

економіка. 2017. № 12. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5980>

10. Potential of Business Entities: Essence, Assessment and Role in National Development: collective monograph / V. M. Babayev, M. K. Sukhonos, O. V. Dymchenko et al. Sofia: VUZF Publishing House "St. Grigorii Bogoslov", 2021. 80 p. URL: [https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/33982/1/Coll-mon-VUZF-10\\_03\\_2021.pdf](https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/33982/1/Coll-mon-VUZF-10_03_2021.pdf)

## REFERENCES

- Babayev, V. M. et al. "Potential of Business Entities: Essence, Assessment and Role in National Development". Sofia: VUZF Publishing House "St. Grigorii Bogoslov", 2021. [https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/33982/1/Coll-mon-VUZF-10\\_03\\_2021.pdf](https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/33982/1/Coll-mon-VUZF-10_03_2021.pdf)
- Kobushko, I. M. Kolesnyk M. Ye. "Analiz dzherel finansuvannya innovatsiinoi diialnosti" [Analysis of the Financial Sources for Innovative Activity]. *Naukovyi visnyk Kherersonskoho derzhavnogo universytetu. Seriiia «Ekonomichni nauky»*, iss. 12, part 1 (2015): 187-190. [http://www.ej.kherson.ua/journal/economic\\_12/47.pdf](http://www.ej.kherson.ua/journal/economic_12/47.pdf)
- Komchatnykh, O. V. "Finansuvannya innovatsiinoho rozvytku transportnykh pidpriemstv Ukrainy" [Financing Innovative Development of Ukrainian Transport Enterprises]. *Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky*, iss. 22 (2018): 402-407. <http://global-national.in.ua/archive/22-2018/78.pdf>
- Manaienko, I. M., and Kravets, A. I. "Finansuvannya innovatsiinoi diialnosti pidpriemstv: ukrainski realii ta dosvid YeS" [Financing of Innovative Activity of Enterprises: Ukrainian Realities and European Experience]. *Infrastruktura rynku*, iss. 15 (2018): 109-115. [http://www.market-infr.od.ua/journals/2018/15\\_2018\\_ukr/19.pdf](http://www.market-infr.od.ua/journals/2018/15_2018_ukr/19.pdf)
- Matiushenko, I. Yu., Khaustova, V. Ye., and Kniaziev, S. I. "Instytutsiina pidtrymka naukovo-innovatsiinoho rozvyt-

ku pry formuvanni yedynoho doslidnytskoho prostoru v krainakh YeS i Ukraini" [Institutional Support of Innovative R&D in the Formation of Single Research Area in the EU and Ukraine]. *Nauka ta innovatsii*, vol. 13, no. 2 (2017): 5-26.

DOI: <https://doi.org/10.15407/scin13.02.005>

*Naukova ta innovatsiina diialnist v Ukraini : statystychnyi zbirnyk* [Scientific and Innovative Activity in Ukraine: Statistical Collection]. Kyiv: DP «Informatsiino-vydavnychiy tsentr Derzhstatu Ukrainy», 2021.

Pochtoviuk, A. B. "Finansove zabezpechennia innovatsiinoi diialnosti pidpriemstv u suchasnykh umovakh" [Financial Support for Innovation Activities Enterprises in Modern Conditions]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli. Seriiia «Ekonomichni nauky»*, no. 3 (2016): 133-140. <http://journal.puet.edu.ua/index.php/nven/article/view/1382/1217>

Stefkivskiy, V. F., and Bulyhina, K. A. "Finansuvannya innovatsiinoi diialnosti v Ukraini" [Financing Innovation Activity in Ukraine]. *Aktualni problemy ekonomiky ta upravlinnia*, no. 11 (2017). <http://ape.fmm.kpi.ua/issue/view/6116>

Tarasiuk, M. V., and Maliarchuk, O. V. "Suchasnyi stan realizatsii innovatsiinoi polityky Ukrainy ta yii finansove zabezpechennia" [Modern Innovation Policy in Ukraine: Implementation and Financing]. *Ekonomika ta derzhava*, no. 1 (2017): 19-24. [http://www.economy.in.ua/pdf/1\\_2017/6.pdf](http://www.economy.in.ua/pdf/1_2017/6.pdf)

Yaremyk, M. M. "Osoblyvosti finansovoho zabezpechennia innovatsiinoi diialnosti v Ukraini" [Features of Financial Support of Innovation Activity in Ukraine]. *Efektivna ekonomika*, no. 12 (2017). <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5980>

УДК 620.92:620.98:662.7

JEL: L79; O13; O39; P48; Q16; Q42

DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2021-11-96-104>

## МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЯ З МІКРОВОДОРОСТЕЙ

©2021 ШПЛІЄВСЬКИЙ В. В., КОСТЕНКО Д. М., ШПЛІЄВСЬКИЙ О. В., ФІЛАТОВА Т. А.

УДК 620.92:620.98:662.7

JEL: L79; O13; O39; P48; Q16; Q42

### Шплієвський В. В., Костенко Д. М., Шплієвський О. В., Філатова Т. А. Методичний підхід до обґрунтування оптимальних техніко-економічних характеристик виробництва біодизеля з мікрородоростей

Світовий досвід свідчить, що одним із важливих напрямів подолання зовнішньої енергетичної залежності та послаблення її негативних наслідків для країни є інтенсифікація використання власної ресурсної бази. Таким заходом для України може стати виробництво з біологічної сировини аналогів нафтового моторного палива, а саме біодизеля та біобензину. Суттєвою перешкодою на шляху інтенсифікації використання наявної ресурсної бази є відсутність науково обґрунтованого бачення освоєння в країні технологій культивування та конверсії енергетичної біосировини в моторне паливо. Метою статті є розробка методичного підходу (ґрунтуючись на положеннях економічної теорії) до поетапного обґрунтування оптимальних техніко-економічних характеристик виробництва з культивування та переробки мікрородоростей у біодизель за умов наявних кліматичних обмежень. Розроблений методичний підхід включає в себе обґрунтування: вибору вихідної сировини, вибору способу та технології культивування, характеристик технології культивування та безпосередньо техніко-економічних характеристик виробництва. Згідно з розробленим методичним підходом доведено, що мікрородорості розглядаються як енергетична сировина майбутнього, а види мікрородоростей роду *Хлорела*, і передусім виду *Хлорела звичайна* (*Chlorella vulgaris*), найбільш відповідають вимогам промислового культивування. Більш прийнятним до застосування в кліматі України способом культивування мікрородоростей є культивування у фотобіореакторах (ФБР). Техніко-економічні показники промислового комплексу з культивування та перероблення мікрородоростей у біодизель свідчать про доцільність практичного за-

стосування розробленого методичного підходу. Поетапне обґрунтування вибору вихідної сировини, способу та технології культивування мікроводоростей при застосуванні традиційної конверсії їх біомаси дозволило забезпечити оптимальність техніко-економічних характеристик виробництва біодизеля в кліматичних умовах України.

**Ключові слова:** критерії вибору, інноваційні технології, моторне біопаливо, біодизель, мікроводорості, техніко-економічні характеристики, зовнішня енергетична залежність.

**Рис.:** 2. **Табл.:** 4. **Бібл.:** 18.

**Шпівєвський Володимир Вікторович** – кандидат економічних наук, завідувач відділу промислової політики та енергетичної безпеки, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

**E-mail:** shpilevskyyv@gmail.com

**Костенко Дмитро Миколайович** – кандидат економічних наук, науковий співробітник відділу промислової політики та енергетичної безпеки, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

**E-mail:** kostenko.d.n@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7136-9946>

**Researcher ID:** <https://publons.com/researcher/4754125/dmytro-kostenko/>

**Шпівєвський Олексій Володимирович** – молодший науковий співробітник відділу макроекономічної політики та регіонального розвитку, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

**E-mail:** astartes009@gmail.com

**Філатова Тетяна Анатоліївна** – провідний інженер, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

UDC 620.92: 620.98: 662.7

JEL: L79; O13; O39; P48; Q16; Q42

**Shpilevskiy V. V., Kostenko D. M., Shpilevskiy A. V., Filatova T. A. A Methodical Approach to Substantiation of the Optimal Technical and Economic Characteristics of Production of Biodiesel from Microalgae**

Global experience shows that one of the important directions in overcoming the external energy dependence and mitigating its negative consequences for the country is the intensification of the use of its own resource base. Such a measure for Ukraine can be production of analogues of petroleum motor fuel from biological raw materials, namely biodiesel and biobenzine. A significant obstacle in the course of intensification of the use of the existing resource base is the lack of a scientifically based vision of the inland development of technologies for the cultivation and conversion of energy biofeedstock into motor fuel. The article is aimed at developing a methodical approach (based on the provisions of economic theory) to the gradual substantiation of optimal technical and economic characteristics of production for the cultivation and processing of microalgae to biodiesel under the conditions of existing climatic restrictions. The developed methodical approach includes the substantiation of the following: choice of raw materials, choice of method and technology of cultivation, characteristics of cultivation technology, and directly the technical and economic characteristics of production. According to the developed methodical approach, it is proved that microalgae is considered as the energy raw material of the future, while the types of microalgae of the genus *Chlorella*, and above all the species *Chlorella vulgaris*, meet the requirements of industrial cultivation the most. The more acceptable for use in the climate of Ukraine method of microalgae cultivation is cultivation in photobioreactors (PBR). The technical and economic indicators of the industrial complex for the cultivation and processing of microalgae in biodiesel indicate the expediency of practical application of the developed methodical approach. The gradual substantiation of the choice of raw materials, the method and technology of cultivation of microalgae when applying the traditional conversion of the biomass allowed to ensure the optimality of technical and economic characteristics of biodiesel production in the climatic conditions of Ukraine.

**Keywords:** selection criteria, innovative technologies, motor biofuels, biodiesel, microalgae, technical and economic characteristics, external energy dependence.

**Fig.:** 2. **Tabl.:** 4. **Bibl.:** 18.

**Shpilevskiy Volodymyr V.** – PhD (Economics), Head of Department of Industrial Policy and Energy Security, Research Centre of Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

**E-mail:** shpilevskyyv@gmail.com

**Kostenko Dmytro M.** – PhD (Economics), Research Associate of the Department of Industrial Policy and Energy Security, Research Centre of Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

**E-mail:** kostenko.d.n@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7136-9946>

**Researcher ID:** <https://publons.com/researcher/4754125/dmytro-kostenko/>

**Shpilevskiy Alexey V.** – Junior Researcher of the Department of Macroeconomic Policy and Regional Development, Research Centre of Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

**E-mail:** astartes009@gmail.com

**Filatova Tetyana A.** – Leading Engineer, Research Centre of Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

Світовий досвід свідчить, що одним із важливих напрямів подолання зовнішньої енергетичної залежності та послаблення її негативних наслідків для країни є інтенсифікація використання власної ресурсної бази. Таким заходом для України може стати виробництво з біологічної сировини аналогів нафтового моторного палива, а саме: біодизеля та біобензину.

Суттєвою перепоною на шляху інтенсифікації використання наявної ресурсної бази є відсутність науково обґрунтованого бачення освоєння в країні технологій культивування та конверсії енергетичної біосировини в моторне паливо.

Науково-дослідницька діяльність, присвячена питанням виробництва та споживання альтернативних палив, концептуальним положенням проблема-

тики посилення енергетичної безпеки, поліпшення екологічного стану навколишнього середовища, здійснена багатьма вітчизняними та іноземними дослідниками: Г. Гелетуха, І. Гончарук, А. Калініченко, Ж. Гарбар, Я. Блюм, О. Боднар, М. Гументик, Г. Калетник, А. Дейна, Т. Ємчик, Н. Здирко, К. Зулауф, Т. Железна, М. Ковалко, М. Кулик, С. Лутковська, С. Мочерний, Б. Панасюк, М. Роїк, П. Саблук, В. Сінченко, Д. Токарчук, М. Хвесик, О. Ходаківська, О. Шпикуляк, О. Шпичак, В. Месель-Веселяк та інші. Незважаючи на вагомий внесок науковців у дослідження фундаментальних засад розвитку альтернативної енергетики, у зв'язку з недостатньо сформованою методичною базою з обґрунтування оптимальних техніко-економічних характеристик виробництва біодизеля з мікроводоростей, розвиток промислового виробництва моторного біопалива з мікроводоростей в Україні залишається на доволі низькому рівні та значно відстає від попиту та викликів сьогодення.

*Мета* роботи – створення методичного підходу до поетапного обґрунтування оптимальних техніко-економічних характеристик виробництва з культивування та переробки мікроводоростей у біодизель за умов наявних кліматичних обмежень.

**Б**іодизель – це заміник нафтового дизельного палива, яке отримують з олій та масел, тваринних жирів і їх сумішей.

Лідерами з виробництва біодизеля є країни Євросоюзу, в основному Німеччина та Франція. Існує послідовна політика Євросоюзу зі стимулювання галузі виробництва біодизеля.

Крім Європи, у світі значні потужності з виробництва біодизеля має Малайзія, де воно було створено в рамках національної програми з максимізації використання біопалива та виготовлення хімічних продуктів з пальмового масла.

Традиційним способом виробництва біодизеля є процес трансетерифікації.

Існує також альтернативний шлях виробництва біодизеля – «гідропроецінг олій», але він не знайшов поширення через необхідність використання у виробництві чистого водню.

Біодизель є добавкою до нафтового дизельного палива, частка якого у сумішевому дизельному паливі може сягати 20 %.

У чистому вигляді біодизель не поступається традиційному дизельному паливу за теплотворністю та є більш екологічним, оскільки практично не містить сірки.

Вихідним фактором виробництва біодизеля є сировина. Найпоширенішою сировиною для виробництва біодизеля є рослинні олії та масла. Культивування олійних рослин і мікроорганізмів потребує відповідних земельних ресурсів, а тому оцінку доцільності вирощування основних видів енергетичних

культур для виробництва біодизеля зазвичай проводять на основі показника виходу біодизеля з одиниці сільськогосподарських угідь за умов застосування певного способу конверсії. Стандартний вихід біодизеля з земельної ділянки наведено в *табл. 1*.

**Таблиця 1**

**Вихід біодизеля із земельних ділянок за умови застосування способу трансетерифікації**

Енергетична рослина	Вихід біодизеля, літрів з 1 га
Кукурудза	27,22
Соєві боби	71,82
Рапс	192,78
Соняшник	154,22
Кокос	438,48
Пальма олійна	945,00
Мікроводорості	7560,00

**Джерело:** складено за [1].

Дані, наведені в табл. 1, свідчать, що найменше земельних ресурсів потребує вирощування (культивування) мікроводоростей, що визначається можливістю їх всесезонного культивування, продуктивністю та фізико-хімічними властивостями.

**С**ьогодні мікроводорості розглядаються як енергетична сировина майбутнього. Дослідження 1970–90-х років у США програми «Aquatic Species» Департаменту енергетики США показали, що багато видів водоростей можуть акумулювати в собі олію (ліпіди). Накопичення ліпідів у діатомових і золотистих водоростях перевищує аналогічний показник для олійних культур більше, ніж на порядок. Вміст ліпідів у деяких мікроводоростях може перевищувати 80% у їх сухій вазі.

Унікальні властивості біомаси мікроводоростей як енергетичної сировини визначають відносно невисоку вартість виробництва біодизеля. Так, за оцінкою експертів [1], вартість біодизеля з мікроводоростей складає 1,6–2 дол. США за 1 американський галон (3,5 л), тоді як вартість біодизеля з пальмової олії – 3,5 дол. США.

На сьогодні накопичено значний досвід лабораторного та промислового культивування мікроводоростей і сформовано базу знань, достатню для організації промислового виробництва з них енергетичної біомаси.

За різними оцінками вчених налічується від сотні тисяч до одного мільйона видів мікроводоростей, але культивується всього близько сотні видів і виведених шляхом генної інженерії штамів.

Мікроводорості, придатні для виготовлення біодизеля, повинні мати такі властивості:

- ✦ високий вміст ліпідів у клітці;
- ✦ здатність накопичувати ліпіди при спеціальному режимі культивування (середовище, збагачене CO<sub>2</sub>);
- ✦ міцні стінки клітини;
- ✦ продуктивність.

Вивчення властивостей різних мікроводоростей, проведене за даними [2–6], дозволяє попередньо констатувати, що перспективним є промислове культивування у фотобіореакторах (ФБР) мікроводоростей родів Хлорела (*Chlorella*) та Нанохлоропсис (*Nannochloropsis*). Властивості даних мікроводоростей експериментально досліджено, а результати по них зафіксовано. Так, з роду Хлорела вивчено 7 видів, по деяких з них проведено декілька серій експериментів, за результатами яких виведено нових 5 штамів; з роду Нанохлоропсис вивчено 5 видів, по деяких з них проведено декілька серій експериментів, за результатами яких виведено 8 штамів.

Порівняльний аналіз властивостей двох вищезгаданих родів мікроводоростей наведено в табл. 2.

За результатами порівняння видно, що рід Хлорела більш невибагливий до умов культивування, а при культивуванні з використанням у процесі CO<sub>2</sub> накопичує більшу кількість ліпідів. За прогнозами експертів, у майбутньому продуктивність культивування хлорели можна буде підвищити більше ніж удвічі. Попутним ефектом від культивування хлорели у ФБР є утилізація CO<sub>2</sub>.

Рід Нанохлоропсис більш пристосований до культивування у фотобіореакторах, але при відкритому культивуванні у відкритих ємностях має нижчу продуктивність. За прогнозом експертів, у майбутньому продуктивність культивування нанохлороп-

сиса можна буде підвищити більше ніж удвічі. Однак при культивуванні з використанням CO<sub>2</sub> у будь-який спосіб нанохлоропсис накопичує ліпіди в середньому на 4–10% менше, ніж хлорела, що робить недоцільним використання застосування даного методу.

Крім того, для зниження ризиків і забезпечення економічності промислового культивування слід звернути увагу на специфічні фізичні властивості мікроводоростей, а саме: на міцність стінки клітини мікроводорості та схильність її до біологічного зараження. За даними властивостями мікроводорості роду Хлорела мають явні переваги над родом Нанохлоропсис.

Зважаючи на вищевикладене, можна стверджувати що будь-які види мікроводоростей роду Хлорела, і передусім виду Хлорела звичайна (*Chlorella vulgaris*), найбільше відповідають вимогам промислового культивування за такими властивостями:

- ✦ невибагливість при будь-якому способі культивування;
- ✦ висока міцність стінок клітини (що дозволяє збирати врожай з мінімальними втратами – не більше 10%);
- ✦ забезпечення високого вмісту ліпідів при культивуванні в середовищі, збагаченому CO<sub>2</sub>;
- ✦ поширеність і доступність посадкового матеріалу (наприклад, його зразки можна отримати в Інституті ботаніки ім. М. Г. Холодного, м. Київ);
- ✦ високий потенціал до підвищення продуктивності, у тому числі за допомогою генної інженерії.

На сьогодні у світі освоєно два промислові способи культивування мікроводоростей. Перший –

Таблиця 2

Порівняльний аналіз властивостей мікроводоростей родів Хлорела та Нанохлоропсис

Відкрите культивування				
Рід мікроводоростей	Одиниця виміру, г/м <sup>2</sup> на день		%	
	Продуктивність		Вміст ліпідів	
	Фактична	Перспективи в майбутньому	Фактичний	У середовищі з CO <sub>2</sub>
Chlorella	10–25	30–60	12–35	До 70
Nannochloropsis	9–18	25–50	20–40	До 60
Культивування у фотобіореакторах				
Рід мікроводоростей	Одиниця виміру, г/м <sup>2</sup> на день		%	
	Продуктивність		Вміст ліпідів	
	Фактична	Перспективи в майбутньому	Фактичний	У середовищі з CO <sub>2</sub>
Chlorella	11–25	30–60	12–35	До 70
Nannochloropsis	12–29	35–62	22–45	До 66

Джерело: складено за [3–7].

у відкритих ємностях, які прийнято називати басейни або ставки культивування. Другий – у так званих фотобіореакторах (ФБР), конструкція яких може бути найрізноманітнішою.

Кожен зі способів культивування мікроводоростей являє собою сукупність технологічних рішень, які притаманні унікальні особливості. Обидва способи культивування потребують докладного паралельного розгляду.

**К**ультивування мікроводоростей тісно пов'язане зі збором їх біомаси. Існує кілька технологій збору, які сумісні як з відкритим, так і закритим (у ФБР) культивуванням. Загальну схему культивування та збору біомаси мікроводоростей наведено на рис. 1.

Культивування мікроводоростей відкритим способом забезпечує прийнятну ефективність виробництва в тропічній і субтропічних зонах планети, але в кліматичних умовах України його застосування визначає сезонний характер, а отже, зниження базової ефективності не менше ніж на 30%.

Більш прийнятним до застосування в кліматі України способом є культивування мікроводоростей у ФБР.

На сьогодні можна виділити три конструкційні групи ФБР із застосуванням яких у світі накопичився значний практичний досвід.

До *першої групи* відносять ФБР типу «вертикальна колона». Ключова особливість даного типу ФБР – скляний або пластиковий прозорий корпус.

Перевагою даної конструкції є відносно легкий процес циркуляції рідини всередині ФБР за рахунок

вертикального розташування ємностей культивування.

До недоліків ФБР типу «вертикальна колона» можна віднести:

- ✦ високу вартість корпусу;
- ✦ утворення при експлуатації ФБР осаду на внутрішній поверхні корпусу, що приводить до необхідності періодичної зупинки роботи реактора для його чищення;
- ✦ зниження інтенсивності освітлення всередині колони реактора при її діаметрі більше 20 сантиметрів, що призводить до зменшення продуктивності ФБР.

До *другої групи* відносять трубчасті горизонтальні ФБР, які складаються з множини тонких скляних або пластикових трубок діаметром 10–60 см, у яких циркулює вода. Геометрична компоновка реактора може бути найрізноманітніша: спіраль, пряма, вигнута. ФБР даного типу відрізняються легкістю організації штучного освітлення, а в деяких випадках – використанням сонячного світла.

Недоліками трубчастих горизонтальних ФБР є утруднений газообмін, а саме: видалення кисню, який утворюється в результаті зростання мікроводоростей, створюючи так званий ефект кисневої токсичності. Експлуатація трубчастих ФБР також вимагає підвищених витрат енергії на живлення обслуговуючих насосів.

До *третьої групи* відносять ФБР на основі батарей м'яких пластикових ємностей. Ключовими відмінностями даних ФБР від двох попередніх груп є:

- ✦ висока варіативність конструкції – розташування та форма пластикової ємності можуть бути абсолютно різними;

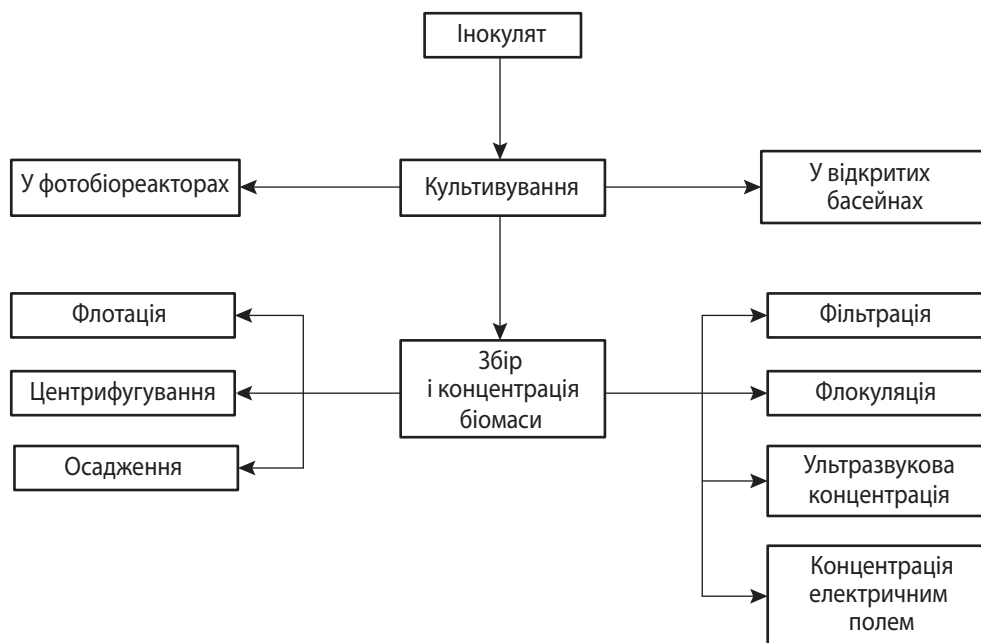


Рис. 1. Загальна схема технологій культивування та збору мікроводоростей

Джерело: складено за даними [2–9].

- ✦ зручність обслуговування – можна змінювати пластикові ємності, не зупиняючи роботу батареї ФБР, а також налаштувати газообмін і обмін рідин для кожної з ємностей;
- ✦ дешевизна пластикової ємності порівняно з корпусами зі скла.

Недоліки ФБР з пластиковими ємностями переважно пов'язані з більш низьким рівнем світла, одержуваного культурою, що призводить до необхідності забезпечення більш інтенсивного штучного освітлення та визначає більш тривалий період росту культури, а отже, і відносне зниження продуктивності реактора. Поряд із цим осад біомаси на стінках пластикової ємності, як і в інших реакторах, необхідно регулярно видаляти.

**П**орівняння експлуатаційних характеристик груп ФБР з метою вибору найбільш придатного для промислового використання наведено в *табл. 3*.

З вищенаведеної оцінки експлуатаційних характеристик різних конструктивних груп ФБР видно більшу ефективність групи ФБР на основі пластикових ємностей.

Інші переваги ФБР на основі пластикових ємностей визначаються меншою вартістю обладнання, вищою технологічністю та ремонтпридатністю конструкції реактора. Більш висока продуктивність ФБР на основі пластикових ємностей є наслідком простоти конструкції, високої надійності, простоти експлуатації й обслуговування реактора, що визначає суттєво нижчий рівень капітальних і експлуатаційних витрат на виробництво біомаси мікроводоростей.

Вирощена та зібрана в будь який спосіб біомаса мікроводоростей сушиться та перероблюється в біодизель та біобензин (супутній продукт).

**З**важаючи на вищевикладене, методичний підхід до обґрунтування оптимальних техніко-економічних характеристик виробництва біодизеля з мікроводоростей можна навести у вигляді схеми (*рис. 2*).

Даний методичний підхід знайшов своє практичне застосування при розробці інвестиційного проекту зі створення біопромислового комплексу з культивування та переробки мікроводоростей у біодизель, основні техніко-економічні характеристики наведено в *табл. 4*.

Наведені в *табл. 4* дані свідчать, що обсяг виробництва моторного біопалива в країні складе близько 211,32 тис. т, у т. ч. біодизеля – 181,55 тис. т і біобензину – 29,77 тис. т. Про економічну доцільність створення в країні промислового комплексу з культивування та перероблення мікроводоростей у біодизель свідчать економічні показники. Так, чистий дохід від реалізації моторного біопалива складе майже 743,3 млн дол. США, у якому 376,73 млн дол. США, або 50,7% складає чистий грошовий потік при рентабельності діяльності – 30%.

## ВИСНОВКИ

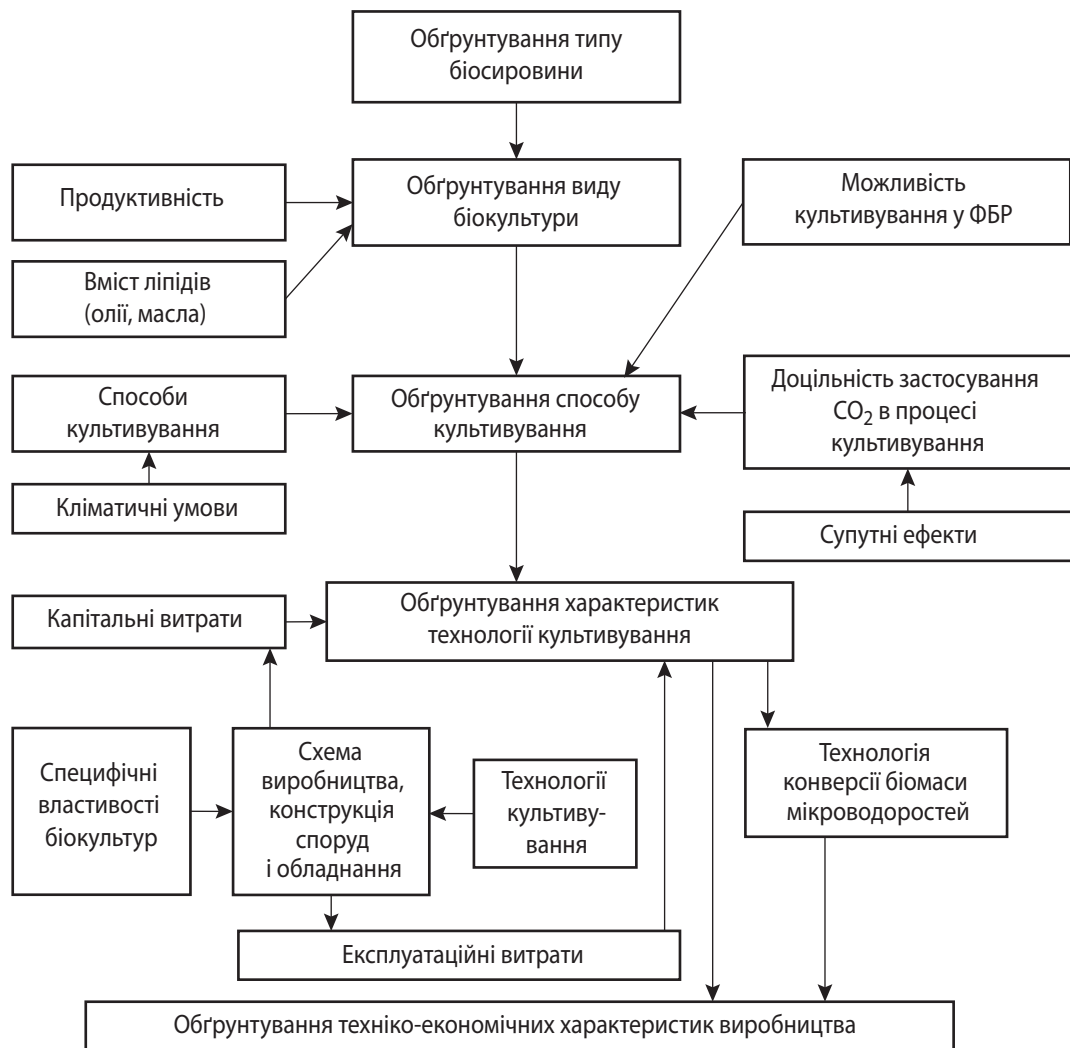
Техніко-економічні показники промислового комплексу з культивування та перероблення мікроводоростей у біодизель свідчать про доцільність практичного застосування розробленого методичного підходу. Поетапне обґрунтування вибору вихідної сировини, способу та технології культивування мікроводоростей при застосуванні традиційної конверсії їх біомаси дозволило забезпечити оптимальність техніко-економічних характеристик виробництва біодизеля в кліматичних умовах України. ■

Таблиця 3

### Порівняльна оцінка експлуатаційних характеристик груп фотобіореакторів для промислового культивування мікроводоростей

Показник	Оцінка, балів		
	ФБР у вигляді вертикальної колони	Трубчасті ФБР	ФБР на основі пластикових ємностей
Рівень освітлення	2	3	1
Легкість газообміну	2	1	3
Легкість водообміну	2	1	2
Легкість обслуговування	1	1	3
Вартість конструкції	1	2	3
Надійність і ремонтпридатність конструкції	1	1	3
Витрати енергії	2	1	1
Потенціал продуктивності	2	3	1
Загалом	13	13	15

Джерело: складено за [10–18].



**Рис. 2. Методичний підхід до обґрунтування оптимальних техніко-економічних характеристик виробництва біодизеля**

Джерело: авторська розробка.

**Таблиця 4**

**Основні техніко-економічні показники промислового комплексу з культивування та перероблення мікрводоростей у біодизель**

№ з/п	Показник	Величина
1	2	3
1	Річний обсяг виробництва моторного біопалива, всього, т	211 319
	у тому числі:	
1.1	біодизеля	181 548
1.2	біобензину	29 770
2	Витрати/виробництво біомаси мікрводоростей 20%-ї вологості, т	405 126
3	Чистий дохід від реалізації продукції, тис. дол. США	743 315
	у тому числі:	
3.1	біодизеля	619 001
3.2	біобензину	124 314
4	Поточні (операційні) витрати господарської діяльності, тис. дол. США	571 781
	у тому числі:	
4.1	амортизація	236 070

1	2	3
5	Прибуток до оподаткування (р. 3 – р. 4), тис. дол. США	171 534
5.1	Рентабельність господарської діяльності (р. 5 · 100 / р. 4), %	30,0
5.2	Податок на прибуток (18%), тис. дол. США	30 876
5.3	Чистий прибуток, тис. дол. США	140 658
6	Чистий грошовий потік (р. 3 – р. 4), тис. дол. США	376 728
6.1	Частка чистого грошового потоку в чистому доході (ряд. 6 · 100 / ряд. 3), %	50,7

Джерело: авторські дослідження.

## ЛІТЕРАТУРА

- Elliott D. C. et al. Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process / Elliott D. C., Biller P, Ross A. B., Schmidt A. J., Jones S. B. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 187. P. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.132>
- Водоросли: Цианобактерии, красные, зеленые и харовые водоросли: учебно-методическое пособие / Пауков А. Г., Тептина А. Ю., Кутлунина Н. А. и др. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. 204 с.
- National Algal Biofuels Technology Review / Bioenergy Technologies Office. June 2016. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/national\\_algal\\_biofuels\\_technology\\_review.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/national_algal_biofuels_technology_review.pdf)
- Multi-Year Program Plan / Bioenergy Technologies Office. March 2016. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/03/f20/mypp\\_beto\\_march2015.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/03/f20/mypp_beto_march2015.pdf)
- Chen Ch.-Y. et al. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review / Chen Ch.-Y., Yeh K.-L., Aisyah R., Lee D.-J., Chang J.-S. *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. Iss. 1. P. 71–81. DOI: [10.1016/j.biortech.2010.06.159](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159)
- Bae J.-H., Hur S. B. Selection of Suitable Species of *Chlorella*, *Nannochloris*, and *Nannochloropsis* in High- and Low-Temperature Seasons for Mass Culture of the Rotifer *Brachionus plicatilis*. *Fisheries and Aquatic Sciences*. 2011. Vol. 14. Iss. 4. P. 323–332. DOI: <https://doi.org/10.5657/FAS.2011.0323>
- State of Technology Review – Algae Bioenergy. An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project. Task 39: January 2017. 158 p. URL: <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/01/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-20170114.pdf>
- Sathasivam R., Hemaiswarya Sh., Raja R., Venkatesan G. Microalgae as an Attractive Source for Biofuel. In book: *Environmental Sustainability, Role of Green Technologies*. India: Springer, 2014. Chapter: 8. P. 129–157. DOI: [10.1007/978-81-322-2056-5](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2056-5).
- Khan M. I., Shin J. H., Kim J. D. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*. 2018. Vol. 17. Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- Poirier D. R., Michaux E., Fulleringer M. S. Design of a Small Scale Algae Cultivation System to Produce Biodiesel / Course Engineering Design 2 (BREE 490). McGill University Department of Bioresource Engineering. 2008. URL: <https://www.mcgill.ca/bioeng/files/bioeng/DerrickEdouardMeghan2008.pdf>
- Ting H. et al. Progress in microalgae cultivation photobioreactors and applications in wastewater treatment: A review / Ting H., Haifeng L., Shanshan Ma, Zhang Y., Zhidan L., Na D. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017. Vol. 10. No. 1. DOI: [10.3965/j.ijabe.20171001.2705](https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171001.2705)
- Huang Q., Jiang F., Wang L., Yang Ch. Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms. *Engineering*. 2017. Vol. 3. Iss. 3. P. 318–329. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>
- Johnson T. J. et al. Photobioreactor Cultivation Strategies for Microalgae and Cyanobacteria / Johnson T. J., Katuwal S., Anderson G. A., Gu L., Zhou R., Gibbons W. R. *Biotechnology Progress*. 2018. Vol. 34. Iss. 4. P. 811–827. DOI: <https://doi.org/10.1002/btpr.2628>
- Advanced Algal Systems. Project Peer Review. URL: [https://algaefoundationatec.org/downloads/2017\\_peer\\_review.pdf](https://algaefoundationatec.org/downloads/2017_peer_review.pdf)
- Zitelli C., Biondi N., Rodolfi L., Tredici M. R. Photobioreactors for Microalgal Biofuel Production Graziella. In book: *Algae for biofuels and energy*. New York: Springer, 2013. Chapter: 7. P. 115–131. DOI: [10.1007/978-94-007-5479-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5479-9_7)
- Hagendijk A. J. Design of an optimal photobioreactor: Thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering (Chemical Engineering). Stellenbosch University. 2015. 192 p. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1000.4160&rep=rep1&type=pdf>
- Zhu Y., Jones S. B., Anderson D. B. Algae Farm Cost Model: Considerations for Photobioreactors. 2018. DOI: <https://doi.org/10.2172/1485133>
- Hoffman J. Techno-Economic Assessment of Micro-Algae Production Systems. Utah State University. 2016. DOI: <https://doi.org/10.26076/2477-0908>

## REFERENCES

- “Advanced Algal Systems. Project Peer Review”. [https://algaefoundationatec.org/downloads/2017\\_peer\\_review.pdf](https://algaefoundationatec.org/downloads/2017_peer_review.pdf)
- Bae, J.-H., and Hur, S. B. “Selection of Suitable Species of *Chlorella*, *Nannochloris*, and *Nannochloropsis* in High- and Low-Temperature Seasons for Mass Culture of the



- Rotifer *Brachionus plicatilis*". *Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 14, no. 4 (2011): 323-332.  
DOI: <https://doi.org/10.5657/FAS.2011.0323>
- Chen, Ch.-Y. et al. "Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review". *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 1 (2011): 71-81.  
DOI: [10.1016/j.biortech.2010.06.159](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159)
- Elliott, D. C. et al. "Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process". *Bioresource Technology*, vol. 187 (2015): 147-156.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.132>
- Hagedijk, A. J. "Design of an optimal photobioreactor : Thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering (Chemical Engineering)". Stellenbosch University. 2015. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1000.4160&rep=rep1&type=pdf>
- Hoffman, J. *Techno-Economic Assessment of Micro-Algae Production Systems*. Utah State University, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.26076/2477-0908>
- Huang, Q. et al. "Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms". *Engineering*, vol. 3, no. 3 (2017): 318-329.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>
- Johnson, T. J. et al. "Photobioreactor Cultivation Strategies for Microalgae and Cyanobacteria". *Biotechnology Progress*, vol. 34, no. 4 (2018): 811-827.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/btpr.2628>
- Khan, M. I., Shin, J. H., and Kim, J. D. "The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products". *Microbial Cell Factories*, vol. 17, no. 1 (2018).  
DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- "Multi-Year Program Plan". Bioenergy Technologies Office. March 2016. [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/03/f20/mypp\\_beto\\_march2015.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/03/f20/mypp_beto_march2015.pdf)
- "National Algal Biofuels Technology Review". *Bioenergy Technologies Office*. June 2016. [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/national\\_algal\\_biofuels\\_technology\\_review.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/national_algal_biofuels_technology_review.pdf)
- Paukov, A. G. et al. *Vodorosli: Tsiyanobakterii, krasnyye, zelenyye i kharovyye vodorosli* [Algae: Cyanobacteria, Red, Green and Chara Algae]. Yekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2017.
- Poirier, D. R., Michaux, E., and Fulleringer, M. S. "Design of a Small Scale Algae Cultivation System to Produce Biodiesel". *Course Engineering Design 2 (BREE 490)*. McGill University Department of Bioresource Engineering. 2008. <https://www.mcgill.ca/bioeng/files/bioeng/DerickEdouardMeghan2008.pdf>
- "State of Technology Review – Algae Bioenergy". *An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project*. Task 39: January 2017. <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/01/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-20170114.pdf>
- Sathasivam, R. et al. "Microalgae as an Attractive Source for Biofuel". In *Environmental Sustainability, Role of Green Technologies*, chapter 8, 129-157. India: Springer, 2014.  
DOI: [10.1007/978-81-322-2056-5](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2056-5)
- Ting, H. et al. "Progress in microalgae cultivation photobioreactors and applications in wastewater treatment: A review". *Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 10, no. 1 (2017).  
DOI: [10.3965/j.ijabe.20171001.2705](https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171001.2705)
- Zhu, Y., Jones, S. B., and Anderson, D. B. *Algae Farm Cost Model: Considerations for Photobioreactors*. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.2172/1485133>
- Zittelli, C. et al. "Photobioreactors for Microalgal Biofuel Production Graziella". In *Algae for biofuels and energy*, chapter 7, 115-131. New York: Springer, 2013.  
DOI: [10.1007/978-94-007-5479-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5479-9_7)