

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕМБРАННИХ ПРОЦЕСІВ У БІОТЕХНОЛОГІЯХ ПОГЛИНАННЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Дячок В.В. д. т. н. професор  
Національний університет «Львівська Політехніка»

*Анотація.* Зміна клімату на сьогоднішній день є глобальною проблемою, яка охоплює всі сфери життя людства - від екосистем до економіки та соціальної стабільності. Основними причинами змін клімату є порушення балансу природніх циклів гетероатомів і в першу чергу вуглецевого циклу. У цьому контексті постає термінова потреба у застосуванні сучасних підходів до зменшення негативних наслідків змін клімату та пристосування до них. В сучасних умовах світова спільнота приділяє велику увагу проблемі зменшенню викидів парникових газів. Емісія вуглекислого газу викликає неконтрольовані наслідки в цілому для всього доквілля. Основними напрямками скорочення викидів вважаються перехід на відновлювані джерела енергоносіїв та депонування вуглекислого газу у високомолекулярні сполуки та формувати їх у біомасу. Найперспективнішим напрямком для реалізації цієї ідеї є застосування біотехнологічних процесів, які відкривають нові можливості у сферах очищення промислових газових викидів перед їх скиданням у атмосферу. В цьому контексті особливої уваги застосовують мікроводорості. Якщо врахувати те, що мікроводорості дедалі більше постають як одне з найбільш перспективних, стійких і довгострокових джерел біомаси для виробництва палива, та інших продуктів то це спонукає до розробки нових підходів, що сприятимуть підвищенню екологічної безпеки виробництв які продукують вуглекислий газ та інші забрудники, щої спричиняються до глобального потепління

У роботі досліджується потенціал біотехнологічних процесів, зокрема мікроводоростей у боротьбі з глобальним потеплінням. Показано, що барботуванням кімнатного повітря, з вмістом вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) 0,04% у фотобіореакторі з мембранним модулем, можна зменшити  $\text{CO}_2$  до граничного значення 0,013%, що свідчить про те, що мембранний фотобіореактор за рахунок інтенсифікації процесу перетворення та фіксації вуглекислого газу під час фотосинтезу мікроводоростей, є перспективним рішенням для видалення  $\text{CO}_2$  газового середовища у закритому просторі або приміщенні, а також із промислових газових викидів. В роботі також розроблено комплексний метод математичного опису переходу  $\text{CO}_2$  із газової фази у рідку, проросту клітин мікроводоростей у культуральному середовищі в залежності від концентрації  $\text{CO}_2$  у вихідному газі, а також інтенсивності УФ-опромінення.

*Keywords:* мікроводорості, поглинання парникових газів, біотехнології, математичний опис, фотобіореактор, мембранний модуль, динаміка проросту.

**Формулювання проблеми.** Глобальне потепління є одним із найгостріших викликів сучасності, що загрожує екосистемам, продовольчій безпеці, здоров'ю людей і стабільності розвитку суспільств в цілому. Підвищення температури, рівня світового океану, часті екстремальні погодні явища та зниження біорізноманіття - це лише частина наслідків, які вже фіксуються в різних регіонах планети. В подальшому непередбачувані наслідки для розвитку світової економіки, та інші супутні застереження обговорюється на щорічних світових економічних форумах [1].

В сучасних умовах світова спільнота приділяє велику увагу проблемі зменшення викидів парникових газів. Емісія вуглекислого газу обумовлює неконтрольовані наслідки для зміни клімату та в цілому для всього доквілля. Зміна клімату на сьогоднішній день є глобальною проблемою, яка охоплює всі сфери життя людства - від екосистем до економіки та соціальної стабільності. У цьому контексті постає термінова потреба у застосування сучасних підходів до зменшення негативних наслідків змін клімату та пристосування до них. Основними напрямками скорочення викидів вважаються перехід на відновлювані джерела енергоносіїв та депонування вуглекислого газу в органічні високомолекулярні сполуки, які в подальшому мають сприяти відновленню ресурсів та поверненню в кругообіг речовин вуглецю, азоту, фосфору, сірки та іншим біогенним елементам [2,3]. Досягнення цього результату є можливим при умові застосування біотехнологічних процесів, які відкривають нові можливості у таких сферах, як промислове виробництво, енергетика, сільське господарство в ракурсі очищення газових викидів перед їх скиданням у атмосферу. Від так стає можливим вирішення важливого завдання – управління надходженнями парникових газів у доквілля. Основна увага зосереджується на балансі вуглецевого циклу.

Одним із способів вирішення цих питань полягає у залученні все більшої уваги фахівців з біоінженерії. Біотехнологічні методи поглинання парникових газів із залученням мікроводоростей передбачають достеменне вивчення складних біотехнологічних процесів. Мікроводорості поглинають вуглекислий газ  $\text{CO}_2$  із повітря чи газу і перетворюють його на органічну молекулу з якої є можливість отримувати від джерел енергії до продуктів харчування, лікарських засобів тощо [4,5,6].

Проведені дослідження дозволяють стверджувати той факт, що ці рослини еволюціонували протягом мільярдів років, щоб виробляти та зберігати енергію у формі високомолекулярних органічних сполук, і вони роблять це ефективніше, ніж будь-який інший відомий інженерний процес. Результати показують, що інвестиції в проект біомаси мікроводоростей можуть бути пов'язані з різними біотехнологічними процесами, які включають: їх ріст, збір біомаси, її переробку. Аналізуючи ефективність таких підходів, слід констатувати їхній суттєвий внесок у скорочення антропогенних викидів парникових газів із яких CO<sub>2</sub> є найнебезпечнішим, а також сприяння у відновленні екосистем та підвищення стійкості навколишнього середовища [7,8,9].

**Мета роботи полягає** у вдосконаленні біотехнологічних процесів для залучення мікроводоростей до поглинання парникових газів та розробці нових способів поєднання обладнання, що сприятиме підвищенню екологічної безпеки виробництв.

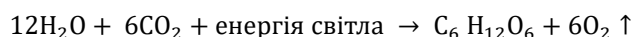
#### **Теоретична частина.**

Дослідження з видалення CO<sub>2</sub> за допомогою мікроводоростей зосереджені головним чином у двох сферах: димові гази (зазвичай з вмістом 10-20% CO<sub>2</sub>) та повітря в закритому просторі в якому, як правило, CO<sub>2</sub> не більше 1,0%. Своєчасне та ефективне видалення CO<sub>2</sub> із газового середовища, за допомогою мікроводоростей, які культивуються у фотобіореакторі, є одним із важливих біорегенеративних методів забезпечення безпечного та надійного життєвого середовища.

Існують деякі опубліковані роботи про видалення CO<sub>2</sub> і відновлення O<sub>2</sub> в закритих приміщеннях за допомогою фотосинтетичного виробництва мікроводоростей [9,10]. Однак біотехнологічним процесам, які супроводжуються поглинанням CO<sub>2</sub> та виділенням O<sub>2</sub> необхідно більше приділяти уваги із-за двох важливих наступних факторів, які стосуються максималізації та ефективності видалення CO<sub>2</sub> в системах, що одержали назву – біорегенеративні.

Отож ефективне та результативне залучення мікроводоростей для поглинання парникових газів залежить від ряду фундаментальних речей, які включають :

- рівномірний розподіл клітин мікроводоростей за всім об'ємом фотобіореактора, що забезпечуватиме достатню дозу ультрафіолетового опромінення, оскільки фотосинтез без світлової енергії є дещо обтяжливим, якщо не сказати більше – неможливим;



- ефективне перенесення CO<sub>2</sub> із газової фази в рідку фазу;  
 - посилене засвоєння аніонів, зокрема вуглекислоти (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) клітинами мікроводоростей;  
 - ефективне видалення кисню (O<sub>2</sub>), що утворюється під час фотосинтетичного процесу, оскільки він виступає інгібітором приросту біомаси мікроводоростей [8,10].

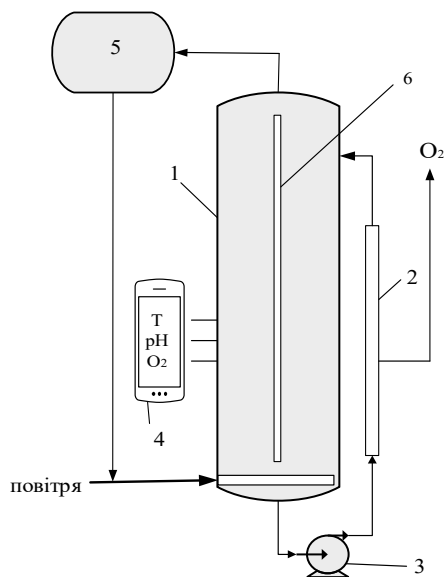
Таким чином, інтенсифікувати процеси поглинання парникових газів можна за рахунок низки приведених чинників, серед яких останній є найменш вивченим. Оскільки кисень виступає інгібітором приросту біомаси мікроводоростей, від так інгібітором поглинання вуглекислого газу. Вуглекислий газ функціонує як джерело вуглецю для більшості водоростей, а асимільований вуглець становить близько 50% біомаси водоростей.

Метою роботи в найбільш загальному викладі є аналіз існуючих біотехнологічних методів залучення мікроводоростей для поглинання парникових газів та розробка нових підходів, що сприятимуть підвищенню екологічної безпеки виробництв, які їх продукують.

#### **Експериментальна частина.**

Дослідна установка містила фотобіореактор-1, обладнаний мембранним модулем-2 з порожнистими волокнами для видалення розчиненого кисню (O<sub>2</sub>) із середовища поглинання парникових газів середовища мікроводорості *Chlorella vulgaris*. Насоса - 3, який забезпечував транспотування культиватійного середовища з основного об'єму фотобіореактора через мембранний модуль та повернення його у фотобіореактор. Введення мембранного модуля забезпечувало видалення розчиненого кисню, як інгібітора фотосинтезу та покращення фіксації вуглекислого газу мікроводоростями. Крім цього установка обладнана трьома датчиками, що вимірюють температуру, рН і розчинений кисень (O<sub>2</sub>), які були розміщені на дні фотобіореактора, і визначали параметри культурального середовища мікроводоростей, в режимі онлайн і реєструвалися гаджетом. В такий спосіб фіксували під час виконання експериментальної частини температуру, рН і розчинений кисень (O<sub>2</sub>). Люмінісцентна лампа - 6 забезпечувала УФ освітлення без якого фотосинтез є неможливим.

Вміст клітин мікроводоростей (концентрацію біомаси) визначали фотоколориметричним методом при синьому світлі, за калібрувальним графіком залежності оптичної густини культурального середовища від концентрації біомаси.

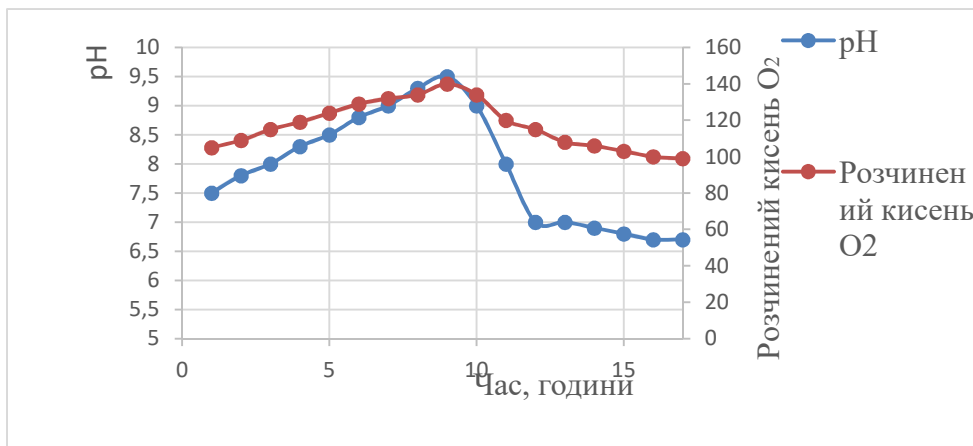


1 – фотобіореактор, 2 – мембранний модуль, 3 – насос, 4 – датчики для вимірювання температури, рН, розчиненого кисню O<sub>2</sub>, 5 – проміжна ємність, 6 – люмінесцентна лампа.

**Рис.1 – Схема експериментальної установки**

Відомо, що такі фактори, як температура, навантаження поживними речовинами та УФ-опромінення, мають прямий вплив на продуктивність поглинання парникових газів серед яких CO<sub>2</sub> є найнебезпечніший. В той же час локальна концентрація вуглекислого газу в будь якій точці барботажної колони (фотобіореактора) повинна бути вище мінімального порогу для підтримки фотосинтезу, щоб уникнути обмеження вуглецю.

Експеримент у фотобіореакторі без роботи мембранного модуля. На рисунку 1 представлений графік часових змін рН та розчиненого O<sub>2</sub> в умовах 9 годин світлової культивування мікродоростей *Chlorella vulgaris* у фотобіореакторі, без роботи мембранного модуля і 9 годин без освітлення (темряви).

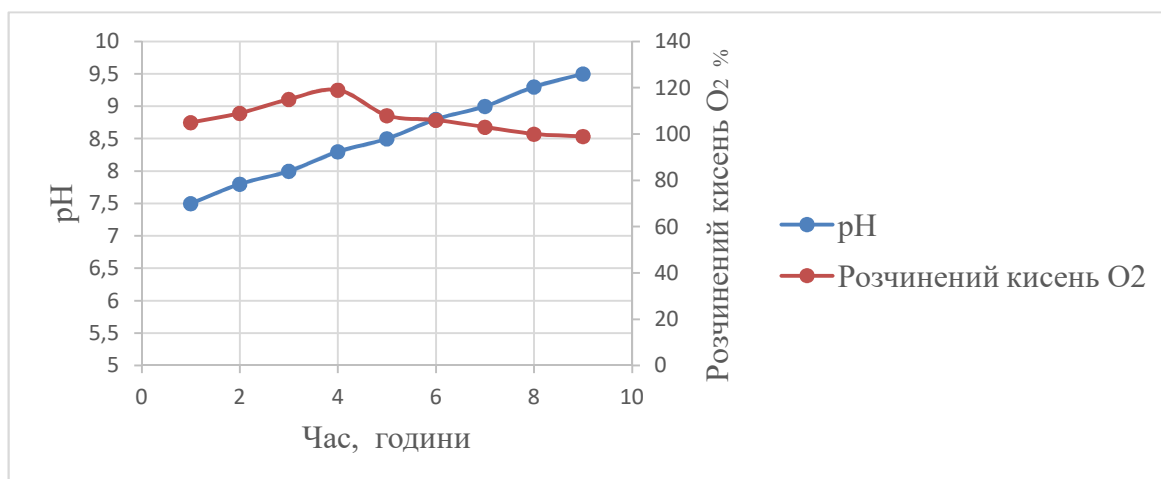


**Рис. 2 – Часовий хід зміни рН та розчиненого O<sub>2</sub> у фотобіореакторі без роботи мембранного модуля - 9 годин світло, 9 годин темрява**

Як видно з рисунку 1 у перші 9 годин експерименту зростає кількість розчиненого кисню, що є негативним явищем оскільки інгібує поглинання вуглекислого газу, зростає рН оскільки зменшується вміст вуглекислоти в середовищі культивування. Температура незначно але змінюється із проходження процесу поглинання вуглекислого газу за умови світлового опромінення. Зростає температура пояснюється транспортуванням культурального середовища в установці внаслідок чого виникає внутрішнього тертя умовних шарів рідини і має місце нагрів. Приріст клітин мікродоростей незначний за постійного вмісту вуглекислого газу - рисунок 3.

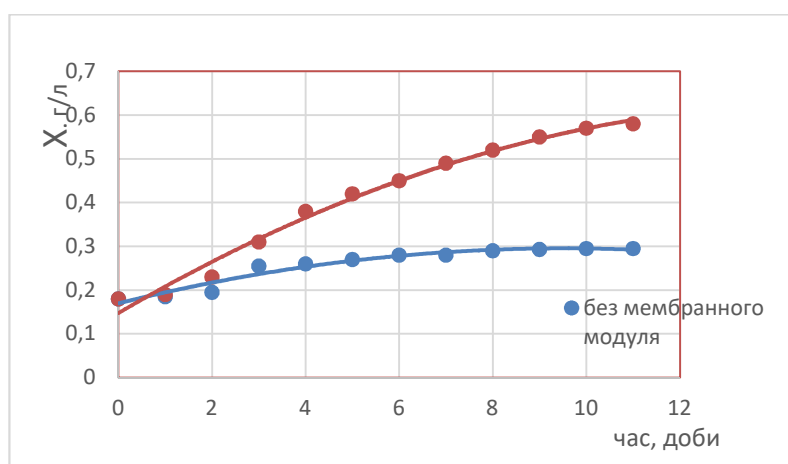
Експеримент у фотобіореакторі а умови роботи мембранним модулем. Як засвідчують результати експериментальних досліджень ефективно та результативно поглинання вуглекислого газу мікродоростями спостерігається за умов роботи мембранного модуля. Ефективного видалення розчиненого O<sub>2</sub>, що утворюється під час фотосинтетичного процесу, сприяє ефективному приросту клітин мікродоростей оскільки

усувається інгібітор.



**Рис. 3 – Часовий хід зміни рН та розчиненого O<sub>2</sub> у фотобіореакторі за роботи мембранного модуля - 9 год світло.**

Часовий хід T і рН є подібним до того, що показано на рисунку 1 вище, проте розчинений кисень різко впав після короткого періоду роботи мембранного модуля. Мембранний модуль сприяв видаленню розчиненого кисню із середовища поглинання вуглекислого газу. Таким чином, рН і температура ведуть себе аналогічно представленому вище а розчинений кисень O<sub>2</sub> знижувався проте не досягає нульового значення в мембранному фотобіореакторі. Приріст клітин мікрободоростей за цього ж вмісту вуглекислого газу у вихідному газі є значно більшим, що засвідчує більше поглинанням вуглекислого газу.



**Рис. 3 – Приріст клітин мікрободоростей у фотобіореакторі за умови роботи і не роботи мембранного модуля**

Отож, використовуючи звичайне кімнатне повітря з концентрацію CO<sub>2</sub> (0,04%), що подається у фотобіореактор, можна знизити його до граничного значення 0,013%, що свідчить про те, що мембранний фотобіореактор за рахунок процесу видалення розчиненого кисню дозволяє інтенсифікувати перетворення та фіксації CO<sub>2</sub> під час фотосинтезу мікрободоростей, що може бути перспективним рішенням для видалення CO<sub>2</sub> у закритому просторі або приміщенні.

Процеси у фотобіореакторі мікрободоростей викликають ряд проблем для проведення контролю та їх оптимізації. Тому потрібні математичні моделі, здатні кількісно визначити вплив критичних параметрів системи, таких як конфігурація фотобіореактора, масоперенесення CO<sub>2</sub> із газової фази у рідину, поглинання вуглекислого газу та інших поживних речовин клітинами мікрободоростей, вплив рН, температури на їх приріст.

На основі аналізу значної кількості різних досліджень запропоновано математичний опис для успішного прогнозування росту клітин мікрободоростей у фотобіореакторі. Найпростіша модель для прогнозування наростання значень величини клітин мікрободоростей, використовуючи кінетичні параметри росту, як функцію для максимізації продуктивності фотобіореактора включають наступні параметри;

швидкість переходу вуглекислого газу CO<sub>2</sub> із газової фази в рідку фазу представлена теорією подвійної плівки і має такий вигляд:

$$\frac{dC_{CO_2}}{dt} = R_c = k_c (C_s - C)V(1 - \varepsilon) :$$

де  $k_c$  – коефіцієнт масопередачі перенесення  $CO_2$  з газової фази у водну середовищі культивування,  $C_s$  – концентрація насичена  $CO_2$  в середовищі культивування,  $C$  – концентрація  $CO_2$  в середовищі культивування,  $V$  – об'єм фотобіореактора,  $\varepsilon$  – об'єм утримуваного газу.

Величину  $C$  визначають за рівнянням відповідно закону Генрі:

$$C = \frac{P_y M_m 1000}{R T h} :$$

де  $P$  – тиск,  $y$  – частка газової фази  $CO_2$ ,  $R$  – газова стала,  $T$  – температура,  $h$  – стала закону Генрі,  $M_m(HCO_3^-)$  – молярна маса йону гідрокарбонату.

Швидкість поглинання вуглекислого газу клітинами мікроводоростей можна виразити як функція загального спожитого вуглекислого газу  $Y_{(CO_2, зар)}$ , питомою швидкістю росту клітин мікроводоростей –  $\mu_x$  та концентрації біомаси –  $X$  :

$$\frac{dC_{CO_2}}{dt} = Y_{(CO_2, зар)} \mu_x X :$$

швидкістю росту клітин мікроводоростей  $\frac{dX}{dt}$ , може бути записана як різниця;

$$\frac{dX}{dt} = \mu_x X - k_d X$$

де  $k_d$  – швидкість втрати чи загибелі клітин мікроводоростей.

Відповідно до моделі Моно швидкість приросту клітин мікроводоростей, обмежена вмістом вуглекислого газу та може бути виражена як

$$\mu_x = \mu_o \left[ \frac{S_i}{K_i + S_i} \right]$$

де  $S_i$  – концентрація вуглекислого газу та інших поживних речовин (азоту N, фосфору P, тощо),

$K_i$  – константа напівнасичення вуглекислим газом та іншими поживними речовинами (азот N, фосфор P, тощо), які можуть обмежувати приріст мікроводоростей.

$\mu_o$  – питома швидкість росту визначається експериментально за умови нелімітованої кількості поживних речовин.

**Висновок.** Мембранний фотобіореактор за рахунок процесу видалення розчиненого кисню дозволяє інтенсифікувати перетворення та фіксації вуглекислого газу під час фотосинтезу мікроводоростей, що стає перспективним рішенням для поглинання  $CO_2$  із промислових газових викидів та у закритих приміщеннях.

Розроблено комплексний метод математичного опису швидкості переходу вуглекислого газу  $CO_2$  із газової фази в рідку, швидкість поглинання вуглекислого газу, приросту клітин мікроводоростей, а також інтенсивності УФ-опромінення за певних значень концентрацій  $CO_2$  у вихідному газі.

## References

1. TSN.ua. (2017, March 25). *Hlobalne poteplinnia. Yak Zemlia zminiue svoje oblychchia* [Global warming. How the Earth changes its face]. <https://tsn.ua/special-projects/warming/>
2. Martínez-Huitle, C. A., Rodrigo, M. A., Sirés, I., & Scialdone, O. (2023). A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 328(13-14), 122430.
3. Dyachok, V., Kochubei, V., & Huhlych, S. (2025). Production of biofuel based on the transformations of greenhouse gases. *Journal Environmental Problems*, 10(2), 97–103. <https://doi.org/10.23939/ep2025.02.097>
4. Bodnar, O. I. (2017). Biotekhnolohichni perspektyvy vykorystannia mikrovodorostei: osnovni napriamy (ohliad) [Biotechnological prospects for the use of microalgae: Main directions (review)]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biolohiia*, (1/68), 138–146.
5. Tsarenko, P., Borysova, O., & Blium, Ya. (2011). Mikrovdorosti yak ob'iekt bioenerhetyky: vydy kolektsii IBASU-A-perspektyvni produktenty biomasy yak dzherela syrovyny dlia biopalyva [Microalgae as an object of bioenergy: Species of the IBASU-A collection as prospective producers of biomass as a source of raw material for biofuel]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (5), 49–54.
6. Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Lea-Smith, D. J., Purton, S. (2010). Algae biodiesel: Challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3), 277–286.
7. Cheng, L. H., Zhang, L., Chen, H. L., & Gao, C. J. (2005). Advances on  $CO_2$  fixation by microalgae. *Journal of Biotechnology*, 21, 178–181.
8. Dyachok, V. V., Mandryk, S., Katysheva, V., & Huhlych, S. (2019). Effect of fuel combustion products on carbon dioxide uptake dynamics of chlorophyll synthesizing microalgae. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6). <https://doi.org/10.12911/22998993/108695>
9. Dyachok, V. V., Mandryk, S. T., Huhlych, S. I., & Slyvka, M. M. (2020). Study on the impact of activators in the presence of an inhibitor on the dynamics of carbon dioxide absorption by chlorophyll-synthesizing microalgae. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5). <https://doi.org/10.12911/22998993/122674>

# APPLICATION OF MEMBRANE PROCESSES IN GREENHOUSE GAS ABSORPTION BIOTECHNOLOGIES

Vasil Dyachok, Doctor of Engineering Science, Professor  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract.** *Climate change is today a global problem that covers all spheres of human life - from ecosystems to economy and social stability. The main causes of climate change are impaired balance of natural cycles of heteroatoma and primarily the carbon cycle. In this context, there is an urgent need to apply modern approaches to reducing the negative effects of climate change and adaptation. In today's context, the world community pays great attention to the problem of reducing greenhouse gas emissions. Carbon dioxide emission causes uncontrolled effects as a whole for the whole environment. The main directions of emissions reduction are the transition to renewable energy sources and carbon dioxide deposition into high molecular weight compounds and to form them in biomass. The most promising area for the implementation of this idea is the use of biotechnological processes that open up new opportunities in the fields of purification of industrial gas emissions before being discharge into the atmosphere. In this context, special attention is used to use microvodes. Considering that microvodes are increasingly emerging as one of the most promising, sustainable and long-term biomass sources for fuel production, and other products, it encourages the development of new approaches that will increase the environmental safety.*

*The work examines the potential of biotechnological processes, in particular the microvodes in the fight against global warming. It is shown that the bubbling of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) 0.04% in a photobioreactor with a membrane module can be reduced to a maximum value of 0.015%, indicating that the membrane photoboreoactor is available by the intensification of the carbon and locking of the carbon -and -lock of the carbon -lactation of the carbon. A promising solution for removing the CO<sub>2</sub> gas environment in a closed space or room, as well as from industrial gas emissions. The work also developed a comprehensive method of mathematical description of the transition of CO<sub>2</sub> from the gas phase to the liquid, the growth of microseelectric cells in the cultural environment, depending on the concentration of CO<sub>2</sub> in the source gas, as well as the intensity of UV radiation.*

**Keywords:** *microalgae, greenhouse gas absorption, biotechnology, mathematical model, photobioreactor, membrane module growth dynamics*

## Список використаної літератури

1. Глобальне потепління. Як Земля змінює своє обличчя. Спецпроект ТСН.ua. <https://tsn.ua/special-projects/warming/>. – від 25 березня 2017.
2. Carlos A. Martínez-Huitle, Manuel A. Rodrigo, Ignasi Sirés, Onofrio Scialdone. (2023). A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water Applied Catalysis B: *Environment and Energy*, 328(13-14):122430
3. Vasyly Dyachok, Viktoria Kochubei, Serhiy Huhlych. [Production of biofuel based on the transformations of greenhouse gases](https://doi.org/10.23939/ep2025.02.097), Journal Environmental Problems Volume 10, Number 2, 2025 pp. 97-103. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2025.02.097>
4. Боднар О. І. Біотехнологічні перспективи використання мікроводоростей: основні напрями (огляд) / О. І. Боднар // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія. – 2017. – Вип. 1(68) : Тернопільські біологічні читання - Ternopil Bioscience - 2017. – С. 138–146.
5. Царенко, П., Борисова, О., & Блюм, Я. (2011). Мікроводорості як об'єкт біоенергетики: види колекції IBASU-A-перспективні продуценти біомаси як джерела сировини для біопалива. Вісник Національної академії наук України, (5), 49-54.
6. SA Scott, MP Davey, JS Dennis, I. Horst, CJ Howe, DJ Lea-Smith et al. "Algae biodiesel: challenges and prospects", Current opinion in biotechnology, Vol. 21, p. 277-286, 2010
7. Lh. Cheng, L. Zhang, Hl Chen, CJ Gao, Advances on CO<sub>2</sub> Fixation by microallands, ranking. J. Biotechnol. 21 (2005) 178-181.
8. SA Scott, MP Davey, JS Dennis, I. Horst, CJ Howe, DJ Lea-Smith et al. "Algae biodiesel: challenges and prospects", Current opinion in biotechnology, Vol. 21, p. 277-286, 2010
9. Dyachok, V. V., Mandryk, S., Katysheva, V., & Huhlych, S. (2019). Effect of fuel combustion products on carbon dioxide uptake dynamics of chlorophyll synthesizing microalgae. Journal of Ecological Engineering, 20(6). <https://doi.org/10.12911/22998993/108695>
10. Dyachok, V. V., Mandryk, S. T., Huhlych, S. I., & Slyvka, M. M. (2020). Study on the impact of activators in the presence of an inhibitor on the dynamics of carbon dioxide absorption by chlorophyll-synthesizing microalgae. Journal of Ecological Engineering, 21(5). <https://doi.org/10.12911/22998993/122674>

Отримано в редакцію 10.06.2025

Received 10.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Approved 02.09.2025