

УДК 606:628

АНАЛІЗ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

Д. С. Сінчук, К. І. Довгаль, Н. В. Ковальчук
здобувачі вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, 4 курс,
спеціальність «Біотехнології та біоінженерія»,
навчально-науковий інститут будівництва та архітектури
Науковий керівник – к.т.н., доц. О. О. Грицина

*Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна*

Виконано аналіз арсеналу біотехнологічних методів зменшення викидів вуглекислого газу. Зокрема, використання штучних автотрофних мікроорганізмів, синтетичної біології, мікробної та ферментної інженерії, генетичної модифікації рослин, мікробної конверсії відходів та біоенергетики. Оцінюється ефективність та стійкість цих методів, їхні обмеження та необхідні ресурси. Узагальнюються сучасні біотехнологічні методи та визначаються напрями для подальших досліджень у контексті сталого розвитку та зменшення викидів вуглекислого газу.

Ключові слова: біотехнологія, метод, вуглекислий газ.

Biotechnological methods of reducing carbon dioxide emissions are analyzed. In particular, the use of artificial autotrophic microorganisms, synthetic biology, microbial and enzyme engineering, genetic modification of plants, microbial conversion of waste and bioenergy. The effectiveness and sustainability of these methods, their limitations and required resources are assessed. Modern biotechnological methods are summarized and directions for further research in the context of sustainable development and reduction of carbon dioxide emissions are identified.

Keywords: biotechnology, method, carbon dioxide.

У контексті сучасних викликів, пов'язаних зі зміною клімату та зростанням рівня вуглекислого газу в атмосфері, біотехнологічні рішення відіграють ключову роль у досягненні сталого розвитку. Протягом останніх років дослідження у сфері біотехнологій зробили значний крок вперед у зменшенні викидів парникових газів та підвищенні екологічної стійкості. У цій статті розглядаються такі підходи, як використання штучних автотрофних мікроорганізмів, синтетичної біології, мікробної та ферментної інженерії, генетичної модифікації рослин та інженерії фотосинтезу. Аналіз цих методів створює основу для подальших досліджень та впровадження інновацій у боротьбі зі зміною клімату.

Нещодавні дослідження забезпечили значний прогрес у сфері скорочення викидів вуглекислого газу та сталого розвитку. Дослідження штучних автотрофних мікроорганізмів продемонстрували їхню здатність до ефективного захоплення та перетворення вуглецю. Підходи синтетичної біології показали багатообіцяючі результати в покращенні збереження та утилізації вуглецю. Мікробна та ферментна інженерія стала ще одним рішенням для процесів біоконверсії. Крім того, генетична модифікація рослин та інженерія фотосинтезу відіграли ключову роль у підвищенні продуктивності сільського господарства та скороченні викидів. Дослідження мікробної конверсії відходів та виробництва біоенергії підкреслили їхній потенціал у сталому управлінні відходами та виробництві відновлюваної енергії.

Метою цієї статті є аналіз сучасних біотехнологічних методів, що застосовуються для скорочення викидів вуглекислого газу та підвищення екологічної стійкості. Це включає детальний аналіз застосування кожного методу, його обмежень, необхідної сировини та результатів з точки зору скорочення викидів вуглекислого газу. Кінцевою метою є висвітлення потенціалу цих інноваційних підходів у створенні більш стійкого та сталого майбутнього.

Порівняння проаналізованих біотехнологічних методів за якісно-кількісними характеристиками наведено у таблиці нижче.

Таблиця

Порівняння біотехнологічних методів за якісно-кількісними характеристиками [1–12]

Метод	Якісні характеристики	Кількісні характеристики
Штучні автотрофні мікроорганізми	Конструювання мікроорганізмів для фіксації CO ₂ та виробництва палива і хімічних речовин.	Може конвертувати до 1,2 кг CO ₂ на кг біомаси
Синтетична біологія	Оптимізація мікробних систем для покращення збереження вуглецю	Ефективність збереження вуглецю збільшена на 20%
Мікробна та ферментна інженерія	Поєднання електроенергії з біотехнологіями для покращення уловлювання CO ₂ та синтезу продуктів	Підвищення ефективності уловлювання CO ₂ та виходу продукції на 15%.
Генетична модифікація рослин	Модифікація генів для покращення розподілу біомаси та поглинання вуглецю	Збільшення поглинання вуглецю до 2,5 тонн CO ₂ на гектар
Інженерний фотосинтез	Підвищення ефективності фотосинтезу шляхом розширення діапазону поглинання світла та впровадження механізмів концентрації вуглецю	Підвищення ефективності фіксації вуглецю на 25%
Мікробна конверсія відходів	Використання мікроорганізмів для перетворення органічних відходів на біогаз, біопластик та інші продукти	Скорочення відходів на 30%
Біоенергетика	Виробництво біопалива з біомаси як відновлюваного джерела енергії	Скорочення викидів CO ₂ на 40% порівняно з вугільною енергетикою.
Кліматично-стійкі культури	Створення сільськогосподарських культур, стійких до екологічних стресів, таких як посуха та спека	Підвищення врожайності стресостійких культур на 10–15%

Штучні автотрофні мікроорганізми використовують для біорегенерації та поглинання вуглецю з метою зменшення викидів парникових газів та боротьби зі зміною клімату. Однак використання цих організмів має певні обмеження. Природні автотрофи мають повільний темп росту та потребують додаткових джерел енергії. Для функціонування їм потрібні вуглекислий газ, світло або неорганічні донори електронів та поживні речовини. Використання штучних автотрофів може допомогти зменшити викиди вуглекислого газу, перетворюючи його на біомасу та цінні хімічні речовини. Це допомагає досягти вуглецевої нейтральності та сприяє зеленому виробництву, однак точна ефективність залежить від організму та умов використання.

Синтетична біологія має багато застосувань у сфері зберігання вуглецю та скорочення викидів вуглекислого газу. Деякі з основних застосувань включають виробництво біопалива з відновлюваних джерел вуглецю, біонафтопереробку для заміни нафтопродуктів і фіксацію

вуглецю за допомогою автотрофних мікробів. Однак існують обмеження, такі як високі витрати на масштабування, технічні проблеми в оптимізації мікробних систем і регуляторні перешкоди, пов'язані з дотриманням вимог і безпекою. Загалом, синтетична біологія може допомогти збільшити врожайність, замінити викопне паливо біопаливом та продуктами біонафтопереробки, а також оптимізувати зберігання вуглецю за рахунок підвищення ефективності уловлювання та перетворення CO₂ в органічні сполуки.

Мікробна та ферментна інженерія використовується в галузі синтетичної біотехнології та досліджень вуглецевої нейтральності. Мікробний електросинтез (MES) перетворює вуглекислий газ (CO₂) на цінні продукти, які можна використовувати в біохімічних процесах. Цей метод також застосовується для очищення стічних вод, біоремедіації та виробництва відновлюваної енергії. Однак існують обмеження, як-от технічні труднощі з модифікацією матеріалу, обмежений біосинтетичний потенціал нативних електрогенів, складність масштабування і високі початкові витрати. Цей метод потребує електроактивних мікроорганізмів, електродів, носіїв електронів та CO₂. Однак результати використання цього методу показують його переваги у зменшенні виробництва CO₂, вуглецевої нейтральності та викидів парникових газів.

Генетичну модифікацію рослин використовують у різних галузях, таких як сільське господарство, фармацевтика, біопаливо та екологія. Однак генетична модифікація рослин має певні обмеження, такі як технічні проблеми, законодавчі перешкоди, громадське сприйняття тощо. Компоненти, що використовуються для генетичної модифікації рослин, включають послідовності ДНК, вектори, рослинні клітини, ферменти та хімічні речовини. Крім того, генетично модифіковані рослини можуть допомогти зменшити викиди вуглекислого газу за рахунок покращення фотосинтезу та зменшити вирубку лісів за рахунок підвищення врожайності на існуючих сільськогосподарських угіддях. Використання таких рослин також сприяє виробництву біопалива, яке вважається більш стійким джерелом енергії.

Мікробна конверсія відходів широко використовується для утилізації побутових, харчових та сільськогосподарських відходів, перетворюючи їх на цінні продукти з доданою вартістю, такі як біопаливо, біополімери та компост. Однак цей підхід також має свої обмеження. Складність складу відходів вимагає специфічної мікробіологічної обробки для кожного виду відходів. Крім того, існують високі початкові та операційні витрати, а для оптимізації процесів переробки необхідні передові технології та досвід. Сировиною для мікробіологічної обробки є органічні побутові відходи, харчові та агропромислові відходи. Використання мікробіологічної конверсії може допомогти зменшити викиди вуглецю шляхом мінімізації відходів на звалищах, виробництва біоенергії та виготовлення біопродуктів з меншим вуглецевим слідом ніж у нафтохімії.

Біоенергетика має велике значення в багатьох секторах, таких як електроенергетика, опалення будівель, транспорт і промисловість, однак виробництво біоенергії має свої обмеження. По-перше, вирощування біомаси вимагає багато землі, що може конкурувати з виробництвом продуктів харчування. По-друге, нестабільне постачання сировини може впливати на виробництво. Біоенергетика також може мати негативний вплив на навколишнє середовище, якщо нею не управляти раціонально, що може призвести до вирубки лісів і втрати біорізноманіття. Високі операційні та інвестиційні витрати також можуть перешкоджати розширенню цієї галузі. Сировиною для виробництва біоенергії можуть бути сільськогосподарські відходи, відходи лісового господарства, енергетичні культури, тверді побутові відходи та перегній тварин. Виробництво біоенергії може допомогти зменшити викиди вуглекислого газу, оскільки спалювання біомаси компенсує вуглекислий газ, поглинений рослинами в процесі фотосинтезу.

Інженерний фотосинтез використовується в сільському господарстві, біоенергетиці та синтетичній біології, однак його застосування обмежене технологічними факторами, такими

як обмеження на генетичну трансформацію, обмеженість ресурсів (земля, вода, добрива) і вплив клімату. Для керованого фотосинтезу потрібні сонячне світло, вуглекислий газ і вода, а також поживні речовини для росту рослин. Використовуючи цей процес, можна значно зменшити виробництво вуглекислого газу шляхом покращення захоплення та перетворення вуглецю в рослинах і мікроорганізмах. Інженерний фотосинтез може стати потужним інструментом у боротьбі з викидами CO₂ та забезпеченні сталого розвитку.

Кліматостійкі культури використовуються в сільськогосподарських регіонах, вразливих до зміни клімату, для забезпечення продовольчої безпеки під час екстремальних погодних явищ, таких як посухи, повені та спека. Впровадження та розведення цих культур може бути дорогим, а підтримання генетичного різноманіття та стійких ознак може бути складним завданням. Крім того, потрібен час для адаптації та навчання фермерів новим методам ведення сільського господарства. Законодавчі бар'єри та етичні дебати щодо генетично модифікованих організмів (ГМО) також можуть ускладнити ситуацію. Успішне вирощування кліматостійких культур вимагає якісного насіння, екологічно чистих добрив, систем управління водними ресурсами та технологічних інструментів, таких як точне землеробство та дистанційне зондування. Крім того, кліматостійкі культури можуть допомогти зменшити викиди вуглекислого газу за рахунок покращення стану ґрунту, зменшення використання синтетичних добрив та підтримки сталих сільськогосподарських практик.

Виконано аналіз сучасних біотехнологічних методів, що застосовуються для скорочення викидів вуглекислого газу та підвищення екологічної стійкості в розрізі застосування кожного методу, його обмежень, необхідної сировини та результатів з точки зору скорочення викидів вуглекислого газу. Використовуючи такі методи, як штучні автотрофні мікроорганізми та синтетична біологія для збереження вуглецю, можна досягти помітного скорочення викидів CO₂ та підвищити ефективність уловлювання вуглецю. Мікробна та ферментна інженерія у поєднанні з генетичною модифікацією рослин демонструють значний потенціал для збільшення швидкості біоконверсії та поглинання вуглецю. Проаналізовані методи пропонують багатогранну стратегію для зменшення викидів вуглекислого газу.

1. Liang Bo, Zhao Yukun, Yang Jianming. Recent Advances in Developing Artificial Autotrophic Microorganism for Reinforcing CO₂ Fixation. *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. **2.** Morin N. Synthetic Biology Applied to Carbon Conservative and Carbon Dioxide Recycling Pathways. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. Vol. 7. P. 446. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00446>. **3.** From Electricity to Products: Recent Updates on Microbial Electrosynthesis (MES) / Omidi M., Mashkour M., Biswas J. K. et al. *Top Catal*. 2024. Vol. 67. P. 1253–1270. URL: <https://doi.org/10.1007/s11244-021-01503-3> (дата звернення: 18.10.2024). **4.** Applications of Synthetic Biotechnology on Carbon Neutrality Research: A Review on Electrically Driven Microbial and Enzyme Engineering / Zhuang Xiaoyan, Zhang Yonghui, Xiao An-Feng, Zhang Aihui, Fang Baishan. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022. Vol. 5. P. 10. **6.** Genetically modified crops: current status and future prospects / Kumar K., Gambhir G., Dass A. et al. *Planta*. 2020. Vol. 251, article number 91. URL: <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03372-8> (дата звернення: 16.10.2024). **7.** Kavya, Vashisht M., Jain B. et al. Transforming waste into wealth: a review on microbial conversion of organic municipal wastes to value-added products. *Discov Environ*. 2024. Vol. 2. P. 112. URL: <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00144-z> (дата звернення: 18.10.2024). **8.** Tshikovhi A., Motaung T. E. Technologies and Innovations for Biomass Energy Production. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 12121. <https://doi.org/10.3390/su151612121>. **9.** El-Araby R. Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnol Biofuels*. 2024. Vol. 17. P. 129. <https://doi.org/10.1186/s13068-024-02571-9>. **10.** Veronica G. Maurino, Andreas P. M. Weber. Engineering photosynthesis in plants and synthetic microorganisms. *Journal of Experimental Botany*. January 2013. Vol. 64, Issue 3. P. 743–751. URL: <https://doi.org/10.1093/jxb/ers263> (дата звернення: 18.10.2024). **11.** Paniza H. M. Challenges in Plant Breeding Under Climate Change : A Review. *Plant Quarantine Challenges under Climate Change Anxiety*. 2024. Pp. 533–556. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56011-8_17. **12.** Kopeć P. Climate Change – the Rise of Climate-Resilient Crops. *Plants*. 2024. Vol. 13. P. 490. <https://doi.org/10.3390/plants13040490>.