ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 66.095.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.1

М. С. АНДРЕЄВ
аспірант кафедри хімічних технологій та водоочищення
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0000-0002-3175-9349

Г. С. СТОЛЯРЕНКО
доктор технічних наук,
професор кафедри хімічних технологій та водоочищення
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0000-0001-5287-3733

СИНТЕЗ БІОПАЛИВА НА ОСНОВІ ТРИГЛІЦЕРИДІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТИЛОВОГО ТА ЕТИЛОВОГО СПИРТІВ

Сучасні дослідження в галузі альтернативної енергетики зосереджені на розробці ефективних методів отримання біопалива з відновлюваної сировини. У даній роботі представлено комплексний аналіз процесу переестерифікації тригліцеридів соняшникової, ріпакової та соєвої олій з використанням метилового та етилового спиртів. Метою дослідження є оптимізація технологічних параметрів синтезу для підвищення виходу та якості кінцевого продукту. Процес переестерифікації досліджувався за різних температурних режимів (60–65 °C для метанолу, 75–78 °C для етанолу) при молярному співвідношенні спирт : олія 6:1. В якості каталізаторів застосовувалися гомогенні (KOH, NaOH) *та гетерогенні* (CaO, MgO) *системи з концентрацією 0,8–1,0 % від маси сировини. Тривалість реакції становила 60–90 хв, а її перебіг контролювався методами газової хроматографії та ЯМР-спектроскопії. Експериментально встановлено, що використання метанолу забезпечує вищий вихід біопалива (95–97 %) порівняно з етанолом (90–92 %). Однак етилові естери демонструють кращі низькотемпературні характеристики, що робить їх перспективними для використання в холодному кліматі. Найвищу активність серед каталізаторів показав KOH, тоді як гетерогенні системи потребували більш тривалого часу реакції. На підставі отриманих даних розроблено технологічну схему, яка включає етапи очищення сировини, переестерифікації, сепарації гліцеринової фази та дистиляції естерів. Запропоновано методи рекуперації побічних продуктів, що дозволяє знизити собівартість процесу на 15–20 %. Особливу увагу приділено використанню біоетанолу, що забезпечує створення повністю відновлюваного палива. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої методики для виробництва біопалива другого покоління. Перспективними напрямами подальших досліджень є: оптимізація гетерогенного каталізу, застосування мікробних ліпаз та комплексне використання нехарчової олійної сировини. Впровадження таких технологій сприятиме розвитку низьковуглецевої енергетики та зменшенню залежності транспортного сектору від нафтопродуктів.*

Ключові слова: *біодизель, переестерифікація, альтернативні палива, каталітичні системи, відновлювана енергетика.*

M. S. ANDREIEV
Postgraduate Student at the Department of Chemical Technologies and Water Treatment
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0000-0002-3175-9349

G. S. STOLYARENKO
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Chemical Technologies and Water Treatment
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0000-0001-5287-3733

SYNTHESIS OF BIOFUEL FROM PLANT-BASED TRIGLYCERIDES USING METHANOL AND ETHANOL

Modern research in alternative energy focuses on developing efficient methods for producing biofuel from renewable feedstocks. This study presents a comprehensive analysis of the transesterification process of sunflower, rapeseed, and soybean triglycerides using methanol and ethanol. The research aims to optimize synthesis parameters to enhance yield and product quality. The transesterification process was investigated under varying temperature conditions (60–65 °C for methanol, 75–78 °C for ethanol) at a molar alcohol-to-oil ratio of 6:1. Homogeneous (KOH, NaOH) *and heterogeneous* (CaO, MgO) *catalysts were used at concentrations of 0.8–1.0 % by weight of feedstock. The reaction duration was 60–90 min, monitored using gas chromatography and NMR spectroscopy. Experimental results showed that methanol ensured higher biofuel yield (95–97 %) compared to ethanol (90–92 %). However, ethyl esters exhibited superior low-temperature properties, making them more suitable for cold climates. Among catalysts, KOH demonstrated the highest activity, while heterogeneous systems required longer reaction times. A technological scheme was developed, comprising feedstock purification, transesterification, glycerol phase separation, and ester distillation. Proposed byproduct recovery methods reduced production costs by 15–20 %. Special emphasis was placed on bioethanol use, enabling fully renewable fuel production. The results confirm the efficiency of the proposed method for second-generation biofuel production. Future research directions include optimizing heterogeneous catalysis, applying microbial lipases, and utilizing non-edible oil feedstocks. Implementing such technologies will advance low-carbon energy and reduce the transportation sector's dependence on petroleum products.*

Key words: *biodiesel, transesterification, alternative fuels, catalytic systems, renewable energy.*

Постановка проблеми

Дослідження синтезу біопалива на основі тригліцеридів рослинного походження з використанням метилового та етилового спиртів характеризується високою актуальністю, що обумовлена низкою вагомих факторів:

В умовах нестабільності світових ринків енергоносіїв та обмеженості викопних ресурсів розробка технологій виробництва біопалива з відновлюваної сировини дозволяє країнам зменшити залежність від імпорту нафтопродуктів та диверсифікувати енергетичний баланс.

Використання біопалива суттєво знижує емісію парникових газів та шкідливих речовин у порівнянні з традиційними нафтопродуктами. Біодизель на основі рослинних олій характеризується зниженням викидів CO_2 на 60–80 %, практично повною відсутністю сполук сірки та зменшенням емісії твердих частинок.

Розвиток виробництва біопалива сприяє виконанню міжнародних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів відповідно до Паризької угоди та досягненню цілей вуглецевої нейтральності.

Виробництво біопалива стимулює розвиток аграрного сектору економіки, створюючи додаткові ринки збуту для сільськогосподарської продукції та забезпечуючи повніше використання потенціалу земельних ресурсів.

Порівняльне дослідження використання метанолу та етанолу у синтезі біопалива відкриває перспективи для оптимізації виробничих процесів та покращення характеристик кінцевого продукту.

Розробка вдосконалених методів синтезу біопалива сприяє зниженню собівартості продукції та підвищенню її конкурентоспроможності порівняно з традиційними паливами.

Виробництво біопалива створює можливості для комплексної переробки відходів рослинництва, харчової промисловості та відпрацьованих олій, що відповідає принципам сталого розвитку та безвідходного виробництва.

В умовах поступової електрифікації легкового транспорту, біопаливо залишається одним з ключових рішень для декарбонізації вантажних перевезень, авіації та морського транспорту, де електрифікація технічно ускладнена.

Таким чином, експериментальне дослідження синтезу біопалива на основі рослинних тригліцеридів з різними типами спиртів є актуальним науково-практичним завданням, що сприяє вирішенню комплексу економічних, екологічних та соціальних проблем сучасності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останні роки тема синтезу біопалива з рослинних олій привернула значну увагу наукової спільноти, що відображається у великій кількості публікацій з різних аспектів цієї проблематики.

Команда дослідників *(Yusoff, Mohamad & Xu, Xuebing & Guo, Zheng. (2014))* році вивчала різні каталізатори для переестерифікації соняшникової олії. Їхні результати показали цікаву особливість – хоча гетерогенні каталізатори на основі оксидів лужноземельних металів можна використовувати багаторазово, вони все ж потребують більш суворих умов реакції порівняно з традиційними гомогенними каталізаторами [2].

(Столяренко Г. С., Орлов С. П., Фоміна Н. М., Ющенко С. Л. (2010)) глибоко дослідили, як різні умови реакції впливають на якість та вихід біодизеля. Вони з'ясували, що для метанолу найкраще працює температура 58–65 °C, а для етанолу – 75–80 °C. Також вони зробили практичне спостереження – якщо додати занадто багато каталізатора (понад 1,2 % мас.), утворюється емульсія, що суттєво ускладнює подальше розділення продуктів [1].

(Gotovuša, Jelena & Faraguna, Mia & Huzjak, Ivana & Zadravec, Paula & Zadravec, Martina & Vuković, Fabio. (2024)) розробили математичну модель, яка допомагає краще зрозуміти кінетику реакції з різними спиртами.

Їхня робота пояснює, чому реакція з етанолом відбувається на 15–20 % повільніше, ніж з метанолом – все через різницю в полярності та реакційній здатності цих спиртів [3].

Дослідження *(Isler, Asli & Karaosmanoğlu, Filiz. (2023))* показало, що можна значно прискорити процес синтезу біопалива, використовуючи ультразвукову або мікрохвильову обробку. Такий підхід не тільки скорочує час реакції майже на третину, але й допомагає заощадити енергію – що особливо важливо для промислового виробництва [4].

Вчені *(Ragupathy, Hariprasath & Venkatanagaraju, Erumalla. (2022))* запропонували нову технологічну схему з використанням проточних реакторів. Їхня інновація полягає в удосконаленій системі розділення та очищення продуктів, яка значно зменшує кількість стічних вод і енергетичні витрати [5].

Цікаву альтернативу запропонували *(Bacha, Abir & Alonazi, Mona & Alharbi, Mona & Horchani, Habib & Abdelmalek, Imen. (2022))* – вони розробили метод отримання біодизеля з використанням надкритичного метанолу без каталізаторів. Цей підхід елегантно вирішує проблему видалення каталізатора після реакції, але вимагає спеціального обладнання для роботи при високому тиску [8].

(Bimestre TA, Júnior JAM, Tuna CE, Botura CA, Canettieri E(2020)) зосередився на «зеленому» підході до синтезу біопалива, використовуючи ферментативні каталізатори на основі іммобілізованих ліпаз. Їхній метод дозволяє проводити реакцію при значно нижчих температурах (30–40 °C) і забезпечує високу селективність, хоча вартість таких каталізаторів залишається викликом для широкого впровадження [11].

Як бачимо, останні дослідження охоплюють широкий спектр питань – від пошуку оптимальних умов реакції до розробки нових каталізаторів, від удосконалення методів очищення продуктів до порівняння властивостей різних естерів. Ці різноманітні підходи відображають прагнення наукової спільноти створити більш ефективні, екологічні та економічно вигідні технології виробництва біопалива з рослинних олій.

Формулювання мети дослідження

Дослідження націлене на з'ясування, як найефективніше синтезувати біопаливо з рослинних олій, порівнюючи процеси з використанням метилового та етилового спиртів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Світ зіткнувся з двома серйозними викликами – нестачею енергоресурсів та погіршенням стану довкілля через надмірне використання викопного палива. На цьому тлі біопаливо з рослинної сировини стає не просто альтернативою, а справжнім рятівним колом для нашої енергетики. Особливо перспективним залишається процес переестерифікації – перетворення рослинних олій за допомогою спиртів у біодизель, який може замінити звичайне дизпаливо. І тут багато залежить від вибору спирту – він визначає не лише якість кінцевого продукту, але й наскільки вигідним та екологічним буде весь процес виробництва.

Метиловий спирт давно закріпився у виробництві біодизеля – він доступний, недорогий і добре вступає в реакцію. Але в нього є суттєві недоліки: він токсичний і зазвичай виробляється з невідновлюваних ресурсів, що частково нівелює екологічність біопалива. Етиловий спирт пропонує цікаву альтернативу – його можна повністю отримати з рослинної сировини шляхом ферментації, він менш шкідливий для здоров'я, а паливо на його основі краще працює при низьких температурах. Проте використання етанолу створює свої виклики – він повільніше реагує, складніше відділяється від води і коштує дорожче.

Наше експериментальне порівняння обох спиртів у різних умовах дозволяє знайти золоту середину – визначити, коли який спирт ефективніший і як налаштувати процес для отримання найкращих результатів. Ми ретельно проаналізували якість отриманого біопалива, перевірили його відповідність міжнародним стандартам та оцінили екологічний вплив. Такі дослідження – не просто теорія, вони мають прямий вплив на розвиток вітчизняного виробництва біопалива і допомагають нам зробити крок до енергетичної незалежності та чистішого довкілля.

Було виконано п'ять серій синтезу біодизелю із застосуванням етилового спирту, ріпакової та соняшникової олій. Для всіх дослідів спирт додавали з надлишком у 50 % відносно стехіометричної кількості.

Синтез проводили відповідно до стандартної технології: температура процесу становила 60 °C, а тривалість реакції – 60 хвилин. Кількісні співвідношення реагентів, використаних у процесі, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункова кількість компонентів взятих для синтезу

Показник	Ріпакова олія	Соняшникова олія
Маса олії, г	100	100
Маса спирту, г	19,31	21,35
Маса каталізатору (КОН), г	2	2

У ході експериментів визначали об'єм біодизельної та гліцеринової фракцій, а також їхню густину. На основі отриманих даних розраховували практичну масу біодизелю та гліцерину, після чого обчислювали вихід біодизельної фракції відносно теоретичного значення [13, с. 428].

Результати досліджень і відповідних розрахунків для ріпакової олії наведено у таблиці 2, а для соняшникової олії – у таблиці 3 (при надлишку етилового спирту 50 %).

Таблиця 2

Експериментальні дані синтезу метилових естерів з ріпакової олії

№	Назва отриманої речовини	Об'єм, см³	Густина, г/см³	Маса практична, г	Маса теоретична, г	Вихід фракції від теоретичного, %
1	Біодизель (ефірна фракція)	113	0,875	98,86	105,19	93,98
2	Гліцеринова фракція	16,35	1,251	20,45	–	–

Таблиця 3

Експериментальні дані щодо синтезу метилових естерів із соняшникової олії

№	Назва отриманої речовини	Об'єм, см³	Густина, г/см³	Маса практична, г	Маса теоретична, г	Вихід фракції від теоретичного, %
1	Біодизель (ефірна фракція)	113	0,875	98,86	105,19	93,98
2	Гліцеринова фракція	16,35	1,251	20,45	–	–

Дослідження оптимальних температурних умов для синтезу біодизелю на основі етилового спирту показали, що ефективність процесу залежить від температури. Експерименти проводили з використанням ріпакової олії та етанолу, змінюючи температурні параметри. Найкращі результати були досягнуті при надлишку спирту у 50 % та 25 % від теоретично необхідної кількості. Отримані дані представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Дослідження впливу температурних умов на синтез біодизелю з етанолу

Температура, °C	Час до початку відділення гліцерину, хв	Вміст гліцеринової фракції, %	Ефективність процесу
20	80	15,6	Низька швидкість
30	25	15,4	Оптимальний режим
40	20	15,5	Оптимальний режим
50	15	15,8	Зростання побічних ефектів
60	10	16,3	Надмірне утворення гліцерину

Аналіз результатів показав, що підвищення температури прискорює перебіг реакції, але одночасно сприяє збільшенню кількості гліцеринової фракції, що негативно впливає на вихід цільового продукту [11]. В зв'язку з цим, оптимальним діапазоном температур для процесу є 30–40 °C, оскільки саме за цих умов досягається баланс між швидкістю реакції та максимальним виходом біодизелю.

Експериментальні дані з таблиці 4 були візуалізовані у вигляді двох графіків:

На рисунку 1 представлена динаміка часу появи гліцеринової фази за різних температур при застосуванні етанолу [6, с. 444].

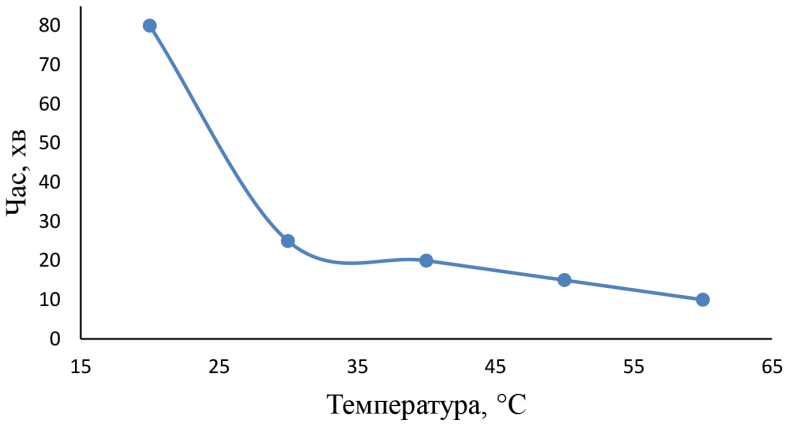

Рис. 1. Залежність часу відділення гліцеринової фази від температури процесу при синтезі біодизелю з етанолу

Рисунок 2 відображає кореляцію між температурними умовами та кількістю гліцерину, що утворюється при використанні метанолу.

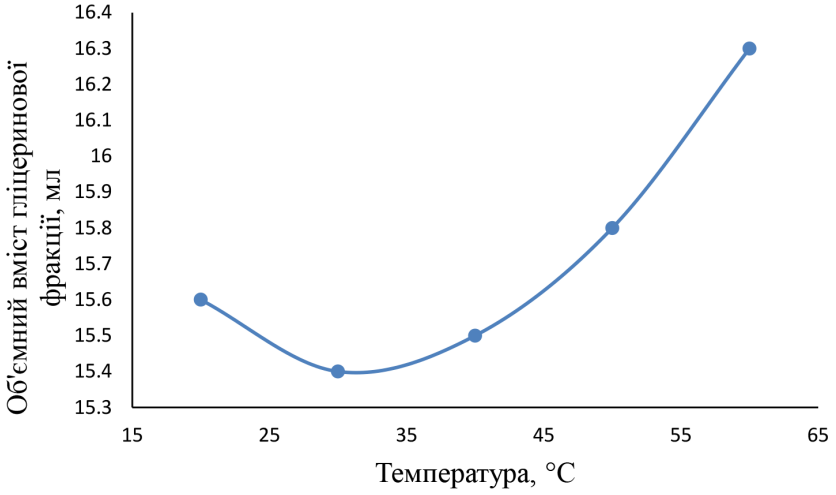

Рис. 2. Залежність об'ємного вмісту гліцеринової фази від температури синтезу біодизелю з етанолу

Дослідження підтвердили, що використання етилового спирту для синтезу біодизелю є таким же ефективним, як і застосування метанолу. Оптимальна кількість етанолу становить 50–55 % від стехіометричної кількості, що більше, ніж потрібно для метанолу (20–25 %) [10, с. 99]. Такі умови забезпечують гарне відділення гліцеринової фракції та стабільність процесу.

Головним показником цінності проведених досліджень є якість отриманого продукту – біодизелю отриманого із етилового спирту. У таблиці 5 наведені результати порівняльного аналізу головних показників отриманих нами продуктів, та їх порівняння з європейськими нормами згідно DINE 51606, які отримані у сертифікованій лабораторії Українського науково-дослідного інституту нафтопереробної промисловості "МАСМА" (м. Київ) [7, с. 14].

Таблиця 5

Порівняльний аналіз якості метилових та етилових естерів згідно зі стандартом DIN EN 51606

№	Показник якості	Норма DIN EN 51606	Метиловий естер	Етиловий естер
1	Густина при 20 °C, г/см³	0,875	0,885	0,8824
2	Кінематична в'язкість при 40 °C, мм²/с	3,5–5,0	5,5	6,9
3	Кінематична в'язкість при 20 °C, мм²/с	3,5–5,0	9,01	10,36
4	Температура спалаху, °C	≥110	124	121
5	Цетанове число	≥49	49	49
6	Вміст метанолу, %	≤0,3	0,08	–
7	Вміст етанолу, %	≤0,3	–	0,1
8	Вміст метилових естерів, %	≥96,5	97,6	–
9	Вміст етилових естерів, %	≥96,5	–	96,3
10	Вміст монолгіцеридів, %	≤0,8	≤0,8	0,7
11	Вміст дигліцеридів, %	≤0,4	≤0,4	0,1
12	Вміст тригліцеридів, %	≤0,4	≤0,4	0,2
13	Вміст вільного гліцерину, %	≤0,02	≤0,02	0,02
14	Вміст загального гліцерину, %	≤0,25	≤0,25	0,24

Експерименти проводили з використанням 500 мл соєвої олії (очищеної та неочищеної), що дозволило отримати 85 см³ та 138 см³ гліцеринової фракції відповідно. Для нейтралізації застосовували 80 % спиртовий розчин сірчаної кислоти, який додавали краплями при інтенсивному перемішуванні. Після обробки суміш розділялася на дві фази: верхню органічну (33 см³) та нижню водно-гліцеринову (56 см³), що підтвердило ефективність методу [9].

Очищення та вихід гліцерину. Технологія передбачала подальше відокремлення кристалічного сульфату калію та перегонку летких компонентів при 160 °C. В результаті отримано 44 г технічного гліцерину з теоретично можливим максимумом 50 г. Ці дані свідчать про високу ефективність процесу та можливість його масштабування для промислового виробництва біодизелю з етанолу.

Після нейтралізації спостерігалося утворення щільної емульсії, яка не піддавалася фільтрації. Це пов'язано з високим вмістом моногліцеридів та низькою концентрацією чистого гліцерину, що свідчить про недостатній ступінь переетерифікації (65–70 %) через використання неочищеної олії.

Утворення емульсії ускладнює поділ фаз і знижує вихід корисного продукту на 15–20 %. Для запобігання такому ефекту необхідно застосовувати очищену сировину та оптимізувати умови переетерифікації, щоб забезпечити повнішу конверсію тригліцеридів.

Висновки та перспективи подальших досліджень у даному напрямі

Експериментальні дослідження довели, що процес переетерифікації з етанолом досягає максимальної ефективності при температурі 30–40 °С. Даний діапазон забезпечує оптимальний баланс між швидкістю реакції та якістю кінцевого продукту. При цьому необхідний надлишок етилового спирту становить 50–55 %, що на 25–30 % більше порівняно з метанолом.

Отримані біодизельні палива на основі обох спиртів повністю відповідають вимогам європейського стандарту DIN EN 51606. Етилові естери демонструють дещо кращі низькотемпературні властивості та меншу токсичність, проте вимагають більш ретельного контролю вмісту залишкового спирту.

Використання неочищеної олії призводить до значного зниження ефективності процесу. Як показали досліди, це викликає утворення щільних емульсій, що ускладнює поділ фаз та зменшує вихід гліцерину на 15–20 %. Оптимальні результати досягаються лише при застосуванні очищеної олії.

Результати досліджень підтверджують можливість промислового використання етанолу для виробництва біодизелю. Для масштабування процесу рекомендовано дотримуватись встановлених температурних режимів, контролювати якість сировини та оптимізувати кількість каталізатора. Це дозволить отримувати якісне паливо з мінімальними витратами.

Список використаної літератури

1. Столяренко Г. С., Орлов С. П., Фоміна Н. М., Ющенко С. Л. Проблеми виробництва біодизелю в Україні / Збалансований (сталий) розвиток України – пріоритет національної політики // Матеріали всеукраїнської наукової екологічної конференціїю К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2010. С. 351–355.

2. Yusoff, Mohamad & Xu, Xuebing & Guo, Zheng. (2014). Comparison of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters as Biodiesel Base Stock: a Review on Processing and Production Requirements. Journal of the American Oil Chemists' Society. 91. 10.1007/s11746-014-2443-0

3. Gotovuša, Mia & Huzjak, Paula & Zadravec, Ivana & Zadravec, Martina & Vuković, Jelena & Faraguna, Fabio. (2024). Biodiesel from Higher Alcohols for Removal of Crude Oil Spills from Coastal Sediments. Sustainability. 16. 8574. 10.3390/su16198574

4. Isler, Asli & Karaosmanoğlu, Filiz. (2023). Fatty Acid Ethyl Esters Obtained From Safflower Oil: A Fully Renewable Biofuel. Journal of Energy Resources Technology. 145. 1-38. 10.1115/1.4062870.

5. Ragupathy, Hariprasath & Venkatanagaraju, Erumalla. (2022). Effect of Ultrasonication in Lipid Extraction and Production of Biodiesel from Groundnut Shells. Ecology, Environment and Conservation. 28. 535-539. 10.53550/EEC.2022.v28i01.081

6. Ющенко С. Л., Столяренко Г. С. Виробництво етилових естерів жирних кислот як біодизеля – приклад переходу до збалансованого природокористування // Ситник К. М., Білявський Г. О., Вадзюк С. Н., Разметаєв С. В., Тимочко Т. В. – Збалансований розвиток України – шлях до здоров'я і добробуту нації // Матеріали Українського екологічного конгресу, 21 вересня 2007 р. – К. : Центер екологічної освіти та інформації, 2007. – С. 444.

7. Ющенко С. Л., Столяренко Г. С., Мислюк Є. В. Застосування явища кавітації і кавітаційного реактору для інтенсифікації процесів хімічної технології // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технологічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Сучасні проблеми технології неорганічних речовин» / Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2008. С. 14.

8. Bacha, Abir & Alonazi, Mona & Alharbi, Mona & Horchani, Habib & Abdelmalek, Imen. (2022). Biodiesel Production by Single and Mixed Immobilized Lipases Using Waste Cooking Oil. Molecules. 27. 8736. 10.3390/molecules27248736

9. Badve MP, Alpar T, Pandit AB, Gogate PR, Csoka L (2015) Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. Ultrason Sonochem 22:272–277. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.017

10. Xun Sun, Gaoju Xia, Weibin You, Xiaoqi Jia, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Shan Zhao, Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan, Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 99 2023, 106544, ISSN 1350-4177, https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544

11. Bimestre TA, Júnior JAM, Botura CA, Canettieri E, Tuna CE (2020) Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. Biores Technol 311:123540. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540

12. Calıskan, Y.; Yatmaz, H. C.; Bektas, N. Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Saf. Environ. Prot*. 2017, *111*, 428–438.

13. Ющенко С. Л., Столяренко Г. С., Мислюк Є. В. Застосування явища кавітації і кавітаційного апарату для інтенсифікації процесів хімічної технології // Збірник матеріалів конференції IV Української науково-технічної конференції з технології неорганічних речовин, 14–16 жовтня 2008 р., Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2008.

References

1. Stoliarenko, H. S., Orlov, S. P., Fomina, N. M., & Yushchenko, S. L. (2010). Problemy vyrobnytstva biodyzelju v Ukraini. In *Zbalansovanyj (stalyy) rozvytok Ukrainy – priorytet natsional'noyi polityky: Materialy vseukrayins'koyi naukovoyi ekolohichnoyi konferentsiyi* (pp. 351–355). Kyiv : Tsentr ekolohichnoyi osvity ta informatsiyi. [in Ukrainian].

2. Yusoff, M., Xu, X., & Guo, Z. (2014). Comparison of fatty acid methyl and ethyl esters as biodiesel base stock: A review on processing and production requirements. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 91*, 1–16. https://doi.org/10.1007/s11746-014-2443-0 [in English].

3. Gotovusa, M., Huzjak, P., Zadravec, I., Zadravec, M., Vukovic, J., & Faraguna, F. (2024). Biodiesel from higher alcohols for removal of crude oil spills from coastal sediments. *Sustainability, 16*(19), 8574. https://doi.org/10.3390/su16198574 [in English].

4. Isler, A., & Karaosmanoglu, F. (2023). Fatty acid ethyl esters obtained from safflower oil: A fully renewable biofuel. *Journal of Energy Resources Technology, 145*(1), 1–38. https://doi.org/10.1115/1.4062870 [in English].

5. Ragupathy, H., & Venkatanagaraju, E. (2022). Effect of ultrasonication in lipid extraction and production of biodiesel from groundnut shells. *Ecology, Environment and Conservation, 28*(1), 535–539. https://doi.org/10.53550/EEC.2022.v28i01.081 [in English].

6. Yushchenko, S. L., & Stoliarenko, H. S. (2007). Vyrobnytstvo etylovykh esteriv zhyrnykh kyslot yak biodyzelja – pryklad perekhodu do zbalansovanoho pryrodokorystuvannja. In K. M. Sytnyk, H. O. Biliavskyi, S. N. Vadziuk, S. V. Razmetaiev, & T. V. Tymochko (Eds.), *Zbalansovanyj rozvytok Ukrainy – shliakh do zdorov'ja i dobrobutu natsiyi: Materialy Ukrayins'koho ekolohichnoho konhresu, 21 veresnja 2007 r*. (p. 444). Kyiv : Tsentr ekolohichnoyi osvity ta informatsiyi. [in Ukrainian].

7. Yushchenko, S. L., Stoliarenko, H. S., & Mysliuk, E. V. (2008). Zastosuvannja yavyshcha kavitatsiyi i kavitatsiynoho reaktoru dlya intensyfikatsiyi protsesiv khimichnoyi tekhnolohiyi. *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprodzerzhyns'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu (tekhnichni nauky): Suchasni problemy tekhnolohiyi neorhanichnykh rechovyn*, (special issue), 14. [in Ukrainian].

8. Bacha, A., Alonazi, M., Alharbi, M., Horchani, H., & Abdelmalek, I. (2022). Biodiesel production by single and mixed immobilized lipases using waste cooking oil. *Molecules, 27*(24), 8736. https://doi.org/10.3390/molecules27248736 [in English].

9. Badve, M. P., Alpar, T., Pandit, A. B., Gogate, P. R., & Csoka, L. (2015). Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrasonics Sonochemistry, 22*, 272–277. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.017 [in English].

10 Sun, X., Xia, G., You, W., Jia, X., Manickam, S., Tao, Y., Zhao, S., Yoon, J. Y., & Xuan, X. (2023). Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry, 99*, 106544. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544 [in English].

11. Bimestre, T. A., Júnior, J. A. M., Botura, C. A., Canettieri, E., & Tuna, C. E. (2020). Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. *Bioresource Technology, 311*, 123540. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540 [in English].

12. Caliskan, Y., Yatmaz, H. C., & Bektas, N. (2017). Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Safety and Environmental Protection, 111*, 428–438. [in English].

13. Yushchenko, S. L., Stoliarenko, H. S., & Mysliuk, E. V. (2008). Zastosuvannja yavyshcha kavitatsiyi i kavitatsiynoho aparatu dlya intensyfikatsiyi protsesiv khimichnoyi tekhnolohiyi. In *Materialy IV Ukrayinskoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi z tekhnolohiyi neorhanichnykh rechovyn, 14–16 zhovtnja 2008 r*. (Dniprodyzerzhyns'k : DDTU). [in Ukrainian].