

БІОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 662.767:573.4

КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ПОКОЛІНЬ БІОПАЛИВА У СВІТЛІ МІКРОБНИХ БІОТЕХНОЛОГІЙ

Р. В. Вознюк

здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, 2 курс,

спеціальність «Біотехнології та біоінженерія»,

навчально-науковий інститут будівництва та архітектури

Науковий керівник – д.б.н., професор О. О. Бедункова

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

У статті представлено порівняльний аналіз поколінь біопалива (1G–4G) з акцентом на роль мікроорганізмів у біосинтезі енергетичних сполук. Описано особливості сировинної бази, мікробного метаболізму та технологічних процесів кожного покоління, а також визначено екологічні переваги та обмеження їх використання. Показано, що незалежно від типу біомаси чи покоління біопалива, мікроорганізми виступають ключовими агентами біоперетворення, забезпечуючи нульовий вуглецевий баланс і відкриваючи перспективи для розвитку стійкої біоенергетики. Ключові слова: біопаливо, мікроорганізми, біоенергетика, біосинтез.

The article presents a comparative analysis of biofuel generations (1G–4G), emphasising the role of microorganisms in the biosynthesis of energy compounds. The features of the raw material base, microbial metabolism and technological processes of each generation are described, and the environmental advantages and limitations of their use are determined. It is shown that regardless of the type of biomass or biofuel generation, microorganisms act as key agents of bioconversion, ensuring a zero-carbon balance and opening up prospects for the development of sustainable bioenergy.

Keywords: biofuel, microorganisms, bioenergy, biosynthesis.

Забруднення навколишнього середовища, викликане використанням викопного палива, є однією з головних екологічних проблем сучасності. Важливою складовою стратегії переходу до безвідходного виробництва стає отримання енергії з біомаси, де провідну роль можуть відігравати мікроорганізми, здатні продукувати біопаливо. Такий підхід передбачає зменшення викидів парникових газів та зниження залежності від невідновлюваних ресурсів.

Для формування викопного палива потрібні мільйони років, і воно споживається набагато швидше, ніж регенерується. Базуючись на існуючій технології та припускаючи, що поточні норми споживання залишаються постійними, прогнозується, що загальних світових запасів вугілля, природного газу та нафти вистачить приблизно на 100, 35 та 20 років відповідно [1].

Весь життєвий цикл викопного палива, від видобутку до кінцевого використання (спалювання), має негативний вплив на навколишнє середовище, який прямо чи опосередковано впливає на екосистеми, здоров'я населення та економіку [2]. Використання викопного палива в цьому процесі призводить до забруднення навколишнього середовища через скидання забруднюючих речовин, таких як оксид вуглецю, вуглекислий газ, оксид азоту, оксид сірки, незгорілі вуглеводні та тверді частинки [3]. Саме тому, Організація

Об'єднаних Націй (ООН) назвала доступну та чисту енергію (Цілі сталого розвитку 7 (ЦСР7)), відповідальне виробництво та споживання (ЦСР12) і глобальні кліматичні дії (ЦСР13) як головні проблеми серед ЦСР і визначила шлях досягнення цих цілей до 2030 року [4]. У цьому контексті, життєво важливими компонентами глобального енергетичного переходу стали біопаливо та біоенергетика [5].

Завдяки ефективному управлінню біоенергетика, як частина ширшої біоекономіки, може впоратися з ризиками, пов'язаними з використанням землі та ресурсів, продовольчою безпекою, природними екосистемами та запасами вуглецю, одночасно сприяючи рівності, справедливості та економічній конкурентоспроможності. Прогнозується, що між 2021 і 2026 роками світовий попит на біопаливо зросте на 41 мільярд літрів, або на 28%, і досягне приблизно 186 мільярдів літрів до 2026 року [6]. Аналіз останніх досліджень свідчить, що попри значний розвиток галузі одержання біопалива, лишаються актуальними подальші наукові дослідження, спрямовані на вдосконалення технологій культивування мікроорганізмів, що синтезують біопаливо [5; 7]. Зокрема, важливими є аспекти підбору субстратів для оптимального метаболізму мікроорганізмів та зменшення витрат на промислове виробництво [7–9].

Постановка завдання. Визнаючи факт, що біопаливо, біомаса та біоенергетика відіграють ключову роль у переході до стійких енергетичних систем, одночасно задовольняючи глобальні потреби в енергії та підтримуючи цілі сталого розвитку ООН, метою цього дослідження став аналіз потенціалу використання мікроорганізмів для створення біопалива різних поколінь та оцінка екологічних переваг цього процесу. Основним завданням, що виконувалось для досягнення поставленої мети стало порівняння ролі мікроорганізмів у різних технологіях отримання біопалива, з врахуванням екологічних і технологічних аспектів.

Біопаливо – енергетична сировина, що виробляється в результаті мікробного метаболізму за рахунок споживання органічних субстратів (відновлюваних джерел вуглецю). Незалежно від походження, джерел і технологій виробництва, мікроорганізми є необхідними агентами для синтезу біопалива, що відбувається шляхом бродіння продуктів біомаси, а отже, має чистий нульовий вуглецевий слід [10].

За агрегатним станом біопаливо може бути твердим, рідким і газоподібним. У всьому світі найчастіше використовуються і є найвідомішими етанол і біодизель, хоча існують інші біопалива мікробного походження, такі як метан, метанол, бутанол, пропанол і біоводень, що також є цінним ресурсом для біоенергетики. На основі фізико-хімічних властивостей біопалива, всі його види розділено на покоління: перше (1G), друге (2G), третє (3G), четверте (4G). Крім таких відмінностей, різні види біопалива відрізняються за: типом використовуваної сировини; представниками мікроорганізмів, що здійснюють процеси біосинтезу; особливостями метаболічних перетворень. До того ж, кожне покоління біопалива має свої технологічні й екологічні переваги та виклики (таблиця).

Так, виробництво біопалива першого покоління (1G) в основному передбачає використання їстівної біомаси, як-от цукор, крохмаль і рослинна олія. Отримана продукція є високоефективною, але збільшення її масштабів заважає продовольчій безпеці та біорізноманіттю. Біопаливо другого покоління (2G) виробляється з непродовольчих енергетичних культур і відходів біомаси. Це дозволяє уникнути прямого конфлікту між їжею та паливом; однак його негативний вплив на біорізноманіття та непрямий вплив на харчовий ланцюг залишається незмінним. Біопаливо третього покоління (3G) використовує біомасу водоростей і ціанобактерій як сировину, тоді як біопаливо четвертого покоління (4G) використовує генетично модифіковані мікроорганізми для отримання вищих показників перетворення водню на вуглець для мінімізації викидів вуглецю. Мікрководорості та бактерії мають відносно високі темпи зростання біомаси, не потребують орних земель і можуть

використовувати відходи/солону воду. Виробництво біопалива цим шляхом є економічно ефективним і дозволяє уникнути конкуренції з типовою сільськогосподарською діяльністю.

Наприклад, біогаз може бути класифікований одразу до кількох поколінь: до 1G, якщо виробляється з органічних харчових відходів, гною або сільськогосподарських залишків; до 2G, якщо отриманий з лігноцелюлозної біомаси, такої як деревина або солома; а також до 3G, коли джерелом слугують мікроводорості. Біоетанол також належить до різних поколінь: перше покоління включає біоетанол, вироблений із цукрової тростини або кукурудзи; друге покоління – з лігноцелюлозної сировини; третє – з вуглеводів, які накопичуються в мікроводоростях. Біобутанол, який є перспективною альтернативою етанолу, здебільшого відносять до другого покоління, оскільки він виробляється з нехарчових відходів біомаси. Водночас, він може бути продуктом мікроводоростей (3G), або ж результатом біосинтезу за допомогою генетично модифікованих мікроорганізмів (4G).

Таблиця

Порівняльна характеристика поколінь біопалива [5; 9; 11–13]

Покоління	Основна характеристика	Тип сировини	Ключові мікроорганізми / ферменти	Метаболічні процеси	Технічні/екологічні переваги та виклики
1G – Перше	Біопаливо з харчової сировини	Цукрова тростина, кукурудза, олійні культури, біогаз із органіки	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , мікробні амілази, ліпази	Пряма ферментація або гідроліз з подальшим бродінням	+ Простота технологій – Конкуренція з харчовими потребами – Потреба у великих площах
2G – Друге	Біопаливо з відходів і нехарчової біомаси	Лігноцелюлоза (солома, деревина, макулатура)	<i>S. cerevisiae</i> , <i>Scheffersomyces stipitis</i> , <i>Zymomonas mobilis</i> , ферменти-гідролази	Попередня хім/термообробка → ферментативний гідроліз → ферментація гексоз і пентоз	+ Менший тиск на харчовий сектор – Складний багатадійний процес – Інгібітори ферментації
3G – Третє	Біопаливо з мікроводоростей	Мікроводорості (<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Spirulina platensis</i> , <i>Tetraselmis suecica</i>)	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Haematococcus pluvialis</i> , <i>Nannochloropsis gaditana</i> , <i>Spirulina platensis</i>	Біосинтез ліпідів і вуглеводів, ферментативний гідроліз	+ Не потребує с/г земель + Високий вихід біомаси – Висока вартість вирощування та екстракції
4G – Четверте	Синтетична біологія для створення біопалива та фіксації CO ₂	Генетично модифіковані мікроорганізми	ГМ-штами <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> , <i>Synechococcus elongatus</i> , <i>Anabaena sp.</i>	Штучно посилені метаболічні шляхи; біофіксація CO ₂	+ Висока ефективність + Можливість фіксації CO ₂ – Етичні та екологічні ризики ГМО

Біодизель 1G виробляється шляхом переестерифікації олійних культур (рапсу, сої тощо), тоді як у 3G біодизель отримують із ліпідів мікроводоростей, які здатні накопичувати значно більше жиру на одиницю площі. Четверте покоління переважно асоціюється з біопаливами, отриманими за допомогою інструментів синтетичної біології, включно з біоводнем або вдосконаленими варіантами традиційних палив, таких як біоетанол чи біобутанол.

Проведений аналіз та систематизація цих особливостей свідчать також і про наявність спільних ознак для різних поколінь біопалива, попри відмінності у типі сировини, технологічних підходах та рівні біотехнологічного втручання (рисунок).

Взагалі, найбільш екологічно та технологічно доцільними визнано біопаливо третього та четвертого покоління, яке базується на використанні мікроводоростей та генетично

модифікованих мікроорганізмів, що не потребують сільськогосподарських земель і дозволяють інтегрувати процеси фіксації вуглецю. Водночас більшість дослідників стверджують, що важливими аспектом у синтезі біопалива все ще лишаються оптимізація процесів мікробного культивування, зниження витрат на виробництво, вдосконалення метаболічної інженерії та оцінка ризиків, пов'язаних із використанням ГМО у промисловому масштабі.



Рисунок. Спільні ознаки різних поколінь біопалива

Висновки. Незалежно від покоління біопалива, ключову роль у його синтезі відіграють мікроорганізми, здатні здійснювати ферментативні перетворення органічних субстратів, включаючи гідроліз, бродіння, фотосинтез і біофіксацію CO₂. Один і той самий вид біопалива може належати до різних поколінь залежно від типу біомаси, яка використовується для його виробництва, а також від рівня технологічної складності процесу. Порівняльний аналіз свідчить про наявність чіткої еволюції біопаливних технологій – від використання харчової сировини у 1G до впровадження синтетичної біології у 4G. Водночас між поколіннями зберігаються спільні риси, зокрема біологічне походження сировини, використання ферментів, орієнтація на сталість та залежність від технологічного прогресу.

1. Zandi Lak S., Rezaei J., Rahimpour M. R. Health and Pollution Challenges of Fossil Fuels Utilization. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-93940-9.00202-4>
2. Lelieveld J., Klingmüller K., Pozzer A., et al. Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116, no. 15. P. 7192–7197. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>
3. Zhang J., Usman M. Redefining Energy Policy for Sustainable Growth: The Interplay of Fossil Fuel Subsidies, Energy Security Risks, and Energy Balances in Shaping Geopolitical Stability. *Energy*. 2025. P. 135620. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135620>
4. Solangi Y. A., Magazzino C. Evaluating financial implications of renewable energy for climate action and sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 212. P. 115390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115390>
5. Raman R., Sreenivasan A., Kulkarni N. V., et al. Analyzing the Contributions of Biofuels, Biomass, and Bioenergy to Sustainable Development Goals. *iScience*. April 18, 2025. Vol. 28, Issue 4. P. 112157. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112157>
6. Sathish Kumar R. K., Sasikumar R., Dhilipkumar T. Exploiting agro-waste for cleaner production: A review focusing on biofuel generation, bio-composite production, and environmental considerations. *Journal of Cleaner Production*. 2024. P. 140536. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140536>
7. Joshi A., Verma K. K., Rajput V. D., et al. Metabolic engineering of microorganisms in advancing biofuel production. *Advances in Lignocellulosic Biofuel Production Systems*. 2023. P. 181–202. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91192-4.00016-x>
8. Yusuf M., Ibrahim H. Introduction to Biofuel Production: A Step Towards Sustainable Energy. *Emerging Sustainable Technologies for Biofuel Production*. Cham 2024. P. 1–14. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-52167-6_1
9. Majidian P., Tabatabaei M., Zeinolabedini M. Metabolic engineering of microorganisms for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 3863–3885. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.085>
10. Kumar R., Kumar P. Future Microbial Applications for Bioenergy Production: A Perspective. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00450>
11. Carreiro S. C. The importance of microorganisms for biofuels production. *Agroenergy*. 2024. P. 253–263. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-21430-1.00023-5>
12. Jang Yu., Park J., Choi S., et al. Engineering of microorganisms for the production of biofuels and perspectives based on systems metabolic engineering approaches. *Biotechnology Advances*. 2012. Vol. 30, no. 5. P. 989–1000. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.08.015>
13. Padder S. A., Khan R., Rather R. A. Biofuel generations: New insights into challenges and opportunities in their microbe-derived industrial production. *Biomass and Bioenergy*. 2024. Vol. 185. P. 107220. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107220>