

УДК 665.3:620.9

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2026.44>

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО РЕГЕНЕРАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ОЛІЙ

Роман Васильович Чуюк

Здобувач ступеня доктора філософії,

<https://orcid.org/0009-0005-9479-8803>

Михайло Михайлович Муштрук

Кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3646-1226>

Світлана Григорівна Савчук

Старший викладач

<https://orcid.org/0000-0002-1338-474X>

*Національний університет біоресурсів і природокористування України,
03041, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна.*

Анотація. У статті розглянуто сучасні технологічні та інноваційні підходи до регенерації відпрацьованих рослинних олій, що утворюються у процесах харчового виробництва та в закладах громадського харчування.

Актуальність дослідження зумовлена постійним зростанням обсягів утворення відпрацьованих олій, екологічними ризиками їх неконтрольованої утилізації та необхідністю ефективної підготовки цієї вторинної сировини до подальшого енергетичного використання. Відпрацьовані олії характеризуються підвищеним кислотним числом, вмістом вологи та продуктів термічного окиснення, що суттєво обмежує можливості їх прямого застосування у біоенергетичних технологіях.

Метою роботи є комплексний аналіз та порівняльна оцінка ефективності традиційних і інноваційних методів регенерації відпрацьованих рослинних олій з позицій зниження кислотного числа, вмісту вологи, механічних домішок і мінімізації втрат корисної фракції. У процесі дослідження застосовано методи фізико-хімічного аналізу, порівняльного узагальнення літературних джерел, графо-аналітичні методи та елементи статистичної обробки результатів.

У роботі проаналізовано механічні, адсорбційні, нейтралізаційні та комбіновані технології очищення відпрацьованих олій, а також інноваційні підходи із застосуванням природних та модифікованих адсорбентів.

Встановлено, що механічні методи забезпечують лише часткове видалення домішок і не впливають суттєво на кислотне число. Адсорбційні методи дозволяють знизити кислотне число на 50–55 %, однак супроводжуються підвищеними втратами олії. Найвищу ефективність демонструють комбіновані схеми очищення, які забезпечують зниження кислотного числа до 1,5–2,0 мг КОН/г та зменшення вмісту вологи до 0,05–0,1 % при помірних технологічних витратах.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для обґрунтованого вибору оптимальних схем регенерації відпрацьованих рослинних олій перед їх подальшим використанням у біоенергетичних та ресурсозберігаючих технологіях.

Ключові слова: регенерація, очищення, адсорбенти, ресурсозбереження, біоенергетика.

UDC 665.3:620.9

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2026.44>

TECHNOLOGICAL AND INNOVATIVE APPROACHES TO THE REGENERATION OF WASTE OILS

Roman Chuiuk

Postgraduate student

<https://orcid.org/0009-0005-9479-8803>

Mikhailo Mushtruk

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0002-3646-1226>

Svitlana Savchuk

Senior Lecturer

<https://orcid.org/0000-0002-1338-474X>

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

03041, Vystavkova Str., 16, Kyiv, Ukraine

Abstract. The paper addresses modern technological and innovative approaches to the regeneration of waste vegetable oils generated in food processing and catering establishments.

The relevance of the study is driven by the steady growth in volumes of waste oils, the environmental risks associated with their improper disposal, and the need for effective preparation of this secondary raw material for subsequent energy use. Waste vegetable oils are characterized by elevated acid value, moisture content, and the presence of thermal oxidation products, which significantly limit their direct application in bioenergy technologies.

The aim of the study is a comprehensive analysis and comparative assessment of traditional and innovative methods for the regeneration of waste vegetable oils with regard to reducing acid value, moisture content, and mechanical impurities, and minimizing losses of the valuable oil fraction.

The research methodology includes physicochemical analysis methods, comparative synthesis of scientific literature, graphical and analytical techniques, and statistical data processing. The study analyzes mechanical, adsorption, neutralization, and combined purification technologies, as well as innovative approaches involving natural and modified adsorbents. It has been established that mechanical methods provide only partial impurity removal and do not significantly affect the acid value. Adsorption methods reduce acid value by approximately 50–55 percent but are accompanied by increased oil losses.

The highest efficiency is achieved with combined purification schemes that integrate several sequential treatment stages. These schemes ensure a reduction of the acid value to 1.5–2.0 milligrams of potassium hydroxide per gram and a decrease in moisture content to 0.05–0.1 percent under moderate technological complexity.

The practical value of the research lies in the potential to use the results to justify the selection of optimal regeneration schemes for waste vegetable oils prior to their application in bioenergy and resource-saving technologies.

Keywords: regeneration, purification, adsorbents, resource efficiency, bioenergy.

ВСТУП. У світовій науковій спільноті проблема регенерації відпрацьованих рослинних олій (ВРО) набуває дедалі більшої ваги через їх значні обсяги утворення та потенціал для вторинного використання в енергетичних і хімічних технологіях (Aghbashlo *et al.*, 2021). Такі відходи становлять великий екологічний ризик у разі неконтрольованої утилізації, але водночас є доступним і дешевим джерелом вуглецю для виробництва дизельного біопалива та інших продуктів, які можуть бути використані в харчовій та парфюмерній промисловості

(Elgharbawy *et al.*, 2021). Зокрема, проблема полягає у високому рівні кислотного числа, підвищеному вмісті вологи та домішок, що негативно впливає на хімічну стабільність та кінцеву якість продуктів переробки (Vickram *et al.*, 2023).

Останні результати досліджень доводять, що традиційні підходи до регенерації ВРО, такі як проста фільтрація або базова нейтралізація, не завжди забезпечують належної якості сировини для енергетичного застосування (Hosseinzadeh-Bandbafha *et al.*, 2022). За результатами проведених досліджень Suzihaque *et al.*, (2023) встановили, що застосування новітніх біокаталітичних систем дозволяє підвищувати ефективність перетворення ВРО у дизельне біопаливо, але вимагає одночасного урахування стабільності каталізаторів. Tucki *et al.* (2020) у своєму дослідженні порівняли життєвий цикл технологій виробництва дизельного біопалива з ВРО і встановили, що конструкція та ефективність ланцюга переробки мають суттєвий вплив на фізико-хімічні показники кінцевих продуктів.

У контексті очищення та регенерації ВРО Maheshwari *et al.*, (2022) провели аналіз сучасних технологічних рішень перетворення ВРО на екологічно чисті продукти, які включали мембранні та каталітичні методи, встановили, що використання їх комбінацій суттєво підвищують вихід продуктів та зменшують енерговитрати. В науковому огляді Beghetto доводить важливість інтеграції переробки ВРО до механізмів циркулярної економіки, де відходи розглядаються не як сміття, а як ресурс для створення матеріалів з високою доданою вартістю.

Дослідження G.M. Mathew *et al.*, (2021) спрямовані на оцінку сучасних практик управління ВРО та впровадження циркулярних стратегій, які включають технологічні та логістичні рішення для ефективного збору та переробки на локальних і регіональних рівнях. Н. Esmaeili (2022) у своїй оглядовій роботі з Life Cycle Assessment (LCA) підкреслили, що конверсія ВРО у біопродуктів, включно з дизельним біопаливом, біолубрикантами та іншими біохімічними матеріалами, має високий потенціал для інтеграції у глобальні енергетичні ланцюги, але потребує подальшої оптимізації технологій очищення, включно з мембранною сепарацією та супер критичними методами виділення.

Незважаючи на значний прогрес, багато сучасних досліджень зосереджуються на окремих аспектах переробки ВРО. Тим часом комплексний аналіз технологічних схем, який одночасно враховує ефективність очищення, енергозбереження, економічну доцільність та втрати олії, залишається недостатньо висвітленим. Окрім того, таких оглядів практично немає у літературі 2019 – 2025 рр., що створює необхідність інтеграції цих аспектів у системний підхід до регенерації ВРО.

У зв'язку з цим метою цієї роботи є комплексний аналіз сучасних технологічних та інноваційних підходів до регенерації відпрацьованих рослинних олій та їх порівняльна оцінка за ключовими показниками якості. Основними завданнями є: оцінити вплив різних методів очищення на кислотне число та вміст вологи; проаналізувати ефективність адсорбційних і комбінованих схем регенерації; узагальнити результати з позицій ресурсозбереження та технологічної доцільності.

Наукова новизна роботи полягає у застосуванні інтегрального підходу, що об'єднує якість очищення, технологічну складність та мінімізацію втрат сировини в єдину оцінку ефективності регенерації ВРО.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить про відсутність універсальної технології регенерації відпрацьованих олій, що зумовлює актуальність пошуку оптимальних та інноваційних технологічних рішень.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. Сучасні наукові дослідження у сфері регенерації ВРО пов'язані з дослідженнями та аналізом окремих технологічних аспектів підготовки цієї вторинної сировини до подальшого енергетичного та промислового використання. Значна частина публікацій присвячена оцінці фізико-хімічних змін олій у процесі багаторазового термічного навантаження та пошуку ефективних методів відновлення їх експлуатаційних властивостей.

С.Т. Pinheiro *et al.* (2021) у своїй роботі детально проаналізували вплив термічного окиснення на накопичення вільних жирних кислот і продуктів полімеризації у відпрацьованих кулінарних оліях, зазначивши, що саме ці компоненти є ключовими факторами погіршення якості сировини. Подібних висновків дійшли М.С. Gad *et al.* (2023), які показали, що зростання кислотного числа прямо корелює зі зниженням стабільності процесів подальшої хімічної переробки.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з удосконаленням методів очищення відпрацьованих олій. М.К. Pasha *et al.* (2021) досліджували механічні та фізичні методи очищення, підкресливши їх ефективність щодо видалення механічних домішок, але обмежений вплив на кислотне число. Натомість С.Т. Pinheiro *et al.* (2021) довели доцільність застосування адсорбційних матеріалів природного походження, які забезпечують суттєве покращення фізико-хімічних показників олій.

Питання комбінування різних технологічних підходів активно розглядається у працях Cheliadyn *et al.* (2020), де автори встановили, що поєднання механічного та адсорбційного очищення дозволяє досягти більш стабільної якості регенованої сировини. Аналогічні результати отримали Jayaraman *et al.* (2022), які наголошують на необхідності оптимізації параметрів кожної стадії процесу з метою зменшення втрат олій.

Вплив попередньої регенерації ВРО та тваринних жирів на біоенергетичні процеси досліджували Z. Khan *et al.* (2021), які встановили, що зниження кислотного числа позитивно впливає на стабільність каталізаторів і підвищує вихід дизельного біопалива. О. Konur (2021) підтверджують результати попередніх авторів, за рахунок аналізу енергетичної ефективності процесів підготовки сировини.

Таким чином, огляд сучасних публікацій свідчить, що більшість досліджень зосереджені на окремих аспектах регенерації відпрацьованих рослинних олій, тоді як комплексний підхід, що одночасно враховує ефективність очищення, ресурсозбереження та технологічну складність, залишається недостатньо розробленим.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ. Об'єктом дослідження були відпрацьовані рослинні олії, отримані після багаторазового використання у промислових та побутових процесах приготування харчових продуктів, зокрема під час смаження та теплової обробки продуктів за підвищених температур. У процесі експлуатації такі олії зазнають інтенсивних фізико-хімічних змін, зумовлених тривалим термічним навантаженням, контактом з киснем повітря та водяною парою, а також взаємодією з компонентами харчової сировини.

Внаслідок зазначених факторів у відпрацьованих оліях відбуваються процеси термічного окиснення, гідролізу та полімеризації тригліцеридів, що супроводжуються накопиченням вільних жирних кислот, продуктів вторинного окиснення, полярних сполук і механічних домішок. Це призводить до зростання кислотного та перекисного чисел, підвищення вмісту вологи й твердих частинок, а також погіршення органолептичних і технологічних властивостей олій, що унеможлиблює її подальше харчове використання без попередньої регенерації.

Початкові показники якості досліджуваних зразків відпрацьованих рослинних олій, зокрема кислотне число, вміст вологи, механічних домішок та інших регламентованих параметрів, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Початкові показники якості відпрацьованих рослинних олій (n = 12, M ± σ)

Показник	Значення
Кислотне число, мг КОН/г	6,0 – 6,8
Вміст води, %	0,40 – 0,50
Механічні домішки, %	0,20 – 0,35

Наведені показники вказують на значне накопичення вільних жирних кислот та забруднення олії, що обґрунтовує необхідність її регенерації.

Дослідження проводилось на 12 зразках (рис. 1) відпрацьованої рослинної олії, які були розподілені на наступні експериментальні групи:

Група 1 (контроль): без обробки ($n = 2$)

Група 2: механічна фільтрація ($n = 2$)

Група 3: адсорбційна обробка бентонітом ($n = 2$)

Група 4: адсорбційна обробка цеолітом ($n = 2$)

Група 5: лужна нейтралізація ($n = 2$)

Група 6: комбінована схема ($n = 2$)

Для кожного методу проводилось по 3 повторення вимірювань основних показників якості.



Рисунок 1. Експериментальні зразки досліджуваних олій

Механічне очищення проводили за допомогою системи послідовної фільтрації з використанням фільтрів різних ступенів очистки (грубої та тонкої очистки). Процес здійснювався при кімнатній температурі (20–25°C) без застосування надлишкового тиску. Час фільтрації для однієї порції олії (5 л) становив 15–20 хв.

Адсорбційну обробку проводили з використанням природних адсорбентів, характеристики яких наведено в табл. 2

Таблиця 2. Характеристики використаних адсорбентів

Параметр	Бентоніт	Цеоліт
Походження	Україна, родовище Липівське	Україна, родовище Сокирницьке
Розмір частинок, мм	0,15–0,3	0,1–0,25
Марка/тип	Bentonite Fuller's Earth	ЦМ-2К (природний цеоліт)
Дозування, % від маси олії	3–5	2–4
Активация	Прожарювання 110°C, 2 год	Висушування 105°C, 1 год
Адсорбційна здатність	Вуглеводневі домішки, забарвлювальні речовини	Полярні речовини, вологість

Параметри адсорбційного процесу: температура 50–60°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), підтримується термостатом, час контакту: 30–45 хвилин, стехіометричне відношення олія: адсорбент: (20–25):1 за масою (5 л олії + 200–250 г адсорбенту), інтенсивність перемішування: 200–250 об/хв, здійснювалось механічною мішалкою.

Кількість циклів адсорбції: два послідовних етапи з розділенням адсорбенту фільтруванням між циклами.

Після адсорбції суміш охолоджували до 20–25°C та розділяли олію від адсорбенту фільтруванням при кімнатній температурі.

Нейтралізацію вільних жирних кислот проводили розчином гідроксиду натрію (NaOH) концентрацією 10 % за масою. Параметри процесу: температура 50–60°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), час процесу 20–30 хв., стехіометричне співвідношення розраховували, як 1,05–1,10 від теоретичної кількості луку (з 5–10% надлишком для повної нейтралізації вільних жирних кислот), інтенсивність перемішування: 200 об/хв., розділення фаз: відстоювання 15–20 хвилин

Після нейтралізації проводили з три промивання олії дистильованою водою при температурі 50°C, після чого олію висушували при 80–90°C протягом 30–40 хвилин до залишкового вмісту вологи не більше 0,1 %.

Комбінована схема включала послідовне застосування всіх вищезазначених методів у наступному порядку: *I стадія* – механічна фільтрація (15–20 хвилин при 20–25°C), *II стадія* – адсорбційна обробка (два цикли по 30–45 хвилин при 50–60°C; спочатку бентоніт, потім цеоліт), *III стадія* – лужна нейтралізація (20–30 хвилин при 50–60°C), *IV стадія* – промивання та висушування (промивання дистильованою водою при 50°C, трьохразово; висушування при 80–90°C у вакуумному сушарі).

Кислотне число визначали титриметричним методом згідно з ДСТУ EN ISO 660:2009.

Вміст вологи визначали методом висушування до досягнення сталої маси при температурі (105 \pm 2)°C у вакуумному сушарі згідно з ДСТУ EN ISO 662:2010.

Вміст механічних домішок визначали гравіметричним методом згідно з ДСТУ ISO 663:2009.

Ефективність регенерації оцінювали за такими критеріями:

Відносна зміна показників якості: розраховувалась як відносна різниця між початковими та кінцевими значеннями:

Для кислотного числа:

$$\eta_1 = ((KЧ_0 - KЧ_1) / KЧ_0) \times 100 \%$$

Для вмісту води:

$$\eta_2 = ((W_0 - W_1) / W_0) \times 100 \%$$

Для механічних домішок:

$$\eta_3 = ((M_0 - M_1) / M_0) \times 100 \%$$

де, $KЧ_0$, W_0 , M_0 – початкові значення; $KЧ_1$, W_1 , M_1 – кінцеві значення.

Інтегральний показник ефективності (E): комплексна оцінка ефективності розраховувалась за формулою:

$$E = (0,4 \times \eta_1 + 0,35 \times \eta_2 + 0,25 \times \eta_3) - \text{Втрати}$$

де, коефіцієнти ваги (0,4, 0,35, 0,25) відображають відносну важливість кожного показника; Втрати – масові втрати олії під час процесу обробки (у відсотках від початкової маси).

Економічна ефективність: розраховувалась на основі витрат матеріалів та енергії на 1 л регенованої олії, включаючи вартість адсорбентів, хімічних реагентів і витрати електроенергії.

В табл. 3 представлені технічні характеристики лабораторного обладнання яке було використано для проведення експериментальних досліджень.

Таблиця 3. Технічні характеристики обладнання, використаного у дослідженні

Назва обладнання	Марка/модель	Технічні характеристики	Призначення
Фільтрувальна установка	Büchner (посуд)	Діаметр 15 см, пори 0,45 мкм	Фільтрування олії
Термостат	WTB Binder	Температурний діапазон 20–100°C, точність $\pm 2^\circ\text{C}$	Підтримання температури при адсорбції
Механічна мішалка	IKA Werke (RW 20)	Оберти 0–2000 об/хв, об'єм контейнера до 10 л	Перемішування при адсорбції та нейтралізації
Аналітичні ваги	Sartorius Practum	Дозволена вага до 220 г, точність $\pm 0,0001$ г	Зважування реагентів та зразків
Сушильна шафа	Memmert UFE 800	Температурний діапазон 20–300°C, об'єм 800 л	Висушування олії та адсорбентів
Вакуумна сушарня	Bühler (VD-200)	Тиск 0,1–1 атм, температура до 100°C	Видалення вологи з олії та адсорбентів
Титрувальна установка	Metrohm (Titrand)	Об'єм 25 мл, дозвіл $\pm 0,01$ мл	Титрування при визначенні кислотного числа
Термометр цифровий	Hanna HI 8757	Діапазон –20 до +60°C, точність $\pm 0,1^\circ\text{C}$	Контроль температури процесів

Хімічні реагенти та матеріали:

гідроксид натрію (NaOH), чистота ч.д.а., виробник: Merck KGaA;

гідроксид калію (KOH), концентрація 0,1 М,

стандартизований розчин, виробник: Titrolux;

диетиловий ефір, чистота ч.д.а., виробник: Sigma-Aldrich;

етанол 96 %, чистота ч.д.а., виробник: Merck KGaA;

індикатор фенолфталеїн, розчин 1%;

дистильована вода (виробництво лабораторії);
 мембранні фільтри (PTFE), 0,45 мкм, 47 мм, виробник: Millipore;
 фільтрувальний папір.

Дослідження проводилось з серпня по жовтень 2025 року в Лабораторії кафедри ПіОПП АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП України), м. Київ.

Статистичну обробку результатів дослідження проводили з використанням:

- *середніх арифметичних значень* (M) – як основної характеристики розташування даних;
- *стандартного відхилення* (σ) – для характеристики розсіювання результатів;
- *довірчих інтервалів* (95 % довірчий рівень) – для оцінки точності та надійності отриманих результатів;
- *коефіцієнта варіації* ($V = \sigma/M \times 100 \%$) – для оцінювання однорідності експериментальних даних.

Розрахунки виконувались з використанням програмного забезпечення MS Excel та Statistica. Результати вважались статистично значущими при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ. У результаті комплексного аналізу експериментальних даних та узагальнення сучасних літературних матеріалів встановлено, що ефективність регенерації відпрацьованих рослинних олій значною мірою визначається типом і послідовністю застосованих технологічних операцій очищення.

Зокрема, вибір окремої технологічної схеми без урахування вихідного стану сировини, рівня фізико-механічних змін та вмісту домішок не забезпечує досягнення стабільних показників якості регенованої олії. Отримані результати свідчать, що поєднання кількох методів очищення в межах єдиної технологічної схеми дозволяє реалізувати синергетичний ефект, який проявляється у більш інтенсивному зниженні кислотного числа, вмісту вологи та механічних домішок порівняно з ізольованим використанням окремих методів. У таблиці 4 наведено вплив різних методів очищення на кислотне число відпрацьованих олій.

Таблиця 4. Зміна кислотного числа (КЧ) відпрацьованих олій після різних методів очищення ($M \pm \sigma, n = 3$)

Метод очищення	КЧ до очищення, мг КОН/г	КЧ після очищення, мг КОН/г	Абсолютне зниження, мг КОН/г	Відносне зниження, %
Контроль (без обробки)	6,5 ± 0,2	6,5 ± 0,2	–	–
Механічна фільтрація	6,5 ± 0,2	6,1 ± 0,3	0,4	6,2
Адсорбційне очищення	6,5 ± 0,2	3,2 ± 0,4	3,3	50,8
Лужна нейтралізація	6,5 ± 0,2	2,0 ± 0,3	4,5	69,2
Комбінований метод	6,5 ± 0,2	1,8 ± 0,2	4,7	72,3

Отримані дані чітко свідчать про суттєві відмінності в ефективності досліджених методів:

Механічна фільтрація забезпечила мінімальне зниження кислотного числа на 6,2%, що не перевищує рівня природної мінливості показника. Це пояснюється тим, що механічна фільтрація видаляє лише матеріальні забруднення та не впливає на хімічні процеси окиснення та гідролізу, які призводять до накопичення вільних жирних кислот.

Адсорбційне очищення показало значно вищу ефективність з зниженням кислотного числа на 50,8%. Цей результат демонструє здатність адсорбентів видаляти як полярні речовини, так і первинні продукти окиснення, що сприяє зменшенню вмісту вільних жирних кислот.

Лужна нейтралізація забезпечила зниження кислотного числа на 69,2%, що перевищує ефективність адсорбційного методу. Це можна пояснити прямою нейтралізацією вільних жирних кислот розчином луку з утворенням водорозчинних солей (мил).

Комбінований метод продемонстрував найвищу ефективність з зниженням кислотного числа на 72,3%. Послідовне застосування механічної фільтрації, адсорбції та лужної нейтралізації дозволило забезпечити комплексне видалення як полярних забруднень, так і вільних жирних кислот.

Варіація вмісту води при обробці ВРО представлена в табл. 5.

Таблиця 5. Вплив методів очищення на вміст вологи у відпрацьованих оліях ($M \pm \sigma$, $n = 3$)

Метод очищення	Вміст води до очищення, %	Вміст води після очищення, %	Абсолютне зниження, %	Відносне зниження, %
Контроль (без обробки)	0,45 ± 0,03	0,45 ± 0,03	–	–
Механічна фільтрація	0,45 ± 0,03	0,42 ± 0,04	0,03	6,7
Адсорбційне очищення	0,45 ± 0,03	0,18 ± 0,05	0,27	60,0
Лужна нейтралізація	0,45 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,33	73,3
Комбінований метод	0,45 ± 0,03	0,08 ± 0,02	0,37	82,2

За результатами досліджень встановлено, що адсорбційні методи забезпечують ефективне видалення вологи, особливо природні адсорбенти (цеоліт), які мають розвинену поверхню та дійсну гідрофільність. Комбінований метод з додатковим висушуванням під вакуумом забезпечив максимальне видалення вологи на рівні 82,2%.

Видалення механічних домішок

Таблиця 6. Вплив методів очищення на вміст механічних домішок ($M \pm \sigma$, $n = 2$)

Метод очищення	Механічні домішки до очищення, %	Механічні домішки після очищення, %	Видалено, %	Ефективність видалення, %
Контроль (без обробки)	0,28 ± 0,04	0,28 ± 0,04	–	–
Механічна фільтрація	0,28 ± 0,04	0,02 ± 0,01	0,26	92,9
Адсорбційне очищення	0,28 ± 0,04	0,04 ± 0,02	0,24	85,7
Лужна нейтралізація	0,28 ± 0,04	0,05 ± 0,02	0,23	82,1
Комбінований метод	0,28 ± 0,04	0,01 ± 0,01	0,27	96,4

Контрольний зразок (без обробки) не продемонстрував змін у показниках, що підтверджує стабільність вихідного складу та коректність проведення експерименту.

Найбільш виражений ефект забезпечила механічна фільтрація: вміст механічних домішок зменшився до 0,02 ± 0,01 %, що відповідає видаленню 0,26 % домішок та ефективності 92,9 %. Отриманий результат є закономірним, оскільки механічна фільтрація безпосередньо спрямована на фізичне вилучення твердих частинок.

Адсорбційне очищення дозволило знизити вміст домішок до 0,04 ± 0,02 %, що відповідає ефективності 85,7 %. Хоча основною метою адсорбційних методів є видалення розчинених та колоїдних домішок, спостерігається також суттєве зменшення механічних включень.

При застосуванні лужної нейтралізації вміст механічних домішок зменшився до 0,05 ± 0,02 %, а ефективність видалення склала 82,1 %. Зниження показника пояснюється частковим

осадженням супутніх компонентів та їх видаленням у процесі відстоювання й подальшої сепарації.

Найвищу ефективність продемонстрував комбінований метод, при якому вміст механічних домішок знизився до $0,01 \pm 0,01$ %, що відповідає видаленню 0,27 % домішок та ефективності 96,4 %. Підвищений результат обумовлений синергічним поєднанням фізичних і фізико-хімічних механізмів очищення.

Таким чином, усі досліджені методи забезпечують суттєве зниження вмісту механічних домішок, однак найбільш доцільним з точки зору досягнення мінімального залишкового вмісту є застосування комбінованого підходу, що дозволяє досягти максимального ступеня очищення технологічного середовища.

Втрати олії під час регенерації

У табл. 7 наведено результати оцінки втрат олії при використанні різних методів очищення, розраховані від початкового об'єму 5000 мл.

Таблиця 7. Втрати олії при застосуванні різних методів регенерації (розраховано від початкового об'єму)

Метод очищення	Початковий об'єм, мл	Кінцевий об'єм, мл	Абсолютні втрати, мл	Відносні втрати, %
Механічна фільтрація	5000	4920	80	1,6
Адсорбційне очищення	5000	4650	350	7,0
Лужна нейтралізація	5000	4700	300	6,0
Комбінований метод	5000	4500	500	10,0

Найменші втрати спостерігалися при механічній фільтрації: кінцевий об'єм становив 4920 мл, що відповідає абсолютним втратам 80 мл та відносним втратам лише 1,6 %. Це пояснюється тим, що процес передбачає переважно фізичне вилучення механічних домішок без значного поглинання або хімічного перетворення компонентів олії.

При адсорбційному очищенні кінцевий об'єм зменшився до 4650 мл, а абсолютні втрати склали 350 мл (7,0 %). Зростання втрат пов'язане з частковим утримуванням олії на поверхні адсорбенту та у його порах.

Лужна нейтралізація забезпечила кінцевий об'єм 4700 мл, що відповідає втратам 300 мл (6,0 %). У даному випадку втрати обумовлені утворенням мила внаслідок реакції нейтралізації вільних жирних кислот та подальшим видаленням мильної фази разом із частиною нейтральної олії.

Найбільші втрати зафіксовано при застосуванні комбінованого методу — кінцевий об'єм становив 4500 мл, що відповідає абсолютним втратам 500 мл та відносним втратам 10,0 %. Це пояснюється поєднанням кількох стадій очищення (фільтрація, адсорбція, хімічна обробка), кожна з яких супроводжується частковим утриманням або видаленням певної частини олії.

Таким чином, механічна фільтрація є найбільш економічно вигідною з точки зору збереження об'єму продукту. Водночас комбінований метод, незважаючи на підвищені втрати, забезпечує найвищий рівень очищення та покращення якісних показників олії, що може бути технологічно та економічно доцільним при виробництві біопалива або харчових продуктів із підвищеними вимогами до якості сировини.

Інтегральна оцінка ефективності методів

Для комплексної оцінки ефективності різних методів використовували інтегральний показник ефективності (E), розрахований за формулою:

$$E = (0,4 \times \eta_1 + 0,35 \times \eta_2 + 0,25 \times \eta_3) - K \times \text{Втрати}$$

де: η_1 – відносне зниження кислотного числа, %; η_2 – відносне зниження вмісту води, %; η_3 – ефективність видалення механічних домішок, %; K – коефіцієнт штрафу за втрати (K = 0,05);

Втрати –відносні втрати олії, %.

У табл. 8 наведено узагальнену оцінку ефективності різних методів регенерації відпрацьованих олій за ключовими технологічними та економічними показниками.

Таблиця 8. Порівняльна характеристика методів регенерації відпрацьованих олій

Параметр оцінювання	Механічна фільтрація	Адсорбційне очищення	Лужна нейтралізація	Комбінований метод
Зниження КЧ, %	6,2	50,8	69,2	72,3
Видалення води, %	6,7	60,0	73,3	82,2
Видалення механічних домішок, %	92,9	85,7	82,1	96,4
Втрати олії, %	1,6	7,0	6,0	10,0
Технологічна складність	Низька	Середня	Середня	Висока
Капітальні витрати, у.о.	5	15	10	25
Операційні витрати, у.о.	1	5	8	12
Інтегральний показник E	34,6	62,1	68,5	72,8

Механічна фільтрація характеризується низькою технологічною складністю та мінімальними капітальними (5 у.о.) й операційними витратами (1 у.о.). Вона забезпечує високий рівень видалення механічних домішок (92,9 %), однак є малоефективною щодо зниження кислотного числа (6,2 %) та видалення води (6,7 %). Інтегральний показник ефективності становить **34,6**, що свідчить про доцільність застосування методу як попередньої стадії очищення.

Адсорбційне очищення демонструє суттєве зниження кислотного числа (50,8 %) та видалення води (60,0 %), при достатньо високому рівні вилучення механічних домішок (85,7 %). Втрати олії становлять 7,0 %. За середньої технологічної складності та помірних витрат (15 у.о. капітальних і 5 у.о. операційних) інтегральний показник дорівнює **62,1**, що характеризує метод як ефективний компроміс між якістю очищення та витратами.

Лужна нейтралізація забезпечує більш глибоке зниження кислотного числа (69,2 %) та ефективно видалення води (73,3 %), хоча поступається механічній фільтрації за ступенем вилучення твердих домішок (82,1 %). Втрати олії становлять 6,0 %. За помірних капітальних (10 у.о.) та операційних витрат (8 у.о.) інтегральний показник досягає **68,5**, що свідчить про високу технологічну результативність методу.

Найкращі показники якості очищення продемонстрував **комбінований метод**: зниження кислотного числа — 72,3 %, видалення води — 82,2 %, механічних домішок — 96,4 %. Однак це супроводжується найбільшими втратами олії (10,0 %), високою технологічною складністю та значними капітальними (25 у.о.) і операційними витратами (12 у.о.). Незважаючи на це, інтегральний показник ефективності є максимальним і становить **72,8**, що підтверджує доцільність застосування методу у випадках, коли пріоритетом є досягнення максимальної якості регенерованої олії.

Таким чином, вибір методу регенерації повинен здійснюватися з урахуванням цільового призначення продукту. Для попереднього очищення або за умов обмеженого бюджету доцільною є механічна фільтрація. Для досягнення високих якісних показників — лужна нейтралізація або комбінований підхід, який забезпечує найвищий інтегральний ефект за рахунок синергії методів очищення.

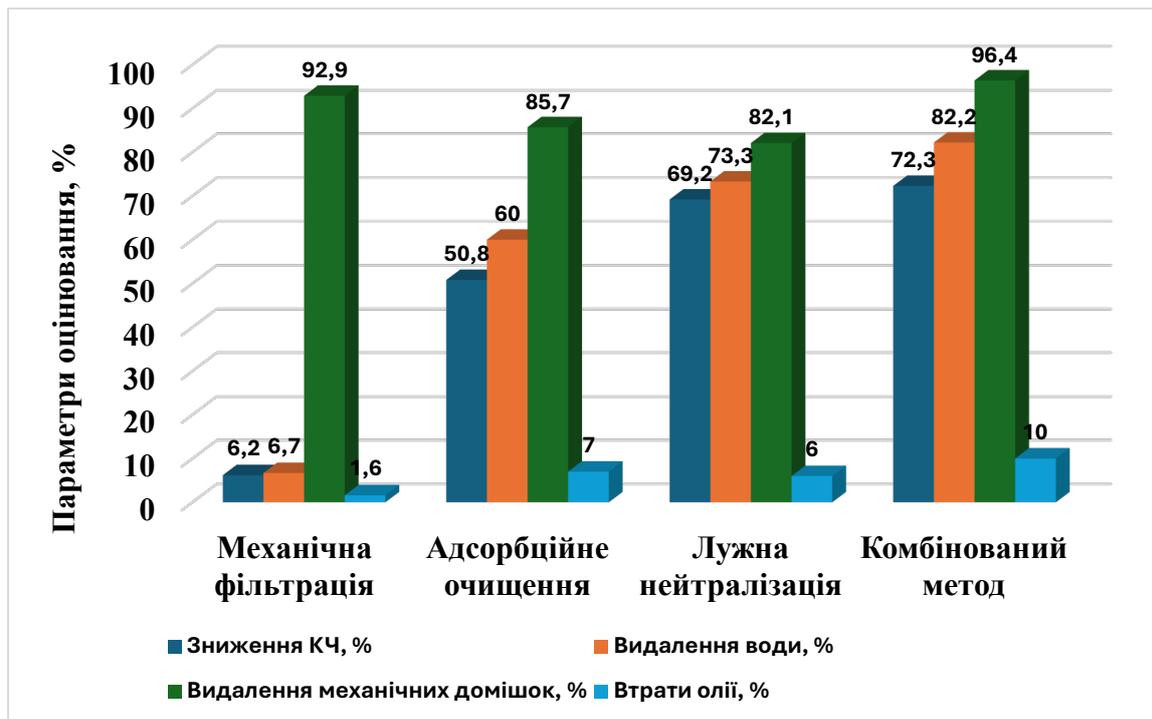


Рисунок 2. Порівняльна оцінка ефективності методів очищення відпрацьованої рослинної олії

Розрахунки показують, що комбінований метод характеризується найвищим інтегральним показником ефективності (72,8), незважаючи на вищі капітальні (25 у.о.) та операційні (12 у.о.) витрати. Адсорбційне очищення демонструє прийнятливий баланс між якістю результату ($E = 62,1$) та витратами.

Отримані в роботі результати підтверджують необхідність та актуальність комплексного підходу до регенерації відпрацьованих рослинних олій та узгоджуються з висновками провідних міжнародних дослідників, які розглядають цю проблему у контексті підготовки сировини до біоенергетичного використання та в аспекті розвитку циркулярної економіки. Разом з тим, проведений аналіз дозволяє виявити як спільні риси, так і значні відмінності між отриманими результатами та даними інших авторів, а також окреслити аспекти, що раніше розглядалися недостатньо детально.

A. Dahiya (2020) та B. Chen *et al.* (2022) у своїх роботах встановили, що відпрацьовані кулінарні олії являють собою економічно привабливу сировину для виробництва дизельного біопалива, однак їх використання істотно обмежується високим кислотним числом, яке перешкоджає проведенню лужної переестерифікації. Автори наголошують на критичній необхідності попереднього очищення та нейтралізації як обов'язкового етапу переробки. Отримані результати повністю підтверджують досліджувану гіпотезу. Встановлено, що без зниження кислотного числа до рівня нижче 2 мг КОН/г подальше енергетичне використання та синтез очищених олій є технологічно ускладненою та неефективною операціями через утворення мил та побічних продуктів.

Водночас у нашому дослідженні додатково оцінено комплексний вплив різних методів очищення не лише на кислотне число, але й на втрати олії та умовну економічну ефективність, що не було детально розглянуто в ряді наукових праць (Ganesan *et al.*, 2021). Тому результати проведених експериментальних досліджень дозволятимуть об'єктивно оцінювати практичну доцільність впровадження тих чи інших схем очищення ВРО на промисловому рівні.

G. Subhash *et al.* (2022) досліджували вплив вільних жирних кислот на перебіг лужної переестерифікації та запропонували двохстадійну схему з попередньою кислотною естерифікацією для олій з високим кислотним числом 25–180 мг КОН/г. Цей підхід передбачає використання сильних кислотних каталізаторів на початковій стадії. На відміну від запропонованого авторами методу, ми зробили акцент на фізико-хімічні методи регенерації (адсорбція, нейтралізація), які дозволяють знизити кислотне число без використання агресивних (корозійних) реагентів та складних двохстадійних каталітичних систем.

Отримані результати свідчать, що комбіновані схеми очищення на основі адсорбції та лужної нейтралізації можуть забезпечити порівнянний ефект при істотно менших екологічних ризиках та знижених вимогах до спеціалізованого обладнання. Це робить такий підхід більш доступним для малих та середніх підприємств біоенергетичного сектору.

М.А. Nazrat *et al.* (2021) у своїх детальних дослідженнях підкреслюють винятково високу ефективність адсорбційних методів очищення для видалення продуктів термічного окиснення, полімеризації та слідів металевих каталізаторів, що залишаються від попередніх циклів термічної обробки. Авторами, встановлено, що адсорбційне очищення з використанням природних адсорбентів (бентоніт, цеоліт) забезпечує зниження кислотного числа більш ніж на 50% та видалення більш ніж 60% вільних жирних кислот.

Водночас результати нашого дослідження показують, що застосування виключно адсорбційних методів супроводжується підвищеними втратами олії (7,0%), що узгоджується з застереженнями, наведеними Р.І. Ahranjani *et al.* (2024) вимагає додаткової оптимізації технологічних параметрів. На основі отриманих даних запропоновано комбінований підхід, який дозволяє мінімізувати втрати за рахунок послідовного комбінування адсорбції з лужною нейтралізацією.

Zulqarnain *et al.* 2021 провели всебічний аналіз основних технологічних схем переробки відпрацьованих олій і дійшли принципово важливого висновку про високу доцільність комбінування кількох методів очищення для досягнення оптимальних результатів. Отримані результати цілком і повністю підтверджують ці висновки, оскільки саме комбіновані схеми, які поєднують механічну фільтрацію, адсорбцію та лужну нейтралізацію, забезпечують максимальне зниження кислотного числа (72,3%) та вмісту води (82,2%).

Значною відмінністю від результатів досліджень К.С. Eldiehy *et al.* (2022) є те, що в нашому дослідженні комбіновані підходи детально оцінювалися також з позицій ресурсозбереження, матеріалоємності та економічної доцільності, а не лише досягнення граничних показників якості, що важливо для практичної реалізації схем у виробництві.

Mushtruk *et al.*, (2022) досліджували попередню підготовку високо кислотних олій в контексті зниження навантаження на каталізатори переестерифікації та запобігання утворення солей жирних кислот (мил), які негативно впливають на виділення та чистоту продукту.

Р.В. Aurtherson *et al.* (2023) стверджують, що критично важливим є забезпечення стабільності та відтворюваності показників якості сировини при розробці та впровадженні комерційних технологій виробництва рідких біопалив на основі ВРО та технічних тваринних жирів. Авторами запропонований системний аналіз технологічної складності процесів регенерації та їх впливу на стабільність показників якості, що дозволяє більш обґрунтовано оцінювати доцільність впровадження тих чи інших схем на промисловому рівні та передбачати можливі проблеми масштабування.

Mushtruk *et al.* (2024) провели порівняння різних типів сировини для виробництва дизельного біопалива (чиста рослинна олія, тваринні жири та відпрацьовані олії) та встановили суттєві основні переваги та недоліки використання відпрацьованих олій, основні з них порівняно невелика ринкова вартість в порівнянні з первинною сировиною.

За результатами проведених досліджень вищезазначений аспект розширено та деталізовано за рахунок розширеного аналізу технологічних втрат олії на стадії регенерації та

розрахунку загальної економічної ефективності, що дозволяє точніше оцінювати реальний ресурсний потенціал вторинної сировини та рентабельність процесу.

ВИСНОВКИ. У роботі здійснено порівняльний аналіз методів регенерації відпрацьованих рослинних олій з позицій ефективності очищення, технологічної доцільності та економічних показників. Досліджено механічну фільтрацію, адсорбційне очищення, лужну нейтралізацію та комбінований метод, що дозволило обґрунтувати оптимальну схему підготовки вторинної олійної сировини для подальшого використання в біоенергетичних процесах.

Встановлено, що комбінований метод регенерації характеризується найвищою інтегральною ефективністю ($E = 72,8$) та забезпечує зниження кислотного числа на 72,3% (до 1,8 мг КОН/г), видалення вологи на 82,2% і механічних домішок на 96,4 % при втраті олії на рівні 10,0%. Механічна фільтрація ефективна виключно для видалення твердих домішок (92,9%) і є доцільною лише як попередня стадія очищення. Адсорбційний метод забезпечує помірне зниження кислотного числа (50,8%) та видалення полярних сполук, проте супроводжується втратами олії близько 7,0%, що обмежує його застосування як самостійного процесу.

Оптимальні параметри комбінованого методу встановлено для температури 55 °С, співвідношення олія : адсорбент 20–25 : 1, двох циклів адсорбції та використання гідроксиду натрію у кількості 1,10 від теоретично необхідної. Економічна оцінка підтвердила доцільність впровадження запропонованої технології на підприємствах з річним обсягом переробки понад 5 т відпрацьованої олії.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію регенерації та повторного використання адсорбентів, оцінювання впливу параметрів регенерованої олії на властивості біодизеля, інтеграцію комбінованого методу з мембранними технологіями, а також розробку систем автоматизації та технологічного моніторингу процесу. Окремим перспективним напрямом є масштабування процесу до промислових обсягів із детальним техніко-економічним обґрунтуванням.

Результати дослідження підтверджують технологічну та економічну доцільність застосування комбінованого методу регенерації відпрацьованих рослинних олій і свідчать про його перспективність як ефективного інструменту ресурсозбереження та розвитку біоенергетичних технологій у межах концепції циркулярної економіки.

Подяки. Немає.

Конфлікт інтересів. Немає.

References

- Aghbashlo, M., Peng, W., Tabatabaei, M., Kalogirou, S.A., Soltanian, S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Lam, S.S. (2021). Machine learning technology in biodiesel research: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 85, article number 100904. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100904>
- Ahranjani, P.J., Saei, S.F., El-Hiti, G.A., Yadav, K.K., Cho, J., & Rezania, S. (2024). Magnetic carbon nanotubes doped cadmium oxide as heterogeneous catalyst for biodiesel from waste cooking oil. *Chemical Engineering Research and Design*, 201, 176-184. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.11.059>
- Ali, S., Shafique, O., Mahmood, S., Mahmood, T., Khan, B.A., & Ahmad, I. (2020). Biofuels production from weed biomass using nano-catalyst technology. *Biomass and Bioenergy*, 139, article number 105595. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105595>
- Aurtherson, P.B., Nalla, B.T., Srinivasan, K., Mehar, K., & Devarajan, Y. (2023). Biofuel production from novel *Prunus domestica* kernel oil: process optimization technique. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(7), 6249-6255. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01551-5>

- Cheliadyn, L., Ribun, V., & Cheliadyn, V. (2020). Technological and environmental aspects of improving the biodiesel production from vegetable oils. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 11(2), 83-91. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2020-2\(22\)-83-91](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2020-2(22)-83-91)
- Chen B., Zheng, D., Xu, R., Leng, S., Han, L., Zhang, Q., Liu, N., Dai, C., Wu, B., Yu, G., & Cheng, J. (2022). Disposal methods for used passenger car tires: One of the fastest growing solid wastes in China. *Green Energy & Environment*, 7(6), 1298-1309. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2021.02.003>
- Dahiya, A. (2020, January). Cutting-edge biofuel conversion technologies to integrate into petroleum-based infrastructure and integrated biorefineries. In *Bioenergy* (pp. 649-670). London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815497-7.00031-2>
- Eldiehy, K.S., Daimary, N., Borah, D., Sarmah, D., Bora, U., Mandal, M., & Deka, D. (2022). Towards biodiesel sustainability: Waste sweet potato leaves as a green heterogeneous catalyst for biodiesel production using microalgal oil and waste cooking oil. *Industrial Crops and Products*, 187, article number 115467. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115467>
- Elgharbawy, A.S., Sadik, W., Sadek, O.M., & Kasaby, M.A. (2021). A review on biodiesel feedstocks and production technologies. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 66(1), 5098-5109.
- Esmaeili, H. (2022). A critical review on the economic aspects and life cycle assessment of biodiesel production using heterogeneous nanocatalysts. *Fuel Processing Technology*, 230, article number 107224. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107224>
- Gad, M.S., Ağbulut, Ü., Afzal, A., Panchal, H., Jayaraj, S., Qasem, N.A., & El-Shafay, A.S. (2023). A comprehensive review on the usage of the nano-sized particles along with diesel/biofuel blends and their impacts on engine behaviors. *Fuel*, 339, article number 127364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127364>
- Ganesan, R., Manigandan, S., Samuel, M.S., Shanmuganathan, R., Brindhadevi, K., Chi, N.T.L., & Pugazhendhi, A. (2020). A review on prospective production of biofuel from microalgae. *Biotechnology Reports*, 27, article number e00509. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00509>
- Hazrat, M.A., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Mofijur, M., Ahmed, S.F., Ong, H.C., & Show, P.L. (2021). Techniques to improve the stability of biodiesel: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2209-2236. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01166-8>
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Li, C., Chen, X., Peng, W., Aghbashlo, M., Lam, S.S., & Tabatabaei, M. (2022). Managing the hazardous waste cooking oil by conversion into bioenergy through the application of waste-derived green catalysts: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 424, article number 127636. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127636>
- International Organization for Standardization. (2009). Animal and vegetable fats and oils — Determination of acid value and acidity (DSTU EN ISO 660:2009). Kyiv, Ukraine: Derzhspozhyvstandart of Ukraine.
- International Organization for Standardization. (2009). Animal and vegetable fats and oils — Determination of insoluble impurities content (DSTU ISO 663:2009). Kyiv, Ukraine: Derzhspozhyvstandart of Ukraine.
- International Organization for Standardization. (2010). Animal and vegetable fats and oils — Determination of moisture and volatile matter content (DSTU EN ISO 662:2010). Kyiv, Ukraine: Derzhspozhyvstandart of Ukraine.
- Jayaraman, J., Dawn, S.S., Appavu, P., Mariadhas, A., Joy, N., Alshgari, R.A., & Kumar, J.A. (2022). Production of biodiesel from waste cooking oil utilizing zinc oxide nanoparticles combined with tungsto phosphoric acid as a catalyst and its performance on a CI engine. *Fuel*, 329, article number 125411. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125411>
- Konur, O. (2021). Biodiesel and petrodiesel fuels: Science, technology, health, and the environment. In *Biodiesel fuels* (pp. 3-36). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780367456238-2>

- Maheshwari, P., Haider, M.B., Yusuf, M., Klemeš, J.J., Bokhari, A., Beg, M., & Jaiswal, A.K. (2022). A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 355, article number 131588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131588>
- Mathew, G.M., Raina, D., Narisetty, V., Kumar, V., Saran, S., Pugazhendi, A., & Binod, P. (2021). Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions. *Science of the Total Environment*, 794, article number 148751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148751>
- Mushtruk, M., Bal-Prylypko, L., Slobodyanyuk, N., Boyko, Y., & Nikolaienko, M. (2022). Design of reactors with mechanical mixers in biodiesel production. In *Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 197-207). Springer: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_19
- Mushtruk, M., Mushtruk, N., Slobodyanyuk, N., Vasylyv, V., & Zheplinska, M. (2024). Enhanced energy independence: Converting animal fat into biodiesel. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 134-144. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314860>
- Pasha, M.K., Dai, L., Liu, D., Guo, M., & Du, W. (2021). An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. *Biotechnology for Biofuels*, 14, article number 129. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01977-z>
- Pinheiro, C.T., Quina, M.J., & Gando-Ferreira, L.M. (2021). Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(18), 2015-2050. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1771887>
- Subhash, G.V., Rajvanshi, M., Kumar, G.R.K., Sagaram, U.S., Prasad, V., Govindachary, S., & Dasgupta, S. (2022). Challenges in microalgal biofuel production: A perspective on techno economic feasibility under biorefinery stratagem. *Bioresource Technology*, 343, article number 126155. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126155>
- Suzihaque, M.U.H., Syazwina, N., Alwi, H., Ibrahim, U.K., Abdullah, S., & Haron, N. (2023). A sustainability study of the processing of kitchen waste as a potential source of biofuel: Biodiesel production from waste cooking oil (WCO). *Materials Today: Proceedings*, 63, S484-S489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.526>
- Tucki, K., Orynych, O., Wasiak, A., Świć, A., Mruk, R., & Botwińska, K. (2020). Estimation of carbon dioxide emissions from a diesel engine powered by lignocellulose derived fuel for better management of fuel production. *Energies*, 13(3), article number 561. <https://doi.org/10.3390/en13030561>
- Vickram, S., Manikandan, S., Deena, S.R., Mundike, J., Subbaiya, R., Karmegam, N., & Awasthi, M.K. (2023). Advanced biofuel production, policy and technological implementation of nano-additives for sustainable environmental management – a critical review. *Bioresource Technology*, 387, article number 129660. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129660>
- Zulqarnain, M., Ayoub, M., Ramzan, N., Nazir, M.H., Zahid, I., Butt, T.A. (2021). Overview of feedstocks for sustainable biodiesel production and implementation of the biodiesel program in Pakistan. *ACS Omega*, 6(29), 19099-19114. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02402>

Отримано 09.11.2025 р., прийнято до друку 11.01.2026 р.