

УДК 628.54

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-4>

ВИВЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ БІОТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЙОГО В ТЕХНОЛОГІЯХ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

Дячок Василь Володимирович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри екології та збалансованого природокористування
Національного університету «Львівська Політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-5376-5256

Венгер Ярослав Андрійович,

студент кафедри екології та збалансованого природокористування
Національного університету «Львівська Політехніка»

Венгер Любов Олександрівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та збалансованого природокористування
Національного університету «Львівська Політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-7490-1050

У статті розглядається потенціал використання сучасних біотехнологій, зокрема мікроводоростей, для зменшення концентрації парникових газів в атмосфері та впровадження технологій очищення повітря в межах концепції сталого природокористування. Мікроводорості розглядаються як перспективні агенти біофіксації CO₂ завдяки своїй здатності до інтенсивного фотосинтетичного поглинання вуглекислого газу та утворення біомаси. Основну увагу зосереджено на ефективності фотобіореакторів, що забезпечують контрольоване культивування мікроводоростей. Установлено, що атмосферне повітря з концентрацією CO₂ на рівні 0,04 % у разі барботування через мембранний фотобіореактор знижується до 0,013 %. Такий результат став можливим завдяки впровадженню мембранного модуля, який видаляє кисень – інгібітор фотосинтезу, що перешкоджає нормальному функціонуванню клітин мікроводоростей.

Запропоновано математичну модель процесу біофіксації, яка враховує параметри масоперенесення, початкову концентрацію CO₂, інтенсивність освітлення, динаміку росту біомаси та фотосинтетичну активність. Модель дає змогу здійснювати кількісну оцінку ефективності поглинання вуглекислого газу та оптимізувати параметри функціонування фотобіореактора під конкретні умови. Отримані експериментальні та модельні результати свідчать про можливість широкого застосування технології як у промислових умовах (очищення повітря на виробництвах, біофабриках), так і в ізольованих середовищах – наприклад, у лабораторіях, міських просторах із підвищеним рівнем забруднення або автономних космічних модулях.

Дослідження підтверджує значний потенціал використання мікроводоростей як одного з ключових інструментів у біотехнологічній утилізації CO₂, що набуває особливої актуальності в контексті глобальних кліматичних змін. Застосування подібних рішень сприяє розвитку екологічно безпечних технологій, підвищенню енергоефективності та сталому управлінню ресурсами в межах стратегії декарбонізації економіки.

Ключові слова: мікроводорості, поглинання парникових газів, біотехнології, mathematical model, мембранний фотобіореактор, динаміка приросту, математичне моделювання, глобальне потепління.

Dyachok Vasil, Venher Yaroslav, Venher Liubov. Studying the potential of biotechnology to use it in environmental protection technologies

The article discusses the potential of using modern biotechnologies, in particular microalgae, to reduce the concentration of greenhouse gases in the atmosphere and implement air purification technologies within the concept of sustainable environmental management. Microalgae are considered as promising agents for CO₂ biofixation due to their ability to intensively absorb carbon dioxide and produce biomass. The main focus is on the efficiency of photobioreactors that provide controlled cultivation of microalgae. It has been found that atmospheric air with a CO₂ concentration of 0.04 % is reduced to 0.013 % when bubbling through a membrane photobioreactor. This result was made possible by the introduction of a membrane module that removes oxygen, an inhibitor of photosynthesis that interferes with the normal functioning of microalgae cells.

A mathematical model of the biorefinery process is proposed that takes into account the parameters of mass transfer, initial CO₂ concentration, light intensity, biomass growth dynamics, and photosynthetic activity. The model makes it possible to quantify the efficiency of carbon dioxide absorption and optimize the parameters of the photobioreactor for specific conditions. The experimental and model results obtained indicate that the technology can be widely used

both in industrial environments (air purification in factories, bioprocessing plants) and in isolated environments, such as laboratories, urban areas with high levels of pollution, or autonomous space modules.

The study confirms the significant potential of using microalgae as one of the key tools in biotechnological CO₂ utilization, which is especially relevant in the context of global climate change. The use of such solutions contributes to the development of environmentally friendly technologies, energy efficiency, and sustainable resource management as part of the economy's decarbonization strategy.

Keywords: microalgae, greenhouse gas absorption, biotechnology, mathematical model, photobioreactor, growth dynamics.

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

У цьому контексті постає термінова потреба в застосуванні сучасних підходів до зменшення негативних наслідків змін клімату та пристосування до них [2; 3]. Одним із найперспективніших напрямів є застосування біотехнологічних процесів, які відкривають нові можливості у сферах сільськогосподарства, енергетики, а також очищення промислових газових викидів перед їх скиданням в атмосферу, а отже, і в довкілля та управління надходження парникових газів [4; 5].

Мікродорості поглинають вуглекислий газ CO₂ із повітря чи газу і перетворюють його на органічну молекулу, з якої є можливість отримувати багато що – від джерел енергії до продуктів харчування, лікарських засобів тощо. Проведені дослідження дозволяють стверджувати, 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 [7]. Результати досліджень показують, що інвестиції в проєкт біомаси мікродоростей можуть бути пов'язані з різними біотехнологічними процесами, які включають їх ріст, збір урожаю, дегідрогенезацію та перероблення. Аналізуючи ефективність таких підходів, слід констатувати їх суттєвий внесок у скорочення антропогенних викидів CO₂, відновлення екосистем та підвищення стійкості навколишнього середовища до антропогенного забруднення [8].

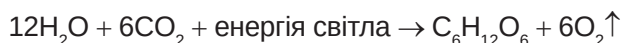
Дослідження з видалення CO₂ за допомогою мікродоростей зосереджені головним чином у двох сферах: очищення промислових газових викидів (зазвичай із вмістом 10–20 % CO₂) та очищення повітря в закритому середовищі

(як правило, не більше 1,0 % CO₂). Ефективне видалення CO₂ із середовища за допомогою мікродоростей, які культивуються у фотобіореакторі, є одним із важливих біореєнеративних методів забезпечення безпечного та надійного життєвого середовища.

Фотосинтетична активність мікродоростей супроводжується споживанням вуглекислого газу (CO₂) та виділенням кисню (O₂). Однак не так багато уваги приділено двом наступним важливим факторам, а саме оптимізації ефективності видалення CO₂ в біореєнеративних системах.

Ефективне та результативне залучення мікродоростей для поглинання парникових газів залежить від низки фундаментальних властивостей, які включають:

- рівномірний розподіл клітин мікродоростей 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 CO₂ із газової фази в рідку фазу;

- посилене засвоєння аніонів, зокрема аніону вуглекислоти (HCO₃⁻) клітинами мікродоростей;

- ефективне видалення O₂, що утворюється під час фотосинтетичного процесу, оскільки він виступає інгібітором приросту біомаси мікродоростей [9; 10].

Таким чином, кисень виступає інгібітором приросту біомаси мікродоростей, а отже, інгібітором поглинання вуглекислого газу. Вуглекислий газ функціонує як джерело вуглецю для більшості водоростей, а асимільований вуглець становить близько 50 % біомаси водоростей [8]. Локальна концентрація вуглекислого газу в будь-якій точці барботажної колонії (фотобіореактора) повинна бути вище мінімального порогу для підтримки фотосинтезу, щоб уникнути обмеження вуглецю [9].

Метою дослідження є аналіз сучасних біотехнологічних методів залучення мікродоростей для поглинання парникових газів та розроблення нових підходів, що сприятимуть

підвищенню екологічної безпеки виробництв, які їх продукують.

Методи та методики дослідження. Дослідження проводили в установці, зображеній на рисунку 1. Дослідна установка містила фотобіореактор 1, обладнаний мембранним модулем 2 з порожнистими волокнами для видалення O_2 із середовища культивування мікроводорості *Chlorella vulgaris*, і насос 3, що забезпечував транспортування культивацийного середовища з основного об'єму фотобіореактора через мембранний модуль та повернення його у фотобіореактор. Крім того, установка обладнана трьома датчиками, що вимірюють температуру, pH і розчинений кисень (O_2).

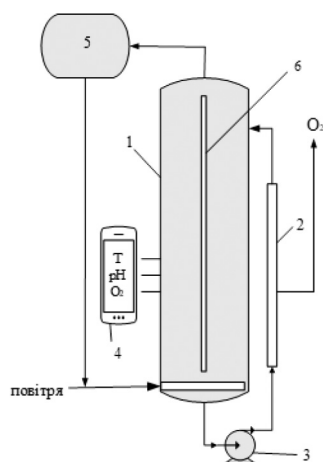


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – фотобіореактор, 2 – мембранний модуль, 3 – насос, 4 – датчики для вимірювання температури, pH, розчиненого кисню O_2 , 5 – проміжна ємність, 6 – люмінесцентна лампа

Вони вмонтовані на дні фотобіореактора і визначають параметри культурального середовища мікроводоростей в онлайн-режимі

й реєструються планшетом. Люмінесцентна лампа 6 забезпечує освітлення, необхідне для фотосинтезу.

Вміст клітин мікроводоростей визначали фотоколориметричним методом із синім світлофільтром, використовуючи калібрований графік залежності оптичної густини культурального середовища від вмісту клітин мікроводоростей у середовищі культивування [9].

Результати та дискусії. Введення мембранного модуля передбачало вилучення розчиненого кисню (O_2), як інгібітора фотосинтезу та покращення фіксацію вуглекислого газу CO_2 мікроводоростями у фотобіореакторі.

Відомо, що такі фактори, як температура, забезпечення поживними речовинами та освітлення, мають прямий вплив на продуктивність поглинання парникових газів, серед яких вуглекислий – найнебезпечніший.

Експеримент у фотобіореакторі без роботи мембранного модуля. На рисунку 2 представлено графік часових змін pH та O_2 за умови 9 год. освітлення у фотобіореактора без роботи мембранного модуля, культивування мікроводоростей *Chlorella vulgaris*.

Як видно з рисунку 2, зростає кількість розчиненого кисню, що є негативним явищем, адже інгібує поглинання вуглекислого газу, зростає pH, оскільки зменшується вміст вуглекислого газу в середовищі культивування. Температура незначно, але змінюється із проходженням процесу поглинання вуглекислого газу за умови освітлення. Зростання температури пояснюється транспортуванням культурального середовища через фотобіореактор в мембранний модуль і знову у фотобіореактор, унаслідок чого виникає внутрішнє тертя умовних шарів рідини, від чого має місце нагрів. Приріст біомаси мікроводоростей незначний за постійного вмісту вуглекислого газу.

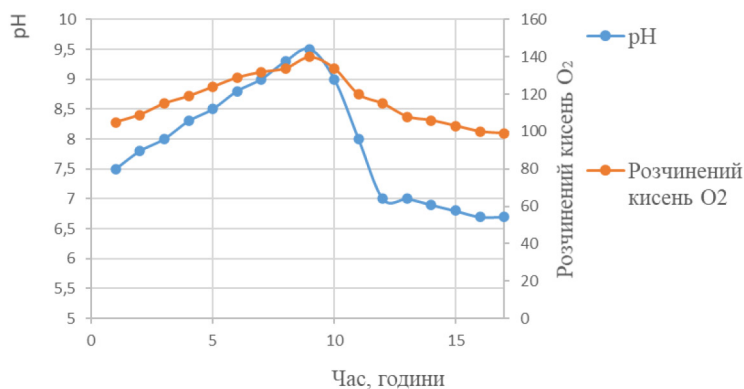


Рис. 2. Часовий хід зміни pH та O_2 у фотобіореакторі культивування мікроводоростей без роботи мембранного модуля, 9 год. – світло, 9 год. – темрява

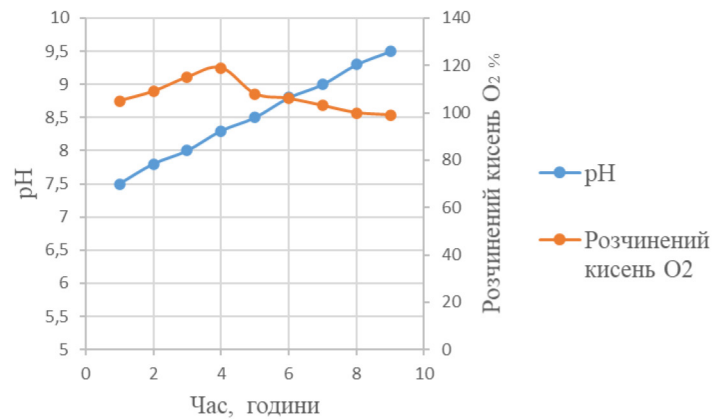


Рис. 3. Часовий хід зміни рН та O₂ у фотобіореакторі культивування мікродоростей – 9 год. світло

Експеримент у фотобіореакторі з мембранним модулем. Як засвідчують результати експериментальних досліджень, ефективно та результативно поглинання вуглекислого газу мікродоростями залежить від видалення O₂, що утворюється під час фотосинтетичного процесу, який виступає інгібітором приросту мікродоростей.

Часовий хід T та рН є подібним до того, що показано на рисунку 2 вище, проте вміст розчиненого кисню різко падає після введення в роботу мембранного модуля та видалення розчиненого кисню із середовища культивування. Тобто рН і температура ведуть себе аналогічно представленому вище, а вміст розчиненого кисню знижувався у фотобіореакторі, проте не досягнув нульового значення навіть за роботи мембранного модуля. Приріст біомаси за цього ж вмісту вуглекислого газу є значно більшим (рис. 4). Це зумовлює, відповідно, ефективніше поглинання вуглекислого газу.

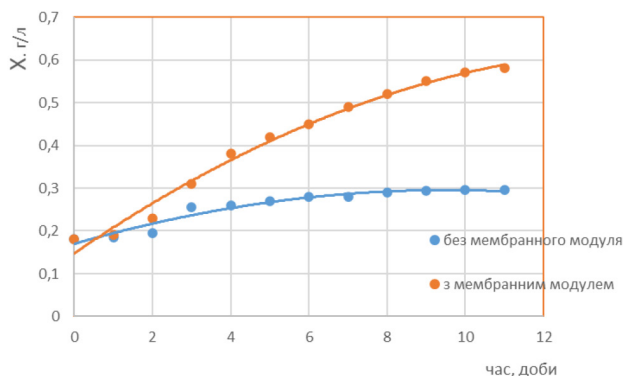


Рис. 4. Приріст клітин мікродоростей за умови роботи і не роботи мембранного модуля

Таким чином, за використання звичайного кімнатного повітря із вмістом вуглекислого газу 0,04 %, яке подається у фотобіореактор,

концентрація його зменшується до граничного значення 0,013 %, що свідчить про те, що мембранний фотобіореактор за допомогою процесу видалення розчиненого кисню дозволяє інтенсифікувати перетворення та фіксації CO₂ під час фотосинтезу мікродоростей. Цей результат може бути перспективним рішенням для видалення CO₂ не тільки із промислових газових викидів, а і в закритих середовищах або приміщеннях.

Складні біотехнологічні явища у фотобіореакторі спричиняють низку проблем для контролю та оптимізації процесу. Тому потрібні математичні моделі, здатні кількісно визначити та прогнозувати вплив критичних параметрів системи, як-от гідродинаміка у фотобіореакторі, масоперенесення CO₂ із газової фази в рідку, поглинання вуглекислого газу та поживних речовин клітинами мікродоростей, вплив рН, температури на приріст клітин мікродоростей.

На основі аналізу значної кількості різних досліджень запропоновано математичний опис для успішного прогнозування приросту мікродоростей у фотобіореакторі.

Найпростіша модель для прогнозування наростання значень величин вмісту клітин мікродоростей передбачає використання кінетичних параметрів приросту як функцію для оптимізації продуктивності біомаси у фотобіореакторі та включає такі параметри:

– швидкість переходу вуглекислого газу CO₂ із газової 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 CO₂ з газової фази в масову культуральну фазу,

C_s – концентрація, насичена CO₂,

C – концентрація неорганічного вуглецю CO₂ в середовищі культивування,

V – об'єм фотобіореактора,

ε – об'єм утримуваного газу.

Величину C визначають за рівнянням відповідно до закону Генрі:

$$C = \frac{P_y M_m 100}{RTh},$$

де P – тиск, y – частка газової фази CO_2 ,

R – газова стала,

T – температура, K ,

h – стала закону Генрі

та $M_m(\text{HCO}_3^-)$ – молярна маса гідрокарбонат аніону;

– швидкість поглинання вуглекислого газу

$\frac{dC_{\text{CO}_2}}{dt}$ культурою мікроводоростей можна виразити функцією концентрації клітин мікроводоростей (біомаси) – X , загального спожитого вуглекислого газу $Y_{(\text{CO}_2, \text{заг})}$ та питомою швидкістю росту мікроводоростей – μ_x :

$$\frac{dC_{\text{CO}_2}}{dt} = Y_{(\text{CO}_2, \text{заг})} X \mu_x;$$

– швидкість приросту біомаси водорос-

тей $\frac{dX}{dt}$ може бути записана як:

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

де k_d – швидкість втрати чи загибелі клітин біомаси.

Відповідно до моделі Моно, швидкість приросту мікроводоростей обмежена поживними речовинами, а величина μ_o 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 поживної речовини,

μ_o – питома швидкість приросту, що визначається експериментально за умови нелімітованої кількості поживних речовин.

Висновки. Залучення мембранних технологій у біотехнологіях, зокрема у фотобіореакторах культивування мікроводоростей за допомогою процесу видалення розчиненого кисню (O_2), дозволяє інтенсифікувати перетворення та фіксації вуглекислого газу (CO_2) під час фотосинтезу, що є перспективним рішенням для видалення CO_2 із промислових газових викидів у технологіях захисту довкілля.

У роботі розроблено комплексний метод математичного опису швидкості поглинання вуглекислого газу клітинами мікроводоростей, а також швидкості приросту клітин мікроводоростей для оцінювання впливу концентрації вуглекислого газу, розчиненого кисню та інтенсивності освітлення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Глобальне потепління. Як Земля змінює своє обличчя. Спецпроект ТСН.ua. URL: <https://tsn.ua/special-projects/warming/> (дата звернення: 25.03.2017).
2. Martínez-Huitle, C. A., Rodrigo, M. A., Sirés, I., Scialdone, O. 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*. 2023. Vol. 328, № 13–14. Article ID: 122430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122430>
3. Dyachok V., Kochubei V., Huhlych S. Production of biofuel based on the transformations of greenhouse gases. *Environmental Problems*. 2025. Vol. 10. № 2. P. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2025.02.097>
4. Боднар О. І. Біотехнологічні перспективи використання мікроводоростей: основні напрями (огляд). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2017. Вип. 1(68). С. 138–146.
5. Царенко П., Борисова О., Блюм Я. Мікроводорості як об'єкт біоенергетики: види колекції IBASU-A – перспективні продуценти біомаси як джерела сировини для біопалива. *Вісник Національної академії наук України*. 2011. № 5. С. 49–54. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2011_5_11
6. Scott S. A., Davey M. P., Dennis J. S., Horst I., Howe C. J., Lea-Smith D. J. Biodiesel from algae: Challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology*. 2010. Vol. 21, № 3. P. 277–286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cabio.2010.03.005>
7. Cheng L. H., Zhang L., Chen H. L., Gao C. J. Advances on CO_2 fixation by microalgae. *Chinese Journal of Biotechnology*. 2005. Vol. 21, № 2. P. 177–181.
8. Scott S. A., Davey M. P., Dennis J. S., Horst I., Howe C. J., Lea-Smith D. J., та ін.. Algae biodiesel: challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology*. 2010. Vol. 21. P. 277–286.
9. Dyachok V. V., Mandryk S., Katysheva V., Huhlych S. Effect of fuel combustion products on carbon dioxide uptake dynamics of chlorophyll synthesizing microalgae. *Journal of Ecological Engineering*. 2019. Vol. 20, № 6. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/108695>

10. Dyachok V. V., Mandryk S. T., Huhlych S. I., Slyvka M. M. 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*. 2020. Vol. 21, № 5. P. 157–164. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/122674>

REFERENCES:

1. TCH.ua. (2017). Hlobalne poteplinnia. Yak Zemlia zminiue svoie oblychchia [Global warming. How the Earth is changing its face]. *Spetsproekt TSN.ua – Special project*. Retrieved from <https://tsn.ua/special-projects/warming/> [in Ukrainian].
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: Environmental and Energy*, 328(13–14), Article 122430. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122430>
3. Dyachok, V., Kochubei, V., & Huhlych, S. (2025). Production of biofuel based on the transformations of greenhouse gases. *Environmental Problems*, 10(2), 97–103. Retrieved from <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 Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya. Biolohiia – Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series Biology*, (1)68, 138–146. [in Ukrainian]
5. Tsarenko, P., Borysova, O., & Blium, Y. (2011). Mikrovodorosti yak ob'ekt bioenerhetyky: vydy kolektsii IBASU-A – perspektyvni produtsenty biomasy yak dzherela syrovyny dlia biopalyva [Microalgae as an object of bioenergy: Species of the IBASU-A collection as promising biomass producers for biofuels]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (5), 49–54. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2011_5_11 [in Ukrainian]
6. Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., & Lea-Smith, D. J. (2010). Biodiesel from algae: Challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3), 277–286. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cabio.2010.03.005>
7. Cheng, L. H., Zhang, L., Chen, H. L., & Gao, C. J. (2005). Advances on CO₂ fixation by microalgae. *Chinese Journal of Biotechnology*, 21(2), 177–181.
8. Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Lea-Smith, D. J., et al. (2010). Algae biodiesel: Challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, 21, 277–286.
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), 1–8. Retrieved from <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), 157–164. Retrieved from <https://doi.org/10.12911/22998993/122674>