

УДК 662.753.1:662.753.12.012

<https://doi.org/10.31713/vt220252>

Квартенко О. М. [1; ORCID ID: 0000-0001-5634-1128],

Д.Т.Н., доцент

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СИНТЕЗУ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА (ОГЛЯД)

Проаналізовано сучасні технології та обладнання для синтезу біодизельного палива. Надано показники виробництва біодизелю з різних олійних культур. Висвітлено сучасні наукові тенденції в розвитку технологій та технічних засобів для виробництва біодизелю. Розглянуто технології виробництва дизельного біопалива з рослинної олії холодного віджиму та дизельного біопалива із олії гарячого віджиму, а також мікроводоростей. На основі аналізу мікроводоростей продуцентів ліпідів визначено, що найкращими продуцентами біодизелю є мікроводорості *Chlorella vulgaris* та *Nannochloropsis oculata*. Розглянуто базові технології виробництва біодизельного палива їх основні технологічні характеристики, переваги та недоліки. Наведено приклади способів прискорення реакції переестерифікації з використання ультразвукових хвиль.

Ключові слова: біодизель; переестерифікація; мікроводорості; технології одержання біодизелю; ультразвукова кавітація.

Вступ. Розвиток сучасного техногенного суспільства призводить до збільшення потреби у різних видах енергії (табл. 1) і, як наслідок, до виснаження вичерпних природних енергетичних ресурсів та зміни клімату. Міжурядова група експертів зі зміни клімату (Intergovernmental Panel on Climate Change) визначила, що для того, щоб уникнути підвищення середньої глобальної температури більш ніж на допустимий максимум у 2–2,4° С, викиди парникових газів повинні скоротитися у 2050 р. до 50% від значення 2000 року [1].

З огляду на це, більшість передових країн світу для заміни дизелю або бензину впроваджують програми нарощування обсягів використання відновлюваної енергетики.

Таблиця 1

Динаміка споживання первинних енергоресурсів у світі в період 2009 по 2019 роки

Рік	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
млн т.н.е.	304,9	312	327,2	324,7	337	341,8	339	338,2	343,7	344,4	348,3



Основними пріоритетами енергетичної політики України проголошено енергоефективність, використання відновлювальних джерел енергії та зниження негативного впливу на навколишнє середовище [2]. Відповідно до Прогнозного балансу загального первинного постачання енергії (ЗППЕ) до 2035 р. [3], частка відновлювальної енергетики у 2035 р. зросте до 20% загального первинного постачання енергії. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є виробництво біопалива та розвиток біоенергетичної галузі (рис. 1).

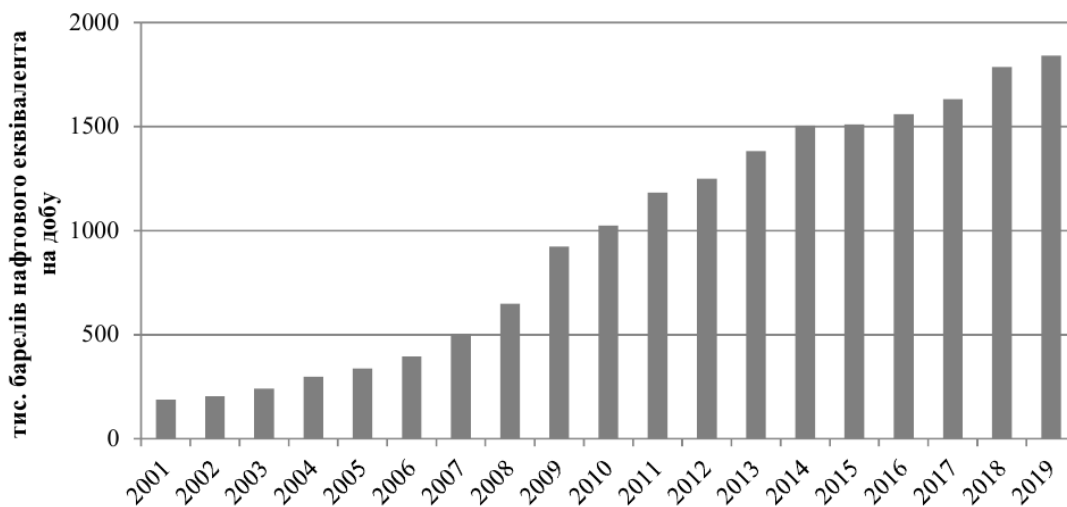


Рис. 1. Світове виробництво біопалива (біоетанолу та біодизелю) (у тисячах барелів нафтового еквівалента на день) [4]

Метою роботи є аналітичний огляд сучасних технологій та обладнання для синтезу біодизельного палива.

Виклад основної частини. Біодизель є відновлювальним паливом, що виробляється в результаті реакції трансестерифікації між спиртом та жирними кислотами із тваринного жиру або рослинної олії у присутності каталізатора [5; 6]. Під час його використання відсутні чисті викиди CO_2 , оксидів сірки (SO_x). Також слід зазначити значне зменшення викидів оксидів азоту (NO_x) порівняно з викидами від нафтодизеля.

Сировина для виробництва біодизелю. Сировиною для виробництва біодизелю в різних країнах є різні олії (табл. 2). Враховуючи вимоги до окислення палива, перевагу слід віддавати оліям з високим вмістом мононенасичених жирних кислот олеїнового ряду і незначним вмістом ди- та триненасичених кислот. Основною олійною культурою в Європі, яка відповідає цим вимогам,

є технічні сорти ріпаку, які мають підвищений (більш 5%) вміст ерукової кислоти і не є придатними до їжі.

Таблиця 2

Показники виробництва біодизеля з різних олійних культур [7–9]

Вихідна сировина	Галон біодизеля на акр за рік	Вихідна сировина	Галон біодизеля на акр за рік
Кукурудза	15	Арахіс	113
Конопля	39	Оливкова олія	120
Соя	50	Кокос	200
Ріпак	90	Пальмова олія	207
Соняшник	102	Мікрородорсті	5000–20000

В таблиці 3 наведені дані потенціалу виробництва дизельного біопалива із олії, виробленої з відходів зерна в Україні.

Таблиця 3

Потенціал виробництва дизельного біопалива із олії, виробленої з відходів зерна в Україні [10]

Олійна культура	Загальне виробництво, тис. т	Вихід:						Осяг виробництва дизельного біопалива тис. т
		зернових відходів		олійної маси із зернових відходів		олії із зернових відходів		
		%	тис. т	%	тис. т	%	тис. т	
Соняшник	11181,1	7	782,7	20	156,5	60	93,9	79,8
Соя	3930,6	3	117,9	20	23,6	60	14,2	12,0
Ріпак	1737,6	3	52,1	20	10,4	60	6,3	5,3
Всього	16849,3		952,7		190,5		114,3	97,2

Сучасні наукові тенденції у розвитку технологій та технічних засобів для виробництва біодизелю. Найкращі результати при виготовленні біодизелю досягаються при переестерефікації природних олів спиртами, на основі хімічної реакції між тригліцеридами природних олій та метанолом чи етанолом, яка відома під назвою алкохоліз [20]. Отриманий в результаті переестерифікації продукт є сумішшю етилових та метилових естерів жирних кислот. Сучасні технології, в якості реагентів при виробництві біодизелю, використовують рослинні олії та метанол (рис. 2). Реакцію проводять в присутності лужного гомогенного каталізатора.

Мікрородорсті – одноклітинні фотоавтотрофні мікроорганізми (здатні синтезувати органічні речовини з неорганічних речовин із використанням світла як джерела енергії) або фотогетеротрофні.

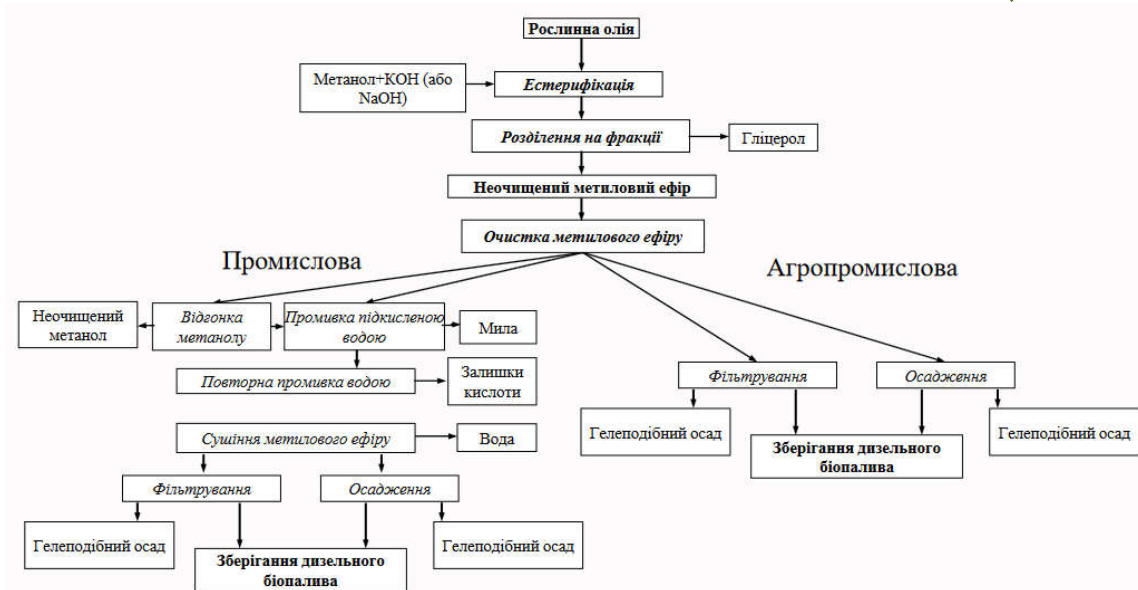


Рис. 2. Технології виробництва дизельного біопалива [10]

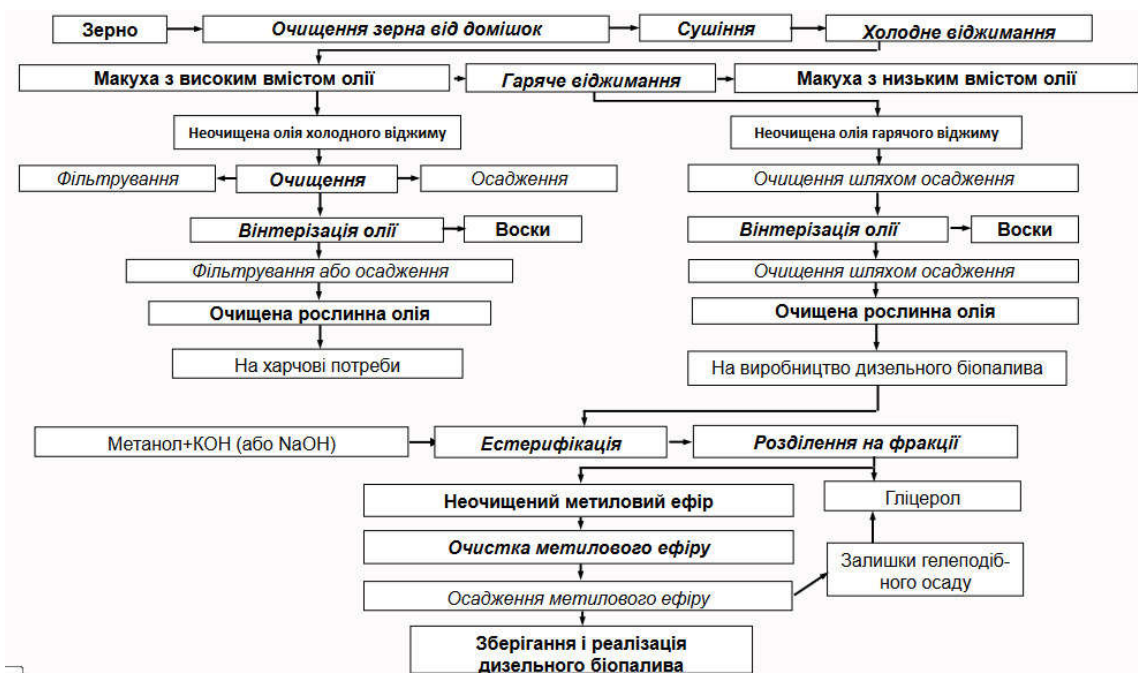
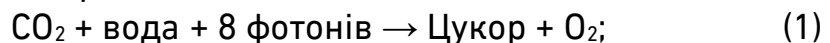


Рис. 3. Схема агропромислового виробництва олії холодного віджиму та дизельного біопалива із олії гарячого віджиму [10]

Мікроводорості перетворюють фотонну енергію, воду та CO_2 у цукри \rightarrow цукри перетворюються на макромолекули, (ліпіди або / і триацилгліцерини-ТАГ) реакції (1–2):



Залежно від штаму, складу середовища росту та умов культури (температура, рН, вуглекислий газ та поглинання фотонної енергії), клітини водоростей можуть містити до 80% ліпідів, які вважаються основною сировиною для біодизеля. У таблиці 4 наведено 12 видів мікроводоростей та вміст ліпідів, який вони здатні накопичити [7, С. 11–13]. Рівні ліпідів коливаються від 5% сухої біомаси (СБ) у *Chlorella vulgaris* до 77% СБ у *Schizochytrium sp.* Вміст олії, зазвичай, становить від 20% до 50%.

Таблиця 4

Вміст ліпідів у деяких видах мікроводоростей

Види мікроводоростей	Вміст ліпідів (% СР)	Види мікроводоростей	Вміст ліпідів (% СР)
<i>Ankistrodesmus sp.</i>	24–31	<i>Nannochloris sp.</i>	20–56
<i>Botryococcus braunii</i>	25–75	<i>Nannochloropsis oculata</i>	22–29
<i>Chlorella emersonii</i>	25–63	<i>Neochloris oleoabundans</i>	29–65
<i>Chlorella vulgaris</i>	5–58	<i>Pyrrosia laevis</i>	69.1
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20–51	<i>Schizochytrium sp.</i>	50–77
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16–71	<i>Zitzschia sp.</i>	45–47

Для отримання максимального виходу ліпідів важливо підібрати не тільки оптимальне поживне середовище але й умови культивування [14]. Кінцевим продуктом технологічного процесу є біодизель отриманий за безперервною двоступеневою технологією з олії мікроводоростей *Nannochloropsis oculata*, які культивують на стандартному середовищі F2 у фотобіореакторі. Олію виділяють шляхом екстракції за допомогою ультразвуку та фільтрування на фільтр-пресі.

Як видно з таблиці 5, використовуючи мікроводорості *Nannochloropsis oculata* отримуємо біодизель, який відповідає стандартам EN14214 та ДСТУ 6081:2009 «Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги».

На основі аналізу мікроводоростей-продуцентів ліпідів встановлено, що найкращими продуцентами біодизелю є мікроводорості *Chlorella vulgaris* та *Nannochloropsis oculata*. На рисунку 4 наведена загальна схема виробництва олії з мікроводоростей з подальшим виробництвом біодизелю.



Таблиця 5

Фізико-хімічні властивості біодизельного палива отриманого з олії мікроводоростей *Nannochloropsis oculata* [15]

Вміст ефіру	%	96,5	Октанове число	-	20–25
Густина	кг/м ³	875–900	Цетанове число	-	50–55
В'язкість	мм ² /с	3,5–5,0	Теплоємність	кДж/кг•град	1,9

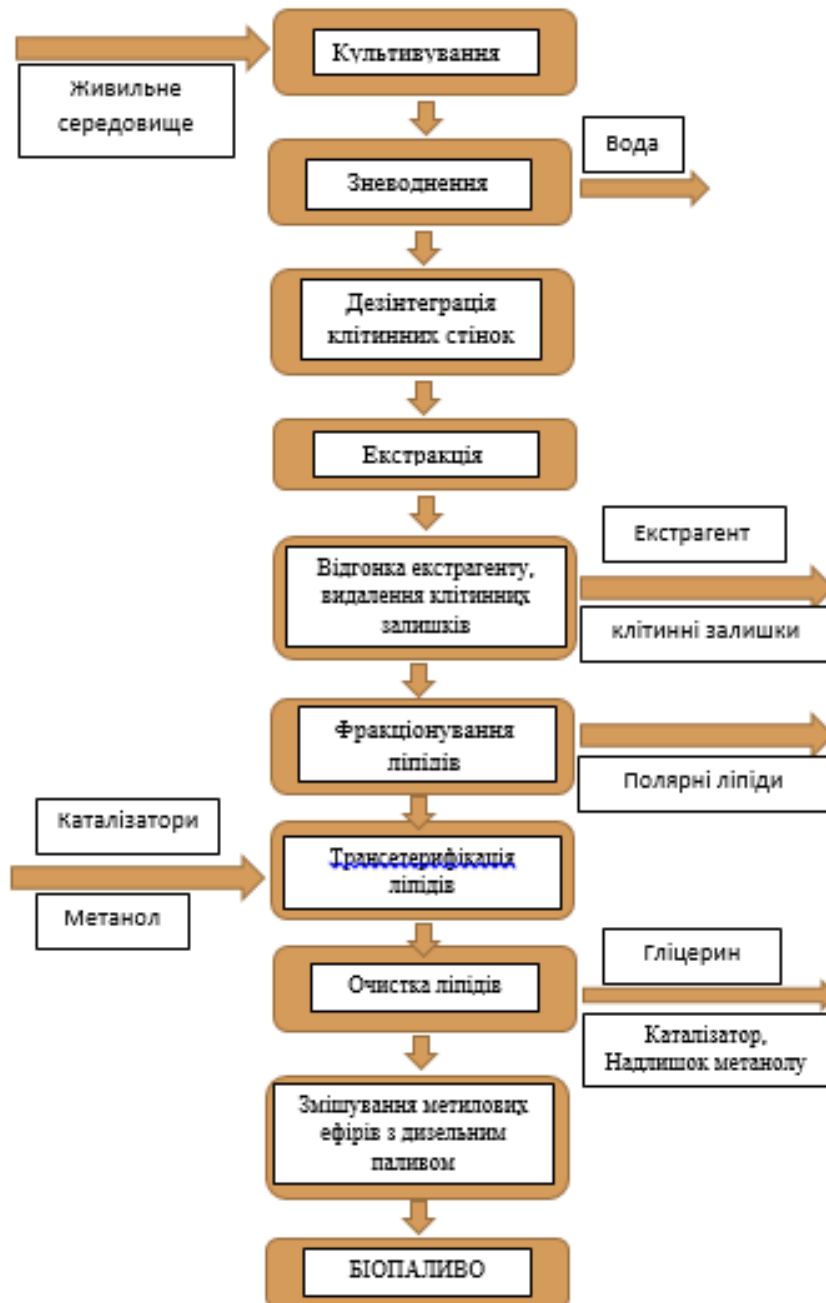


Рис. 4. Блок-схема виробництва біодизеля з олії мікроводоростей [15]

Базовими технологіями виробництва біодизельного палива є: циклічна з використанням лужних каталізаторів (рис. 5); безкаталізаторна циклічна (із застосуванням розчинників, зазвичай, тетрагідрофурану); багатореакторна неперервна (рис. 6).

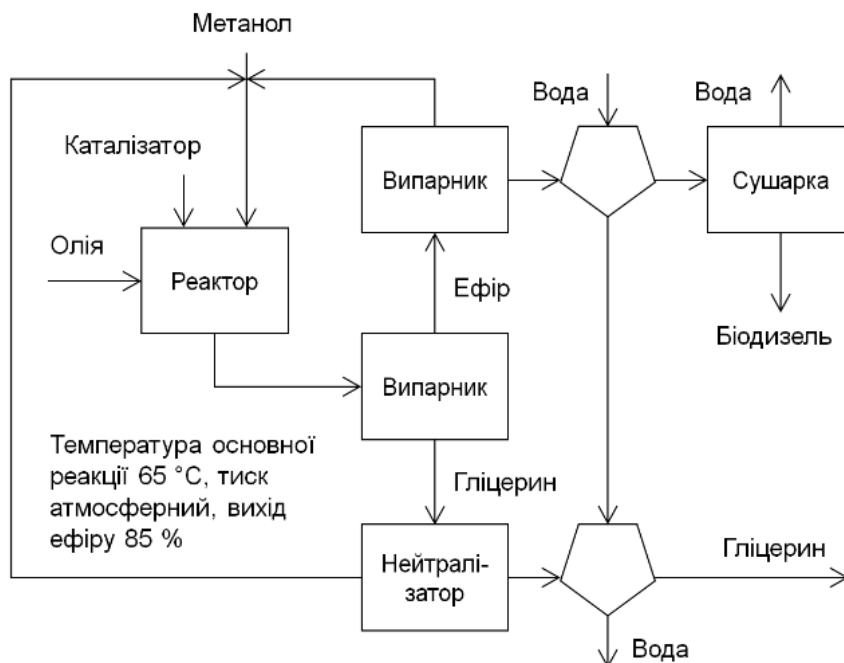


Рис. 5. Циклічна каталітична схема [16]

В основному для реакції переестерифікації рослинних олій використовують гомогенний лужний каталізатор. Найчастіше використовують гідроксиди натрію та калію або їх алкоксиди.

Алкоксиди є дорожчими, але їх використання суттєво зменшує кількість води, що утворюється в результаті реакції [17]. Слід також відзначити, що при звичайних умовах гомогенні основні каталізатори мають хорошу реакційну здатність, однак їх неможливо повторно використовувати та складно виводити з продуктів реакції [18].

В роботі [19] описано проблеми, які виникають у тих випадках, коли при переестерифікації тригліцеридів за допомогою метанолу й етанолу використовують як каталізатори натрієві й калієві сполуки. Так, зокрема, розділення обох фаз після завершення реакції переестерифікації в емульсії, яка утворилася в ході реакції, відбувається настільки повільно, що цей процес є невиправдано затягнутим у часі й вимагає до того ж великих реакційних об'ємів. Авторами [19] було розроблено спосіб із застосуванням гетерогенного каталізу, призначений для переестерифікації жиру і/або олії біологічного походження, у якому використовується

каталізатор зберігає стабільність, а утворювані продукти не забруднені домішками каталітичного матеріалу.

В роботі [20] проведена переестерифікація ріпакової олії холодної витяжки (ДСТУ ISO 5509–2002) абсолютним етанолом (що запобігає присутності додаткової води в реакційній системі) з використанням етаноліату натрію для отримання біодизелю. В результаті проведених досліджень авторами було отримано біодизельне паливо з унікальними характеристиками. Основною відмінністю БДП від ДП є наявність в складі БДП низкомолекулярної фракції моно-, ди-, та триетилатів гліцерину. Це значно підвищують цетанове число $\text{ЦЧ}_{\text{БДП}} = 62$ в порівнянні з $\text{ЦЧ}_{\text{ДП}} = 47$, та змішаних композицій ДП з ріпаковою олією $\text{ЦЧ}_{\text{ДП} \setminus 5\% \text{Ріпаколії}} = 50,5$, та змішаних композицій ДП з БДП, $\text{ЦЧ}_{50\text{ДП}/50\text{БДП}} = 60,1$ [20]. Вихід біодизеля з ріпакової олії при цьому зростає з 85–90% за класичним способом до 95–98%, без 10–15% відходів гліцеринової фракції.

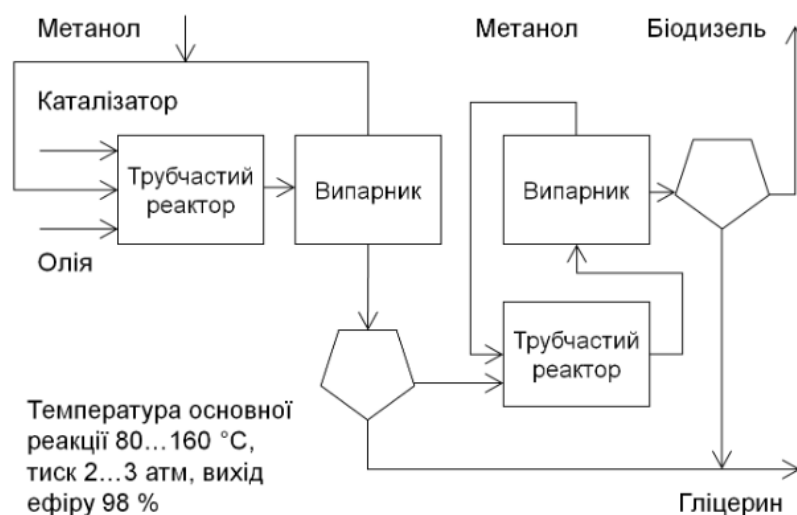


Рис. 6. Багатореакторна неперервна схема [15]

Основні технологічні характеристики та переваги та недоліки розглянутих схем (рис. 5–6) наведено в таблиці 6.

Конструкція реакторів для проведення реакції переестерифікації. Для забезпечення повної гомогенізації речовин використовують реактори зі змішуючим пристроєм.

Залежно від типу змішуючого пристрою ферментери бувають:

- ферментери з пневматичним перемішуючим пристроєм,
- ферментери з механічним перемішуючим пристроєм (рис. 7).

На рисунку 8 наведено номограму областей застосування окремих типів мішалок для рідин з різними в'язкостями.

Таблиця 6

Базові технології одержання біодизельного палива [16]

Технології	Характеристика	Переваги	Недоліки
Циклічна каталітична схема	Температура реакції 65° С при атмосферному тиску; тривалість реакції від 20 хв до 2 год. Кількість каталізатору 1,5% від маси олії; вихід ефіру ~85% від загальної маси біодизеля	Простота технологічного процесу; невисока вартість технологічних ліній; сировини невисокої якості	Невисокий вихід ефіру. Тривалість реакції
Безкаталізаторна циклічна	Температура реакції 65° С тиск атмосферний; тривалість реакції 5–10 хв розчинник – тетрагідрофуран; вихід ефіру ~98% від загальної маси біодизеля	Високий вихід ефіру; Невисока температура та велика швидкість реакції. Чистота продуктів	Потреба у дорогих та агресивних розчинниках. Необхідність додаткового обладнання
Багато-реакторна неперервна схема	Температура реакції 80–160° С тиск 2–3 атм.; тривалість реакції 6–10 хв; кількість каталізатора до 1% від маси олії; вихід ефіру ~98% від загальної маси біодизеля	Високий вихід ефіру; процес неперервний; швидкість реакції	Складність технологічного процесу; висока вартість технол. обладнання; чутливість до якості сировини

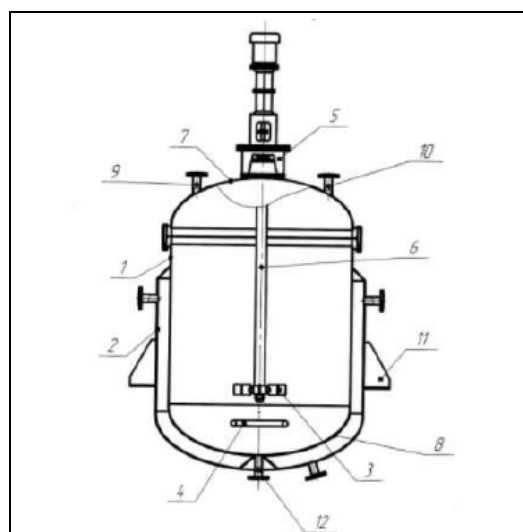


Рис. 7. Конструкція реактора з механічним перемішувачем: 1 – корпус; 2 – сорочка; 3 – мішалка; 4 – барботер; 5 – двигун з приводом; 6 – вал мішалки; 7 – кришка; 8 – дно; 9, 10 – штуцери; 11 – опора; 12 – штуцер зливу продукту

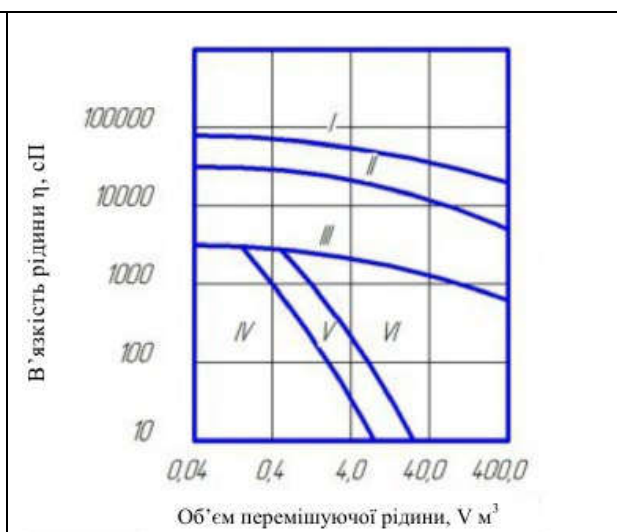


Рис. 8. Номограма областей застосування окремих типів мішалок:
I – лопатева модифікована;
II – лопатева; III – турбінна;
IV – пропелерна, 420 об/хв;
V – пропелерна, 1150 об/хв;
VI – пропелерна, 1750 об/хв



Одним із способів прискорення реакції переетерифікації є використання ультразвукових хвиль, які виникають у процесі ультразвукової кавітації (рис. 9, 10), при якому відбувається утворення, зростання та вибухове руйнування бульбашок у рідині [21]. Кавітаційний колапс спричиняє інтенсивне місцеве нагрівання (~5000 K), високий тиск (~1000 атм) і величезні швидкості нагрівання та охолодження (>109 K/сек) і струменями рідини (~400 км/год) [22]. В результаті відбувається посилення процесів масообміну з одночасним розпадом крапель олії та дисперсії каталізатора (рис. 11). Ультразвукові реактори покращують кінетику хімічних реакцій процесу перетворення біодизелю (рис. 12). Це призводить до прискорення реакції переетерифікації, а також економить надлишок метанолу та каталізатора.

Зокрема, ультразвукові біодизельні проточні реактори, розроблені фірмою Hielscher Ultrasonics (рис. 13) встановлюються для змішування двох потоків живлення: олії та метанолу (з каталізатором). Для цього через ультразвуковий вбудований реактор прокачується сира попередня суміш, де ультразвукова кавітація змішує і емульгує обидва реагенти протягом 2–10 секунд. Коли суміш виходить з проточного реактора, гліцерин відокремлюється під дією сили тяжіння менш ніж за 60 хвилин.

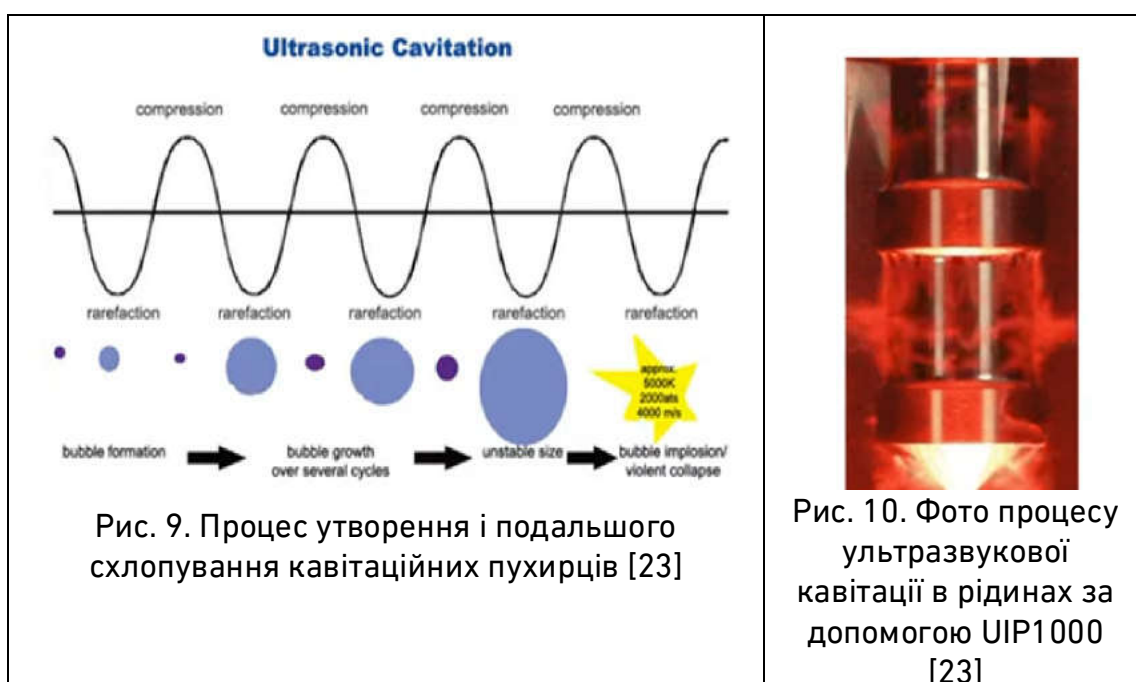


Рис. 9. Процес утворення і подальшого схлопування кавітаційних пухирців [23]

Рис. 10. Фото процесу ультразвукової кавітації в рідинах за допомогою UIP1000 [23]

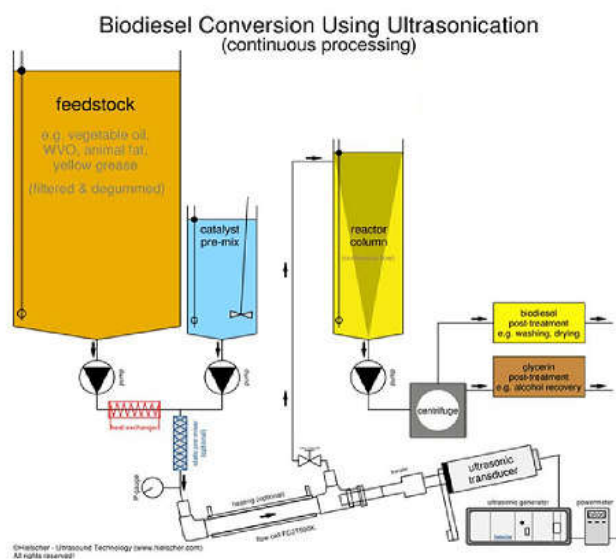
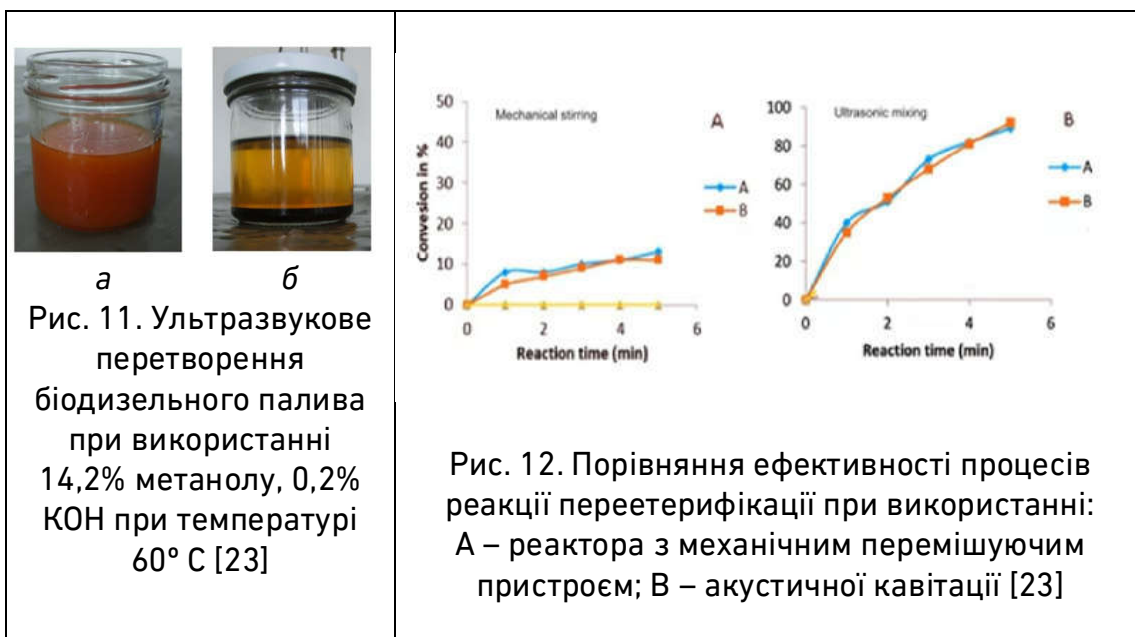


Рис. 13. Технологічна схема виробництва біодизелю з використанням ультразвукового проточного реактора фірми Hielscher Ultrasonics [23]

До переваг використання ультразвукового апарату зондового типу для синтезу біодизеля належать:

прискорення реакції переестерифікації, скорочення її тривалості та підвищення виходу біодизелю;

покращення дисперсності каталізатора й однорідності реакційної суміші, що забезпечує вищий вихід і кращу якість біодизелю;



можливість використання сировини найнижчої якості (відходів кулінарної олії) і перетворенням на високоякісне біодизельне паливо;

зменшення споживання енергії, необхідної для змішування та нагрівання реакційної суміші, а також кількість необхідного каталізатора, що призводить до більш сталого та економічно ефективного процесу; можливість легкого інтегрування в існуючі виробничі процеси.

Висновки. 1. Виснаження вичерпних природних енергетичних ресурсів призводить до необхідності пошуку альтернативних відновлювальних джерел енергетики. 2. Одним із перспективних напрямів є розробка технологій виробництва біодизелю, що виробляється в результаті реакції трансестерифікації між спиртом та жирними кислотами із тваринного жиру або рослинної олії у присутності каталізатора. 3. Сировиною для виробництва біодизелю можуть виступати: олії, вироблені з відходів зерна сої, ріпаку, соняшнику, а також мікроводоростей. 4. Базовими технологіями виробництва біодизельного палива є: циклічна з використанням лужних каталізаторів; безкаталізаторна циклічна; багатореакторна неперервна. 5. Для реакції переестерифікації рослинних олій використовують гомогенні лужні каталізатори. 6. Для прискорення реакцій переестерифікації можливе використання ультразвукових хвиль. 7. Використання ультразвукових біодизельних проточних реакторів дозволяє перетворювати на високоякісне біодизельне паливо сировину низької якості при одночасному зменшенні споживання енергії, кількості каталізатора, що призводить до більш сталого та економічно ефективного процесу.

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch/>. (дата звернення: 25.02.2025). 2. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 25.02.2025). 3. Міністерство енергетики України : офіційний сайт. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/mi>. (дата звернення: 25.02.2025). 4. Tiseo I. 2020. Biofuels – production worldwide 2000–2019. URL: <https://www.statista.com/statistics/274163/global-biofuel-production-in-oil-equivalent> (дата звернення: 25.02.2025). 5. Sahoo P. K., Das L. M. Process optimization for biodiesel production from Jatropha, Karanja and Polanga oils. *Fuel*. 2009. Vol. 88 (9). P. 1588–1595. 6. Li X., Xu H., Wu Q. Large-scale Biodiesel Production from Microalga *Chlorella protothecoides* through heterotrophic Cultivation in Bioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*. 2007. Vol. 98, No. 4. Pp. 764–771. 7. Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007. Vol. 25. P. 294–

306. **8.** Knothe G., Van G. J., Krahl J. The Biodiesel Handbook. *Champaign*. Illinois : AOCS Press, 2005. **9.** Biodiesel from aquatic species, Project Report: FY 1993 / L. M. Brown, S. Sprague, E. E. Jarvis, T. G. Dunahay, P. G. Roessler, K. G. Zeiler. *National Renewable Energy Laboratory*. Colorado, 1994. **10.** Голуб Г., Кухарець С. Основи виробництва дизельного біопалива. Програма управління знаннями для розвитку сталості біоенергетики. 2024. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2024/06/Lecture-3-on-bioenergy.pdf>. (дата звернення: 25.02.2025). **11.** Um B. H., Kim Y. S. Review: a chance for Korea to advance algal-biodiesel technology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2009. Vol. 15(1). P. 1–7. **12.** Mata T. M., Martins A. A., Caetano N. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14(1). P. 217–232. **13.** Demirbas A., Demirbas M. F. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy conversion and management*. 2011. Vol. 52(1). P. 163–170. **14.** Nascimento I. A., Marques S. S., Cabanelas I. T. Screening microalgae strains for biodiesel production: lipid productivity and estimation of fuel quality based on fatty acids profiles as selective criteria. *Bioenergy Research*. 2013. Vol. 6. P. 1–13. **15.** Тюлюкіна В. К. Технологія отримання біодизеля з ліпідів мікроводоростей 2021 : дипломний проєкт на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою «Біотехнології» спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 82 с. **16.** Високоєфективні засоби приготування біопалива : монографія / О. Є. Колосов, Г. Л. Рябцев, В. І. Сівецький, Д. Е. Сідоров, С. О. Пристайлов. К. : Січкап, 2010. 152 с. **17.** O. S. Stamenkovic, O. V. Velickovic, V. B. Veljkovic. *Fuel*. 2011. Vol. 90. P. 3141. **18.** G. Vicente, M. Martinez, J. Aracil. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresourse technology*. 2004. Vol. 92. P. 297. **19.** Спосіб переетерифікації жиру і/або олії біологічного походження шляхом алкогалізу та моноєфіри жирних кислот: пат. 66904 Україна: МКИ С 11 С 3/00. № 2001075130; заявл. 19.10.2000; опубл. 15.10.2001 / Петер Зігфрід, Вайднер Екхард, Нойнер Ханс-Петер, Гансвіндт Рут. **20.** Рібун В. С., Курта С. А., Громовий Т. Ю., Хацевич О. М. Удосконалення технології синтезу та властивості біодизельного палива. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2018. № 3. Т. 19. С. 258–269. **21.** Ефективність виробництва біодизеля з використанням ультразвуку / О. Є. Колосов, Г. Л. Рябцев, Д. Е. Сідоров та ін. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Сер. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2010. № 2 (6). С. 63–69. **22.** Suslick K. S. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 4th Ed. J. Wiley & Sons : New York, 1998. Vol. 26. P. 517–541. **23.** URL: https://www.hielscher.com/uk/biodiesel_ultrasonic_mixing_reactors.htm (дата звернення: 25.02.2025).

REFERENCES:

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch/>. (data zvernennia: 25.02.2025). **2.** Pro skhvalennia Enerhetichnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist» : Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18.08.2017 r. № 605-r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text> (data zvernennia: 25.02.2025). **3.** *Ministerstvo enerhetyky Ukrainy* : ofitsiyni sait. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/mi>. (data zvernennia: 25.02.2025). **4.** Tiseo I. 2020. Biofuels –



production worldwide 2000–2019. URL: <https://www.statista.com/statistics/274163/global-biofuel-production-in-oil-equivalent> (дата звернення: 25.02.2025). **5.** Sahoo P. K., Das L. M. Process optimization for biodiesel production from Jatropha, Karanja and Polanga oils. *Fuel*. 2009. Vol. 88 (9). P. 1588–1595. **6.** Li X., Xu H., Wu Q. Large-scale Biodiesel Production from Microalga *Chlorella protothecoides* through heterotrophic Cultivation in Bioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*. 2007. Vol. 98, No. 4. Pp. 764–771. **7.** Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007. Vol. 25. P. 294–306. **8.** Knothe G., Van G. J., Krahl J. The Biodiesel Handbook. *Champaign, Illinois* : AOCS Press, 2005. **9.** Biodiesel from aquatic species, Project Report: FY 1993 / L. M. Brown, S. Sprague, E. E. Jarvis, T. G. Dunahay, P. G. Roessler, K. G. Zeiler. *National Renewable Energy Laboratory*. Colorado, 1994. **10.** Holub H., Kukharets S. Osnovy vyrobnytstva dyzelnoho biopalyva. Prohrama upravlinnia znanniamy dlia rozvytku staloi bioenerhetyky. 2024. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2024/06/Lecture-3-on-bioenergy.pdf>. (дата звернення: 25.02.2025). **11.** Um B. H., Kim Y. S. Review: a chance for Korea to advance algal-biodiesel technology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2009. Vol. 15(1). P. 1–7. **12.** Mata T. M., Martins A. A., Caetano N. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14(1). P. 217–232. **13.** Demirbas A., Demirbas M. F. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy conversion and management*. 2011. Vol. 52(1). P. 163–170. **14.** Nascimento I. A., Marques S. S., Cabanelas I. T. Screening microalgae strains for biodiesel production: lipid productivity and estimation of fuel quality based on fatty acids profiles as selective criteria. *Bioenergy Research*. 2013. Vol. 6. P. 1–13. **15.** Tiuliukina V. K. Tekhnolohiia otrymannia biodyzelia z lipidiv mikrovodorostei 2021 : diplomnyi proiekt na zdobuttia stupenia bakalavra za osvithno-profesiinoiu prohramoiu «Biotekhnolohii» spetsialnosti 162 «Biotekhnolohii ta bioinzhenierii» / Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho». 82 s. **16.** Vysokoeffektyvni zasoby pryhotuvannia biopalyva : monohrafiia / O. Ye. Kolosov, H. L. Riabtsev, V. I. Sivetskyi, D. E. Sidorov, S. O. Prystailov. K. : Sichkar, 2010. 152 s. **17.** O. S. Stamenkovic, O. V. Velickovic, V. B. Veljkovic. *Fuel*. 2011. Vol. 90. P. 3141. **18.** G. Vicente, M. Martinez, J. Aracil. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresource technology*. 2004. Vol. 92. P. 297. **19.** Sposib pereeteryfikatsii zhyru i/abo olii biolohichnoho pokhodzhennia shliakhom alkoholizu ta monoefiry zhyrnykh kyslot: pat. 66904 Ukraina: MKY C 11 C 3/00. № 2001075130; zaiavl. 19.10.2000; opubl. 15.10.2001 / Peter Zihfryd, Vaidner Ekkhard, Noiner Khans-Peter, Hansvindt Rut. **20.** Ribun V. S., Kurta S. A., Hromovi T. Yu., Khatsevych O. M. Udoskonalennia tekhnolohii syntezy ta vlastyosti biodyzelnoho palyva. *Fizyka i khimiiia tverdoho tila*. 2018. № 3. T. 19. S. 258–269. **21.** Efektyvnist vyrobnytstva biodyzelia z vykorystanniam ultrazvuku / O. Ye. Kolosov, H. L. Riabtsev, D. E. Sidorov ta in. *Visnyk NTUU «KPI». Ser. Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*. 2010. № 2 (6). S. 63–69. **22.** Suslick K. S. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 4th Ed. J. Wiley & Sons : New York, 1998. Vol. 26. P. 517–541. **23.** URL: https://www.hielscher.com/uk/biodiesel_ultrasonic_mixing_reactors.htm (дата звернення: 25.02.2025).

Kvartenko O. M. [1; ORCID ID: 0000-0001-5634-1128],
Doctor of Engineering, Associate Professor

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR BIODIESEL SYNTHESIS (REVIEW)

The depletion of exhaustible natural energy resources leads to the need to search for alternative renewable energy sources. One of the promising areas is the development of technologies for the production of biodiesel, which is produced because of the transesterification reaction between alcohol and fatty acids from animal fat or vegetable oil in the presence of a catalyst. The raw materials for biodiesel production can be: oils produced from waste soybean, rapeseed, sunflower, as well as microalgae. The basic technologies for biodiesel production are cyclic using alkaline catalysts; catalyst-free cyclic; multi-reactor continuous. Current scientific trends in the development of technologies and technical means for the production of biodiesel. The best results in the production of biodiesel are achieved by transesterification of natural oils with alcohols, based on a chemical reaction between triglycerides of natural oils and methanol or ethanol, which is known as alcoholysis. The product obtained because of transesterification is a mixture of ethyl and methyl esters of fatty acids. In the production of modern biodiesel, vegetable oils and methanol are used as reagents. The reaction is carried out in the presence of an alkaline homogeneous catalyst. Homogeneous alkaline catalysts are used for the transesterification reaction of vegetable oils. Ultrasonic waves can be used to accelerate transesterification reactions. The use of ultrasonic biodiesel flow reactors allows converting low-quality feedstock into high-quality biodiesel while simultaneously reducing energy consumption and the amount of catalyst, resulting in a more sustainable and cost-effective process.

Keywords: biodiesel; transesterification; microalgae; biodiesel production technologies; ultrasonic cavitation.

Отримано: 07 травня 2025 року
Прорецензовано: 02 червня 2025 року
Прийнято до друку: 16 червня 2025 року