

DOI: 10.18372/2310-5461.49.15184

УДК 662.756.3.002.2(477)(045)

О. Л. Матвєєва, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет,
orcid.org/0000-0001-7450-0479
e-mail: mol@nau.edu.ua;

А. Д. Кустовська, канд. хім. наук, доц.
Національний авіаційний університет,
orcid.org/0000-0002-6836-3305
e-mail: akust7@gmail.com;

А. Ю. Шипілова,
Національний авіаційний університет,
orcid.org/0000-0002-7031-1096
e-mail: shipilova091198@gmail.com

ПОТЕНЦІАЛ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА НА ОСНОВІ БІОМАСИ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

Вступ

Стрімке підвищення цін на нафту та невпевненість у кількості наявних запасів в поєднанні із занепокоєнням щодо глобальних змін клімату спричинили потребу в нових транспортних паливах та біопродуктах з поновлювальних джерел для заміни викопних вуглецевих матеріалів. Викопне паливо не поновлювальний ресурс, його запаси при наростаючих потребах людства швидко вичерпуються. Саме тому, багато експертів та фахівців-енергетиків відзначають, що при сучасних темпах споживання запасів нафти вистачить не більше ніж на 40 років, природного газу — на 60, вугілля — на 170 років [1], хоча є і більш оптимістичні прогнози.

Альтернативна сировинна для отримання вуглеводневих моторних палив є актуальним предметом науково-прикладних досліджень останніх десятиліть. У даній статті приділена увага мікрводоростям, як потенційному сировинному джерелу для виробництва як біодизельного палива, так і біоетанолу.

Як відомо, паливо одержане з мікрводоростей відноситься до біопалива третього покоління. Мікрводорості не потребують особливих умов для їх культивування, наприклад таких як високоякісні сільсько-господарські землі, що значно спрощує процес їх вирощування.

На відміну від них, вирощування сировини для виробництва біопалив першого покоління обумовлює використання посівних площ, що є не бажаною конкуренцією при вирощуванні харчової продукції. До джерел отримання біопалива другого покоління відносять вторинну

сировину та відходи сільськогосподарської діяльності.

Згідно з Державною цільовою економічною програмою енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2020 роки впровадження виробництва біопалива третього покоління є перспективним напрямком для України.

Світовий досвід з культивування та виробництва сировини для біопалива дозволяє спростити пошук оптимальних технологій переробки та вирощування для українського виробництва.

Також відповідно до «Стратегії сталого розвитку України до 2030 року» основними цілями є раціональне використання відходів інших підприємств у якості сировини для виробництва біопалива з біомаси мікрводоростей, яке у свою чергу сприятиме зменшенню використання викопних вуглецевих палив [2].

Постановка проблеми та завдання

З одержаної біомаси можна одержати різноманітні види біопалив. Переробка біомаси мікрводоростей з метою одержання біопродукту різного призначення дозволить зменшити імпортозалежність України при закупівлі стратегічно важливої енергетичного продукту та забезпечить захист навколишнього середовища.

Метою роботи є аналіз методів та можливостей виробництва біопалива 3-го покоління в Україні.

Об'єкт дослідження — аналіз перспектив впровадження виробництва біопалива на основі біомаси мікроводоростей.

Предмет дослідження — потенціал та можливості виробництва біопалива на основі мікроводоростей на потужностях вітчизняних підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Переваги мікроводоростей, як перспективної відновлювальної сировини для виробництва моторних палив описані у багатьох наукових джерелах [3–5], де зазначається, що водорості мають здатність виробляти більше енергії на акр землі порівняно з іншими культурами, такими як цукровий очерет, пшениця та кукурудза. Саме з цих причин мікроводорості є біомасою з максимальним потенціалом, яка може бути заміною транспортного дизельного палива, не впливаючи негативно на продовольчі потреби та інші продукти рослинництва.

Так, у працях Scott, S. A., M. P. Davey, J. S. Dennis [6] було зазначено про існування майже 300 000 видів водоростей із різноманітним вмістом олії та різними темпами зростання.

Відомо, що мікроводорості можуть подвоювати свою біомасу протягом доби та здатні

досягати повного циклу росту протягом декількох днів, саме тому вони вважаються у 10–20 разів більш продуктивними, ніж типові культури для виробництва біопалива, такі як соя чи цукровий очерет.

Звертається, також увага на вміст ліпідів на одиницю ваги сухої біомаси мікроводоростей, адже він може змінюватися для різних видів сировини.

В. В. Воробйов [1] зазначає, що за складом ліпіди водоростей та ліпіди рослин олійних культур подібні між собою, і містять полінасичені жирні кислоти. Окрім цього вони також вказують, що вміст жирних кислот в мікроводоростях, що мешкають у природних умовах, становить близько 40 % від загальної маси, тоді як в умовах культивування можна досягти 80 %.

Для відбору ефективного виду мікроводоростей для виробництва біопалива враховують об'ємну продуктивність даного виду.

У табл. 1 показано порівняння мікроводоростей з іншими видами сировини для виробництва біодизелю, а саме порівняння вмісту олії на суху масу, врожайність на рік/гектар та ефективність виробництва біодизелю [7].

Таблиця 1

Порівняння різних видів сировини для виробництва біодизелю [7]

Сировина	Вміст олії, (% в біомасі на суху вагу)	Врожайність, олії (л/га/рік)	Земельні угіддя, (м ² /рік/кг)	Продуктивність, (кг /рік)
Соєві боби	18	636	18	562
Рапс	41	974	12	862
Соняшник	40	1070	11	946
Пальмова олія	36	5366	2	4747
Рицинова олія	48	1307	9	1156
Мікроводорості	70	136 900	0,1	121 104

Наведені вище дані демонструють незаперечну перевагу мікроводоростей, як сировини найбільш перспективної альтернативи порівняно з іншими сировинними ресурсами. Водорості мають найвищий темп росту, що робить їх життєздатним джерелом біомаси, що здебільшого містить ліпідну олію, яка дає більший вихід палива порівняно з іншими видами.

Слід зауважити, що географічне положення України, а саме розташування у помірному

кліматичному поясі, спричиняє значні сезонні температурні коливання атмосферного повітря, особливо на півдні та сході країни.

Зими на заході України помітно м'якші, ніж на сході. Такі умови унеможливають процес культивування мікроводоростей у відкритих водоймах у межах України, адже культивування в такому випадку буде не рентабельним (рис. 1).

Особливостями відкритих систем культивування є необхідність підтримки відповідного

температурного режиму та поживного середовища. Підтримка температурного режиму є головним недоліком для систем відкритого типу для країн із прохолодним кліматом.

Натомість вирощування мікроводоростей у системах закритого типу, так званих фотобіореакторах [8; 9], є більш раціональним та дає можливість використовувати ще й відповідні відходи інших підприємств (рис. 2).



Рис. 1. Види відкритих систем для культивування мікроводоростей



Рис. 2. Види закритих систем для культивування мікроводоростей

Так, з метою зниження вартості одержуваної біомаси для приготування поживних середовищ є можливим застосування мінеральних добрив. Використання стічних вод ряду підприємств, зокрема цукрових та гідролізних заводів, є також економічно вигідним рішенням [10].

Після процесу культивування та вирощування водоростевої біомаси настає процес її збору. Причому, значний внесок до загальних витрат на виробництво палива, біля 20–30 %, становить саме збір та підготовка біомаси для подальшої обробки. А отже, необхідно задіяти рентабельну технологію збирання водоростевої біомаси для масового виробництва біопалива з мікроводоростей.

Найбільш популярними методами концентрування біомаси водоростей: фільтрація, центрифугування, седиментація, флокуляція та флотація. Вибір методу залежить від розмірів

клітин, їх щільності, собівартості готового продукту та від об'ємів біомаси. Було досліджено [11], що збір водоростей низької концентрації з малим діаметром клітини (від 2 до 20 мкм) вимагає значних витрат. Тому для таких видів мікроводоростей варто використовувати систему двоетапного збору.

Двоетапний процес збирання мікроводоростей включає насипне збирання та загущення. Для насипного збирання біомасу відокремлюють від загальної суспензії такими методами, як осадження, флокуляція та флотація. Тоді як мета процесу загущення полягає у досягненні концентрованої форми суспензії з використанням таких методів, як центрифугування та фільтрація.

Якщо говоримо про масштабне виробництво біопалива на основі мікроводоростей в Україні, то найбільш оптимальними, на наш погляд, є флокуляція та флотація. Незважаючи на високу

вартість флокулянтів, вони є ефективними для промислових масштабів виробництва та дають високий вихід олії, що є важливою складовою для визначення рентабельності та собівартості готової продукції.

Виклад основного матеріалу. SWOT-аналіз. Для впровадження будь якого вироб-

ництва необхідно оцінити всі загрози та переваги такого виробництва у порівнянні із наявними. Тому нами був проведений SWOT-аналіз виробництва біопалива з мікроводоростей в Україні (рис. 3) з детальним аналізом сильних та слабких сторін, можливостей і загроз такого виробництва.



Рис. 3. Матриця SWOT – аналізу виробництва біопалива з мікроводоростей в Україні

Отримана матриця SWOT-аналізу дає змогу візуалізувати сильні і слабкі сторони майбутнього виробництва біопалива на основі мікроводоростей із загрозами і можливостями, які очікують потенційних виробників в ринкових умовах.

Відповідно такий аналіз приводить до необхідності детального вивчення технологій переробки та їх переваг з точки зору виходу готового продукту, а також до необхідності пошуку підприємств для впровадження технологій вирощування та переробки мікроводоростей з подальшою можливістю

виготовлення біопалива. Таким чином, даний SWOT-аналіз можна розглядати як необхідний крок для визначення потенціалу та перспективи вітчизняного виробництва біопалива. Окрім цього, необхідно звертати увагу на те, що деякі сильні сторони можуть виявитися слабкими по відношенню до іншої країни-виробника.

Необхідними умовами для культивування є наявність сонячного світла, тепла, поживного середовища та вуглекислого газу. Мікроводорості є невибагливими до умов вирощування, а тому можливе культивування у відкритих та закритих системах.

Провівши аналіз слабких сторін можна виділити головний фактор, що призупиняє впровадження виробництва в Україні — значні початкові інвестиції. На сьогодні, в Україні наявні програми фінансування у сфері альтернативної енергетики, метою яких є удосконалення енергетичної політики, розвиток енергоефективності, скорочення споживання традиційної енергії, збільшення інвестицій в енергетичний сектор, зниження витрат на енергоносії та імпорт енергоресурсів, зменшення викидів парникових газів. Серед них можна виділити такі [12]:

1. Програма фінансування альтернативної енергетики в Україні (USELF) являє собою кредитну лінію в розмірі до 50 млн євро, відкрита Європейським Банком Реконструкції та Розвитку (СБРР) для сприяння реалізації проектів з використання відновлюваних джерел енергії в Україні.

2. Грантова підтримка проектів енергоефективності (фонд Е5Р), спрямована на реалізацію проектів з енергоефективності в Україні.

3. Фінансова підтримка Державної інноваційної фінансово-кредитної установи, основними напрямками фінансування є ІТ-технології, біорозробки, транспорт, авіація, енергетика, інновації.

Звичайно слід звернути увагу на загрози, які очікують виробників при впровадженні технологій виробництва біопалива. Серед них окремо можна виділити рентабельність та велику конкурентність на ринку пропозицій наявних видів палив.

Серед перспектив впровадження виробництва біопалива третього покоління в Україні також можна виділити можливість компаундування біопалива з традиційними видами палива, що дасть змогу зменшити використання викопного палива, використання біоетанолу в якості добавок. Окрім цього, застосування такого біопалива у транспортній або енергетичній галузях дасть змогу зменшити імпортозалежність України [13].

Ми розглядаємо можливість впровадження технологій виробництва біопалива на основі мікроводоростей на потужностях вітчизняних підприємств. Обладнання заводів аналогів дозволить зменшити витрати основних фондів та ризики нерентабельності виробництва. Серед таких підприємств можна виділити Державне підприємство «УКРСПИРТ» — найбільший виробник високоякісного спирту та спиртовмісної продукції в Україні. На потужностях

даного підприємства можливо виготовляти біоетанол з мікроводоростей. Товариство з обмеженою відповідальністю «БЮДИСК», яке раніше вже планувало організувати виробництво синтез-газу, що правда з побутових відходів та інших матеріалів, які накопичуються на міських звалищах.

Технологічні можливості вітчизняних виробників

Аналізуючи та систематизуючи вищенаведену інформацію наукових досліджень нами були визначені головні аспекти, від яких залежить ступінь конверсії біомаси та розглянуті потенційні можливості по впровадженню даного виробництва на потужностях вітчизняних підприємств.

Біохімічна конверсія біомаси. Анаеробне зброджування є типовим методом біохімічної конверсії водоростевої біомаси. Процес включає в себе гідроліз крохмалю до простих цукрів з наступним бродінням утворюючи біоетанол.

В Україні реальним є втілення цього способу переробки, використовуючи наявне обладнання на заводах-аналогах (рис. 4). Наприклад, компанія «Zorg Biogas» побудувала найбільшу біогазову станцію потужністю 7,5 МВт на цукровому заводі за новою технологією. Це дає можливість спільно з компанією «Zorg Biogas» налагодити та впровадити виробництво біометану з біомаси мікроводоростей.

Державне підприємство «УКРСПИРТ» — найбільший виробник високоякісного спирту та спиртовмісної продукції в Україні. Застосування технології бродіння водоростевої сировини на ДП «УКРСПИРТ» дасть змогу виготовити якісний біоетанол.

Термохімічна конверсія біомаси. До основних термохімічних методів конверсії водоростевої біомаси можна віднести газифікацію, піроліз, гідротермальне зрідження (НТЛ). Процес газифікації досягається реакцією високотемпературного окиснення біомаси різними окисниками (повітрям, киснем і їх сумішшю з водяною парою).

За допомогою такого методу можна одержати синтез-газ. Вихід газу та його склад також буде залежати від складу вихідної сировини. Вихід можна регулювати зміною параметрів процесу (тиску, температури) та додаванням каталізаторів. Реалізувати таке виробництво в Україні можливо на ТОВ «БЮДИСК» (рис. 4), яке раніше вже планувало організувати виробництво синтез-газу, що правда з побутових відходів та інших матеріалів, які накопичуються на міських звалищах.

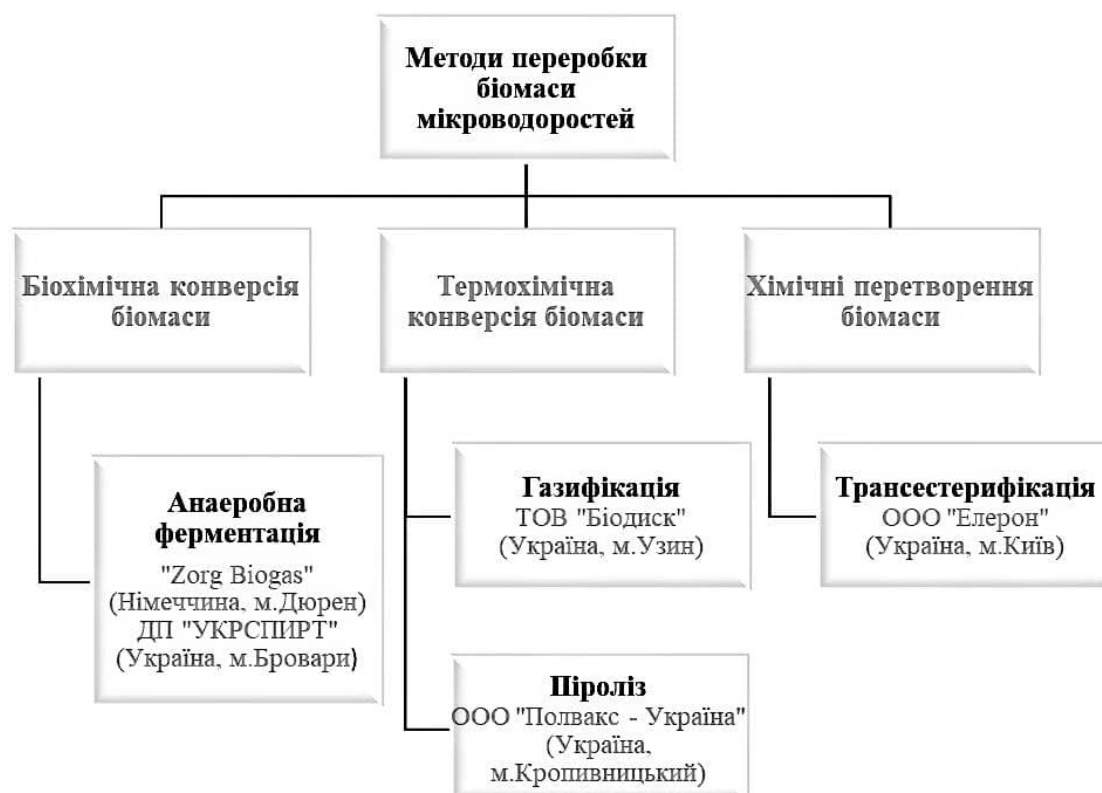


Рис. 4. Методи переробки біомаси мікроводоростей в Україні

Іншим варіантом термохімічної конверсії є піроліз, який відбувається за відсутності кисню чи повітря, що протікає зазвичай при атмосферному тиску у діапазоні температур 400–600 °С для звичайного піролізу, до 800 °С для мікрохвильового піролізу та мінімум до 300 °С для каталітичного піролізу. Піроліз, на відміну від газифікації, має свої недоліки, а саме необхідність попередньої підготовки сировини. Тому застосування піролізу можливе лише на підприємствах, де вже передбачено попереднє просушування сировини.

Хімічні перетворення біомаси. Процес трансестерифікації є найпопулярнішим методом перетворення біомаси в паливо, який останнім часом привернув до себе багато уваги, як до методу одержання біодизельних палив. Слід зазначити, що останнім часом на ринку пропозицій технологічного обладнання цього технологічного процесу прослідковується певна активність, зокрема компанія ООО «Елерон» пропонує для продажу повну технологічну лінію для виробництва біодизелю.

Впровадити виробництво біології з водоростевої сировини в Україні можливо на ООО «Полвакс–Україна».

Підводячи ризику під всім зазначеним вище, необхідно також наголосити та тому, що одним з етапів гальмування процесу впровадження та

налагодження виробництва біопалива третього покоління в Україні є не відсутність сировинної бази, технологічних потужностей, а відсутність скоординованої цільової програми досліджень вчених в даній галузі.

Наявність такої програми дало б змогу науковцям з усієї країни ефективно та колективно працювати над впровадженням оптимальних технологій виробництва біопалива.

Висновки

Результати проведених досліджень показали, що в нашій країні існують основні передумови та перспективи виробництва біопалива на основі мікроводоростей на потужностях вітчизняних виробництв, враховуючи реалізацію основних цілей Стратегії сталого розвитку України 20230 р.

Проведений SWOT-аналіз дав змогу оцінити перспективи впровадження даного виробництва, охоплюючи не лише сильні та слабкі сторони, а й можливості та загрози.

Показано, що для культивування мікроводоростей в Україні раціонально використовувати фотобіореактори, а як поживного середовища буде доцільним застосовувати відходи цукрових та целюлозних виробництв. Серед основних технологій переробки біомаси мікроводоростей в паливо слід виділити біохімічну та

термохімічну конверсію а також хімічне перетворення біомаси.

Використання потужностей вітчизняних підприємств, таких, як «Zorg Biogas», ДП «УКРСПИРТ», ООО «Полвакс–Україна», ООО «Элерон», позитивно сприятиме нарощуванню темпів вітчизняного виробництва біопалива на основі біомаси мікроводоростей.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Vorob'yev V. V., Kozhevnikov YU. A., Shchekochikhin Yu. M. (2015). "Microalgae for energy biomass and fuel production", *Agricultural innovations*, 2, pp. 235–243.
- [2] Strategy of sustainable development of Ukraine until 2030. (2019). Ukraine presidential decree No. 722/2019.
- [3] Brennan, L. and P. Owende. (2010). "Biofuels from microalgae — A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co—product". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 557–577.
- [4] Pavliukh, L., Shamanskyi, S., Boichenko, S. and Jaworski, A. (2020). "Evaluation of the potential of commercial use of microalgae in the world and in Ukraine", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2020-0181>
- [5] Carneiro M. L., Pradelle F. M., Braga S. L et al. (2017). "Potential of biofuel from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA)". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, pp.632–653.
- [6] Scott, S. A., M. p. Davey, J. S. Dennis et al. (2010). «Biodiesel from algae: Challenges and prospects» *Current Opinion in Biotechnology* 21, pp. 277–286.
- [7] Mata, T. M., A. A. Martins, and N.S. Caetano. (2010). «Microalgae for biodiesel production and other applications: a review» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1) pp. 217–232.
- [8] Boichenko S. V., Pavliukh L., Shamansky S., Syrotina I., Todorovych O. (2020). Cascade Photobioreactor for Waste Water Treatment by Microalgae // *Modern Management Review*, Vol. XXV, No 27 (3/2020), p. 17–29. <https://doi.org/10.7862/rz.2020.mmr.19>
- [9] Shamanskyi S., Boichenko S., Adeniyi C. (2019). Photobioreactor for microalgae cultivation for biofuel production with simultaneous sewage water treatment. *Systemy i Środki Transportu Samochodnego. Wybrane Zagadnienia. Monografia nr. 16. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska.*, 2019., pp. 61–67.
- [10] Ehimen, E.A., Holm–Nielsen J.B., Poules M., and Boelsmand J.E. (2013). "Influence of different pre—treatment routes on the anaerobic digestion of a filamentous algae", *Renewable Energy* 50. Pp. 476–480.
- [11] Ugwu C. U. et al. (2008). "Photobioreactors for mass cultivation of algae" *Bioresource Technology*. Pp. 4021–4028.
- [12] Alternative energy financing programs [Elektronnyy resurs]. — Rezhym dostupu: <https://iknet.com.ua/uk/articles/useful-to-know/funding-programs/>
- [13] Kustov'ska A. D., Kharchenko O. V. (2008). "Bioethanol: problems of use and prospects of use" *East European Journal of Advanced Technologies*, №1/3 (31), pp. 26–29.

Матвєєва О. Л., Кустовська А. Д., Шипілова А. Ю.

ПОТЕНЦІАЛ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА НА ОСНОВІ БІОМАСИ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

У статті розглянуто та запропоновано способи переробки біомаси мікроводоростей з метою одержання паливного продукту. Підхід базується на аналізі основних проблем впровадження виробництва в Україні, що були детально розглянуті за допомогою SWOT–аналізу. Розглянуто основні особливості, вимоги та умови до вирощування водоростевої біомаси та процеси її переробки. Висунуті рекомендації щодо культивування та переробки біомаси мікроводоростей в Україні. На основі результатів досліджень проведено систематизацію результатів та обґрунтовані вимоги до процесу переестерифікації з одержанням найбільшої конверсії вихідної сировини. Отримані результати дозволяють припустити, що впровадження виробництва біопалива на основі мікроводоростей в Україні можливе із застосуванням потужностей вітчизняних виробництв та використанням в якості поживного середовища відходів целюлозних виробництв.

Ключові слова: біопаливо; біодизельне паливо; мікроводорості; зелена енергетика; переестерифікація біомаси; паливо третього покоління.

Matvyeyeva O. L., Kustovska A. D., Shypilova A. Y.

POTENTIAL AND PROSPECTS OF DOMESTIC PRODUCTION OF BIOFUELS BASED ON BIOMASS OF MICROALGAE

The article considers and proposes methods of processing microalgae biomass to obtain a fuel product. The approach is based on the analysis of the main problems of production introduction in Ukraine, which were considered in detail with the help of SWOT-analysis. It allows you to assess the strengths and weaknesses of the introduction of new production. After assessing the threats and benefits for Ukraine, certain features were identified that need to be taken into account for the territorial location of the country. The main features, requirements and conditions of algae biomass cultivation and its processing are considered. It is emphasized that for the Ukrainian climate, the cultivation of microalgae in open systems is unprofitable due to the need to maintain appropriate temperatures. Instead, cultivation in closed systems will allow the use of pulp waste as a nutrient medium. Among the methods of collecting microalgae biomass, flocculation and flotation were identified as the most efficient for large-scale production. Filtration, separation and settling can be considered as collection methods for small-scale or laboratory experiments. Among the processing methods, we distinguish three areas—thermo chemical and biochemical transformation of biomass, as well as chemical transformations. For Ukrainian production, we advise you to focus on recertification processes as the world's most popular method of biomass processing. The known directions of transformation with examples of capacities of domestic enterprises are considered in detail in the work. We single out anaerobic fermentation, gasification, pyrolysis and transesterification as the most successful processing methods for Ukraine. Based on the research results, the results are systematized and substantiated the requirements for the transesterification process with the largest conversion of raw materials. Further research is aimed at practical research of biofuel production by laboratory methods and analysis of its operational properties.

Keywords: biofuel; biodiesel; microalgae; green energy; biomass transesterification; third generation fuel.

Стаття надійшла до редакції 01.02.2021 р.
Прийнято до друку 10.03.2021 р.