor, the number of revolutions of the stirring device is $n = 2$ rpm. The final concentration of the substrate in the wastewater reaches the value $S_2 = 0.1$ kg COD/ m^3 . The amount of methane produced is $V_{CH_4} = 0.409$ m^3 /day. It can be used in practice in the wastewater treatment of the following industries: dairies, meat processing plants, in the production of juices and wines in food production. These enterprises have a high content of organic matter in their wastewater. This leads to an increased amount of biogas produced.*

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

Keywords: *bioreactor design, biogas production, anaerobic conditions, moving biofilm carrier*