

УДК 662.767:631.363:504.05

БІОЕТАНОЛ ЯК СТРАТЕГІЧНО ВАЖЛИВИЙ ЧИННИК ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ

Ободович О.М.¹, д.т.н., Степанова О.Є.², к.т.н., Фіалко Н.М.³, член-кореспондент НАН України

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна

¹свідувач відділу, професор, e-mail: tdsittf@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

²ст. наук. співр., e-mail: super-olesya2807@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>

³Завідувач відділу, професор, e-mail: nmfiialko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2026.7>

В статті наведено аналіз літературних даних щодо переробки лігноцелюлозної сировини та її відходів у паливний біоетанол та можливості його застосування в суміші з бензинами для двигунів внутрішнього згоряння в умовах української економіки. Запропоновано використання розроблених в Інституті технічної теплофізики НАН України роторно-пульсаційних апаратів для перемішування та гомогенізації бензино-спиртових розчинів з метою підвищення їх стабільності та запобігання розшаруванню.

The article provides analysis of literature data on the processing of lignocellulosic raw materials and their waste into fuel bioethanol and the possibility of its use in a mixture with gasoline for internal combustion engines in the conditions of the Ukrainian economy. The use of rotary-pulsation devices developed at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine for mixing and homogenizing gasoline-alcohol solutions in order to increase their stability and prevent stratification is proposed.

Бібл. 31, рис. 2.

Ключові слова: ббензино-спиртові суміші, біопаливо, біоетанол, біоенергетика, відновлювані джерела енергії, декарбонізація, дискретно-імпульсне введення енергії, інтенсифікація тепломасообмінних процесів, роторно-пульсаційний апарат.

АЗС – автозаправна станція;

ДІВЕ – дискретно-імпульсне введення енергії;

ЕБК – електронний блок керування;

ІТТФ – Інститут технічної теплофізики;

НПЗ – нафтопереробний завод;

ОЧ – октанове число;

РПА – роторно-пульсаційний апарат.

Постановка проблеми

Глобальні виклики сучасності, такі як енергетична криза, зміни клімату та виснаження природних ресурсів, потребують радикальних змін у підходах до виробництва й споживання енергії. З огляду на це, розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема біопалива, стає стратегічно важливим напрямом підвищення енергетичної та екологічної безпеки. Використання біопалива сприяє зниженню викидів парникових газів і раціональному використанню біоресурсів, що відповідає концепції сталого розвитку [1].

Використання традиційних енергетичних ресурсів пов'язано зі значними викидами вуглекислого газу, що є однією з основних причин глобального потепління. Біопаливо є екологічно безпечнішою альтернативою традиційним енергоресурсам і може вироблятися із різних джерел: сільськогосподарські відходи, лісові залишки, енергетичні культури та органічні відходи [2, 3]. Інноваційні розробки у даній сфері дозволяють ефектив-

но використовувати біомасу та зменшувати відповідний вуглецевий слід. Ці розробки спрямовані на пошук та впровадження ефективних методів переробки біомаси, що сприяє раціональному використанню природних ресурсів і розвитку циркулярної економіки. Запровадження новітніх технологій та автоматизація виробництва дозволяють підприємствам зменшити витрати на виробництво біопалива, підвищити продуктивність і якість кінцевої продукції. Це дозволяє розширювати ринок біопалива та залучати інвестиції і формувати нові бізнес-моделі [2].

З 1 травня 2025 року в Україні почали діяти нові екологічні стандарти для пального, згідно з якими всі бензини з октановим числом меншим 98 повинні містити щонайменше 5% біоетанолу. Ці нововведення є частиною загальної стратегії, спрямованої на зменшення забруднення навколишнього середовища, підвищення енергетичної незалежності країни та приведення національного законодавства у відповідність до стандартів Європейського Союзу [4, 5].

Біоетанол – це безводний високооктановий етиловий спирт (октанове число – 105), отриманий у процесі переробки відновлювальної рослинної сировини методом ферментації цукрів мікроорганізмами, який використовується в якості моторного палива. Біоетанол містить не менше 99 % етилового спирту за об'ємом [6, 7].

Товарні бензини, що містять біоетанол, позначаються літерою Е з подальшим зазначенням у % об'ємного вмісту біоетанолу, наприклад А-95-Е5 – містить 5 % спирту, а А-95-Е10 – 10 % та ін.

Автомобілі, що наразі випускаються серійно для роботи на двокомпонентному паливі, використовують два основні конструктивні підходи:

1. У паливну систему встановлюється сенсор вмісту етанолу (Ethanol contentsensor), який визначає відсоток етанолу в паливі. На основі цих даних відбувається корекція подачі палива. Такий підхід використовується в автомобілях у США, а також у Європі (Volvo, Saab, Ford) [6, 8].

2. Математичне обчислення вмісту біоетанолу на основі корекцій за зворотним зв'язком від датчика кисню у відпрацьованих газах (closed loop). Однак автомобілі з такою опцією коштують на 800-1000 євро дорожче (використовується компанією PSA Peugeot Citroen) [9].

Провідними виробниками автомобілів та автомобільних двигунів (наприклад Volvo, Volkswagen, Chevrolet, Renault, Ford та ін.) розроблена і масово випускається система Flexible-fuel, що дозволяє автоматично забезпечувати нормальну роботу без втрати потужностних параметрів двигуна на бензино-етанольній суміші в залежності від складу такого палива [5].

Стандартним паливом для автомобілів із двигунами "Flex-Fuel" є Е85. Також використовується й паливо Е95 – суміш 95 % біоетанолу і 5 % паливної присадки. Наприклад, компанія Scania (Швеція) серійно виробляє дизельні автобуси та вантажівки, що працюють на 95 % біоетанолі [10].

У світі також ведуться розробки тракторів, здатних працювати на біоетанолі. Компанія John Deere створила високотехнологічний двигун, який може працювати на різних видах палива, як нафтового, так і біологічного походження [11]. Це паливо може заливатися в бак окремо або в суміші у відповідних пропорціях. Декілька датчиків вимірюють різні параметри палива або його суміші, а електронний блок керування (ЕБК) коригує параметри роботи двигуна для досягнення відповідних норм викидів токсичних речовин.

Враховуючи, що в Україні почали діяти нові екологічні стандарти для пального, доцільно прове-

сти дослідження, які пов'язані з адаптацією вживаних автомобільних бензинових двигунів для роботи на бензино-етанолових сумішах.

Конкурентна боротьба серед автовиробників призводить до постійного вдосконалення двигунів внутрішнього згоряння: збільшення потужності, зменшення споживання пального, покращення екологічних показників тощо. Це, в свою чергу, ставить нові завдання перед виробниками автомобільних палив, у тому числі і бензинів. Сучасні автомобільні бензини є сумішшю вуглеводнів різних класів. В Україні якісний склад бензину відповідно до стандарту Євро-5 встановлюється ДСТУ 7687:2015. Відповідно до цього стандарту бензини можуть містити до 3 % метанолу, або етанолу до 10 % та до 15 % етерів, що можуть бути отримані з цих спиртів. У світі успішно експлуатуються транспорт на бензино-спиртових сумішах у різних концентраціях: Е5, Е7, Е10, Е40 та Е85 що містять 5 %, 7 %, 10 %, 40 % та 85 % етилового спирту відповідно. Лідерами у використанні таких бензино-спиртових сумішей є США, країни Латинської Америки, Китай. Кількість країн, де використовують бензино-спиртові суміші, з кожним роком зростає [12].

Сучасні екологічні вимоги до якості моторних палив, а також підвищені вимоги до детонаційної стійкості автомобільних бензинів роблять актуальним додавання спиртовмісних органічних високооктанових добавок у вуглеводневі бензини. Для України найбільш перспективною добавкою є біоетанол [13], оскільки наявна сировинна база, розвинута інфраструктура його виробництва та передбачувана логістика поставок по території України. Незважаючи на значні досягнення нафтопереробної промисловості, задачі збільшення випаровуваності та детонаційної стійкості (октанового числа – ОЧ) автомобільних бензинів завжди є актуальними.

Додавання спирту, наприклад, етанолу (біоетанолу), до базового бензину дозволяє вирішити обидві вказані задачі. Однак мають місце певні проблеми та обмеження: по-перше, можливий вміст спирту обмежений ДСТУ, а по-друге, нестабільність бензино-спиртової суміші (здатність до розшаровування) [14].

Враховуючи вищевикладене, додавання лише біоетанолу може виявитись недостатнім для повного вирішення задачі із підвищення детонаційної стійкості та випаровуваності автомобільного бензину [15]. Тому пошук методів для додаткового збільшення октанового числа (ОЧ) та запобігання розшарованості бензино-спиртової суміші є актуальним науковим та практичним завданням.

Метою роботи є аналіз літературних джерел щодо переробки лігноцелюлозної сировини та її відходів у паливний біоетанол та можливості його застосування в суміші з бензинами для двигунів внутрішнього згоряння в умовах української економіки, а також визначення перспектив застосування роторно-пульсаційних апаратів для перемішування і гомогенізації бензино-спиртових розчинів.

Об'єктами дослідження є бензин та біоетанол, що використовуються для створення паливних сумішей з метою декарбонізації економіки.

Виклад основного матеріалу

Перехід на електромобілі наразі є світовим трендом скорочення шкідливих викидів. Проте реалії свідчать, що старі автомобілі з ЄС та США найближчі 15 років ще матимуть необхідність у заправці паливом, яке має бути все більш екологічним.

Наразі у Верховній Раді готується до другого читання законопроект щодо використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту. Документ розроблявся ще у 2020 році, але сьогодні, в умовах війни РФ проти України та з огляду на питання енергетичної безпеки і стабільного функціонування ринку палива, законопроект набуває особливої актуальності. Основна мета документу полягає у встановленні обов'язкової норми додавання біоетанолу в альтернативні види палива для бензинових двигунів на рівні не менше 5 % (об'ємних). Винятком стануть бензини з октановим числом 98 і вище.

Наявні три способи застосування біоетанолу як моторного палива:

- як добавка до бензину від 5 до 15 % (E5, E10, E15) для використання у звичайних бензинових двигунах. Таке паливо маркується буквою "Е" та цифрою, що позначає відсоток вмісту спирту. Наприклад, E10 – це суміш, що містить 10 % біоетанолу та 90 % бензину;

- у вигляді сумішей із вмістом етанолу до 85 % (E20, E30, E85) для використання в автомобілях з двигунами з універсальним споживанням палива. Чисте (100 %) біоетанолове паливо, як моторне, використовується тільки у Бразилії.

- в інших країнах етанол змішують із бензином у різних пропорціях. Наприклад, паливна суміш E85 складається з 85 % біоетанолу та 15 % бензину.

У біоетанолу є один суттєвий недолік: при низьких температурах двигун, що працює на 100 %-му біоетанолі складно запускається. Проблема вирішується за допомогою додавання невеликої частки (близько 5 %) бензину. Наприклад, у Швеції міські автобуси Scania заправляють саме такою сумішшю.

У США поширене моторне паливо стандарту E10 (взимку E15), а в деяких штатах використовується суміш E85. При цьому, E10 і E15 можна заливати в бак будь-якої машини, що працює на бензині, а витрата палива майже не збільшується, оскільки біоетанол, на відміну від бензину, має знижену енергетичну щільність та підвищує октанове число суміші, тому вона згоряє з більшою ефективністю.

Якщо раніше в Європі переважало застосовувалась марка E5 з показником 5 % вмісту біоетанолу, то зараз споживання бензину в умовах посилення екологічних вимог зміщується у бік марки E10 з максимальним вмістом біоетанолу 10 %. У Європі включно з Великою Британією 21 країна вже перейшла на новий вид бензину або перебуває в процесі його поетапного впровадження. Марка E10 набуває все більшого поширення в Північно-Західній Європі.

Імплементація вищевказаного законопроектного потребує комплексного аналізу міжнародного досвіду з урахуванням специфіки українських реалій. До ключових чинників належать середній вік автопарку, структура споживання палив, рівень внутрішнього виробництва біокомпонентів, нормативно-правові засади технічного регулювання, наявні технологічні можливості, а також стан інфраструктури та логістичних ланцюгів.

Одержання суміші біоетанолу з бензином можна забезпечити через:

- безпосереднє змішування на АЗС;
- створення окремих технологічних циклів на відновлених у майбутньому НПЗ;
- створення відокремлених схем змішування на нафтобазах.

Кожен із зазначених напрямів потребує зміни ланцюгів постачання і логістики. Наприклад, імпорту Eurobob (бензин, готовий до додавання етанолу), додаткових присадок, які запобігають корозії паливної системи транспортного засобу, розшаруванню вуглеводнево-спиртових сумішей, розвитку мікроорганізмів у них тощо.

З 1 січня 2024 року аналітичне агентство Argus розраховуватиме котирування оксигенованого бензину Argus Eurobob oхu (E5) як надбавку/знижку до ціни на неоксигенований продукт (E10). Котирування біржових партій неоксигенованого бензину Eurobob non-охu (E10) відбуватиметься як і раніше.

Згідно із щорічним звітом про біопаливо за 2022 рік, представленим у Глобальній мережі сільськогосподарської інформації Міністерства сільськогосподарства США, зазначається, що виробництво паливного етанолу в ЄС цього року досягне 5,354 млрд. літрів (1,41 млрд. галонів).

Наприклад, торік продаж біоетанолу для змішування з бензином у Німеччині зріс на 2,9 % до 1,19 млн. т., порівняно з попереднім роком. Ринок палива пожвавлюється: обсяг реалізованого бензину марок Super E10, Super Plus і Super (E5) зріс на 3,5 %, майже до 17,0 млн. т. При цьому відбулося різке зростання продажів бензину марки Super E10: його ринкова частка зросла з 17,2 % майже на 43 % у 2021 році і ще майже на 24,0 % у 2022 році.

До 2015 року в Євросоюзі також був доступний E85 через розгалужену мережу, і для нього мали місце певні пільги. Наприклад, до 31 грудня 2015 року вміст біоетанолу в бензині був звільнений від податку на нафту в Німеччині. Але з 1 січня 2016 року компонент етанолу повністю почав оподатковуватись, і паливо втратило свою економічну перевагу та зникло з АЗС у Німеччині. Варто зауважити, що використовувати паливо E85 можуть тільки ті транспортні засоби, у яких усі матеріали паливного контуру (бак, паливний насос, паливопровод, форсунки) сумісні з етанолом. У Німеччині, наприклад, біоетанол недоступний як чисте паливо (E100), оскільки він не може забезпечити надійний холодний запуск при низьких температурах.

Як свідчать дані AUTO-Consulting, у січні 2023 року середній вік українського автопарку становив 23,2 року. Це вдвічі більше, ніж у Євросоюзі, де цей показник складає 11,9 року (за підсумками 2021 року). Люксембург, Австрія та Данія вирізняються найновішим автопарком у Європі: середній вік транспортних засобів становить відповідно 6,7; 8,5 та 8,9 року.

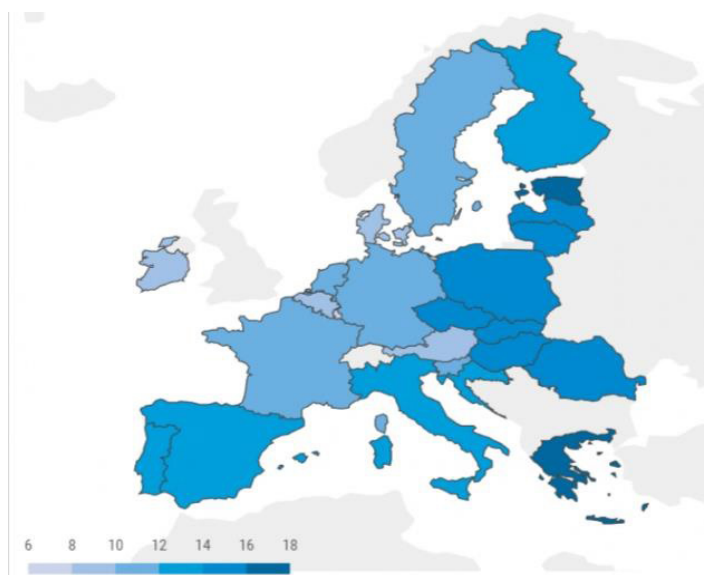
Найстаріший європейський автопарк – близько 17 років – у Литві, Румунії, Естонії. Згідно з даними АСЕА, середній вік легких комерційних автомобілів у ЄС становить 12 років, середній вік вантажівок – 14,2 року, а автобусів – 12,7 року.

Для низки західноєвропейських країн - Швеція, Франція, Бельгія, Нідерланди, Данія, Норвегія, Німеччина, Швейцарія, частка нових автомобілів віком до 2 років становить 10-16 % автопарку. Близько 20 % автопарку становлять автомобілі невеликого строку експлуатації (2-5 років), тоді як частка транспортних засобів значного віку (понад 20 років) є мінімальною – близько 5-10 %

Як видно з рис. 2, в Україні значна частина автопарку має вік понад 10 років, середній вік електромобілів становить 5,6 року. В умовах війни процес оновлення автопарку суттєво ускладнений, однак певні передумови для позитивних змін усе ж наявні.

Українці до війни активно ввозили електромобілі, і навіть за I квартал поточного року їх кількість зросла на 11 %, перевищивши позначку у 50 тисяч. Є підстави вважати, що зазначена тенденція збережеться й після завершення війни, що сприятиме частковому оновленню автопарку.

Використання в бензинових двигунах внутрішнього згоряння альтернативних моторних палив з додаванням біоетанолу зазвичай безпечно для автомобілів, вироблених починаючи з 2000-х років.



Джерело: European Automobile Manufacturers' Association (ACEA) [16]

Рис. 1. Середній вік автопарку ЄС (дані для Болгарії та Мальти відсутні)
Fig. 1. Average age of the EU vehicle fleet (data for Bulgaria and Malta not available)

З огляду на існуючий віковий розподіл українського автопарку, доцільним є пошуку ефективних стимулів для нарощування виробництва та споживання етаноломісних бензинів, модернізації інфраструктурних об'єктів, що забезпечують їх комерційний обіг, а також для поступового оновлення автомобільного парку.

Декарбонізація транспортної галузі залишатиметься визначальною стратегічною тенденцією протягом найближчих десятиліть. Основний вектор розвитку спрямований на електрифікацію транспорту, проте слід враховувати, що екологічна ефективність електромобілів досягається лише за умови використання електроенергії з відновлюваних джерел.

Використання електромобілів, що живляться від електроенергії, виробленої з вугільної генерації, не може розглядатися як екологічний здобуток. Крім того, перехід на електротранспорт не відбудеться миттєво, а потребує часу та поступових змін. У цьому контексті біоетанол може відіграти важливу роль у процесі декарбонізації транспортної галузі.

Незважаючи на те, що за енергетичною щільністю біоетанол значно поступається бензину (теплота згоряння біоетанолу 19,6 МДж/л, а бензину – 32 МДж/л), заміна бензину на біоетанол призводить до пропорційного зниження викиду парникового газу (CO_2) в атмосферу.

Крім того, навіть невеликий вміст біоетанолу в бензині забезпечує значне зниження токсичності вихлопних газів, оскільки присутній у біоетанолі кисень забезпечує повне згоряння суміші (при спалюванні біоетанолу утворюються лише два продукти: вуглекислий газ і вода).

Перспективним є застосування технології кавітаційної обробки спирт-вуглеводневих сумішей для створення високооктанових бензинів [17]. Як відомо, кавітація є явищем виникнення в крапельній рідині буль-

башок (порожнин). Якщо зниження тиску здійснюється внаслідок появи великих місцевих швидкостей у потоці рухомої крапельної рідини, то кавітація називається динамічною. А якщо, внаслідок проходження у рідині акустичних хвиль – акустичною. Енергія схлопування бульбашок призводить, зокрема, до гомогенізації продукту, що обробляється. Це є важливим фактором, враховуючи високу схильність бензино-спиртових сумішей до розшарування [18].

Кавітаційна обробка наразі досить успішно використовується в різних галузях промисловості, зокрема, для вирішення проблеми покращення тих чи інших властивостей паливних нафтових фракцій і товарних нафтопродуктів [18].

Як відомо, у світі постійно зростає обсяг споживання біопалива, в тому числі біоетанолу [19]. Додавання біоетанолу до автомобільного бензину, що супроводжується збільшенням реакційного об'єму кисню, призводить до покращення екологічних показників автотранспорту. Слід також зазначити, що автомобільні двигуни, які працюють на такому пальному, не потребують значних змін.

У роботі [20] наведена конструкція кавітаційного реактора для переробки вуглеводневої сировини. Особливістю цього реактора є те, що його конструкція дозволяє отримати три зони динамічної кавітації. Показано, що в кавітаційному полі відбувається розкладення перекису водню на гідроксильні радикали, що в подальшому беруть участь у синтезі метанолу. Отже в такому реакторі можна не тільки отримати однорідну рідину з бензину та біоетанолу, а й здійснити хімічні перетворення бензину.

Опис кавітаційної установки для переробки вуглеводневої сировини представлено в [21]. Установка дозволяє вести процес переробки за тисків до 30 МПа.



Джерело: Auto-Consulting [16]

Рис. 2. Розподіл за віком автопарку України
Fig. 2. Age distribution of the vehicle fleet in Ukraine

Встановлено, що перетворення н-алканів у присутності перекису водню у спирти, а саме в метанол, відбувається за тиску 9-21 МПа. При цьому, максимальна конверсія н-алканів одержується за тиску 19 МПа.

У роботу [22] досліджено вплив кавітаційної обробки бензину на зміну його ОЧ. Показано, що при кавітаційній обробці бензину за тиску 20 МПа відбувається збільшення його ОЧ на ~ 4 од. Це відбувається через перетворення лінійних алканів з низьким ОЧ в ізоалкани та ненасичені вуглеводні, що мають високе ОЧ.

Робота [23] присвячена дослідженню впливу перекису водню в кавітаційному полі на процес перетворення лінійних алканів у високооктанові компоненти моторних палив, в тому числі в метанол. Встановлено, що без перекису водню процес йде переважно в напрямі синтезу толуолу. Його концентрація в продуктах переробки збільшується до 5 %. При введенні в систему водного розчину перекису водню разом з толуолом з'являється метанол. Концентрація метанолу в умовах експерименту досягає 3 %. Визначено масовий склад бензину до та після кавітаційної обробки. Досліджено зміни в групах вуглеводнів зі складу бензину в залежності від тиску, що відбуваються в процесі переробки з перекисом водню та без нього [24]. Введення перекису водню в бензин, що подається на кавітаційну переробку, дозволяє збільшити ОЧ бензину до 14 одиниць.

Отже, за результатами виконаного літературного огляду можна зробити висновок, що одним з перспективних шляхів розв'язання проблеми покращення моторних палив, а саме автомобільних бензинів, є введення біоетанолу до складу бензину з подальшою кавітаційною переробкою цієї суміші.

Вчені НАН України поставили собі за мету розробити універсальне, багатофункціональне тепломасообмінне обладнання, в якому сумісно реалізується низка процесів: диспергування, перемішування, гомогенізація, розчинення, гідроліз, ферментація, кавітаційне змішування бензину та біоетанолу тощо. Вирішення поставленого завдання пов'язане із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення та трансформації енергії (ДІВЕ) як узагальнювального методу спрямованого, локального та інтенсивного використання концентрованої енергії в рідких дисперсних середовищах [25, 26]. Ідея ДІВЕ полягає в тому, щоб попередньо стаціонарно введену і довірливим чином розподілену в робочому об'ємі енергію акумулювати (сконцентрувати) в локальних дискретних зонах системи і надалі імпульсно реалізувати для досягнення необхідних теплофізичних ефектів. Мета ДІВЕ полягає в інтенсифікації тепломасообмінних і

гідродинамічних процесів у технологічних середовищах, а також у створенні методики їх оптимізації і способів керування ними.

Реалізація методу ДІВЕ передбачає створення великої кількості рівномірно розподілених у дисперсному середовищі робочих органів чи робочих елементів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні в часі і просторі. Ударні хвилі, які супроводжують ці явища, міжфазна турбулентність, мікрокавітація, проникні кумулятивні мікрострумені, вихори спричиняють на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що приводить до активного дроблення дисперсних включень, значного збільшення сумарної поверхні контакту фаз і інтенсифікації процесів масо- і теплопереносу. Подібні ефекти часто недосяжні в разі використання традиційних методів обробки дисперсних середовищ, навіть за значно більшого рівня питомих енерговитрат.

Співробітниками Інституту технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України накопичено великий досвід з виготовлення різних видів енергоощадного тепломасообмінного обладнання, що дозволяє успішно реалізувати цей метод. Найчастіше його використовують у роторно-пульсаційних апаратах, які широко застосовуються в різних галузях промисловості: харчовій, фармацевтичній, хімічній, мікробіологічній, в агропромисловому комплексі тощо [27-30]. Перспективним напрямом є також використання цих апаратів для змішування бензину з біоетанолом.

Роторно-пульсаційні апарати (РПА) як гомогенізатори застосовуються для обробки дисперсних середовищ рідина-рідина. Безперервним середовищем оброблюваної гетерогенної суміші завжди є рідина, що забезпечує принципову можливість реалізації в апараті широкого спектра факторів гідродинамічного впливу, які в сукупності розглядаються як базові механізми дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ).

Щодо роботи РПА ці фактори виявляються в такий спосіб:

1. Силовий вплив з боку безперервної рідкої фази на дисперсні частинки внаслідок різкого гальмування чи прискорення потоку; це призводить до різкого перепаду тиску та виникнення руйнівного поздовжнього напруження стиснення.

2. Ініціювання явища гідродинамічного удару.

3. Гідроакустичний вплив на дисперсії внаслідок періодичного розвитку дрібномасштабних пульсацій тиску, явищ вибухового скипання та кавітації.

4. Надзвичайно високі швидкості зсуву та, як наслідок, великі напруження зсуву, що діють на дисперсну фазу.

Крім зазначених гідродинамічних факторів, високий ступінь диспергування забезпечується також механічним впливом на частинки гетерогенного середовища, який полягає в ударних, зсувних та абразивних навантаженнях при безпосередньому контакті дисперсій з робочими елементами РПА. Як базова модель РПА використовується конструкція апарата циліндричного типу, що складається з трьох коаксіально розміщених циліндричних елементів: двох статорів та ротора, що обертається між ними. Між ротором та статором існують дуже вузькі кільцеві зазори. На поверхнях статорів та ротора паралельно осі обертання з рівною періодичністю розташовані вузькі щілинні отвори однакової ширини, які взаємно перекриваються при обертанні ротора. Якщо всередині апарата знаходиться рідина, обертання ротора забезпечує тангенціальний рух рідини в кільцевих зазорах та, внаслідок дії відцентрових сил, її радіальне переміщення через щілинні отвори ротора та статорів. Конструктивні характеристики базової моделі РПА наведено в [31].

Висновки

Біоетанол другого покоління – стратегічно важливий продукт, що отримується з відновлюваної лігноцелюлозної сировини та її відходів. Він є альтернативою спирту, виробленому з харчової сировини (крохмалю та цукровмісних продуктів), і може широко застосовуватися у переробній, фармацевтичній, хімічній промисловості, а також в енергетиці і транспорті як добавка до бензину.

Спиртовий бензин, або етанол-бензинова суміш, є одним з видів альтернативного пального, що включає етанол (етиловий спирт), змішаний у різних концентраціях з бензином. Виробництво та використання цього палива є важливим напрямом зниження викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, зменшення залежності від нафти і залучення відновлюваних джерел енергії до енергоміксу.

Найбільш поширеним є додавання біоетанолу до бензину у концентрації 5, 10 та 15 %, що не спричиняє помітного впливу на роботу двигуна внутрішнього згоряння та забезпечує суттєво зменшення викидів вихлопних газів.

Основна складність виробництва біоетанолу другого покоління полягає у конверсії лігноцелюлозовмісної сировини, яка передбачає розділення целюлози, лігніну та геміцелюлози. В Інституті технічної теплофізики НАН України запропоновано інноваційне тепломасообмінне обладнання для інтенсифікації цього процесу.

Ще однією проблемою щодо використання біоетанолу у паливних сумішах (бензин-біоетанол) є їх розшарування при тривалому зберіганні. Відомі пропозиції щодо застосування різних типів кавітаційних апаратів для уникнення цього розшарування. В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено спеціальну конструкцію роторно-пульсаційного апарата (РПА), призначеного для перемішування та гомогенізації бензино-спиртових розчинів з метою підвищення їх стабільності та запобігання розшаруванню.

З огляду на важливу роль біоетанолу в декарбонізації економіки доцільним є ухвалення відповідних законодавчих ініціатив, які матимуть велике значення для підвищення енергетичної і екологічної безпеки країни. Їх запровадження сприятиме зменшенню залежності держави від імпорту енергоносіїв, підвищенню потенціалу аграрного сектору, надасть додатковий імпульс переробній промисловості та зміцненню позиції України у досягненні екологічних цілей.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гелетуха Г., Железна Т., Драгнєв С., Кучерук П. Перспективи виробництва передових біопалив в Україні. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2023. 76(3). 71–82. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.06>.
2. Гончарук Я., Шевчук Г. Напрями вдосконалення виробництва та переробки продукції АПК на біопаливо. Економіка та суспільство. 2022. 36. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-36-8>.
3. Гончарук І.В., Ємчик Т.В., Купчук І.М., Телекало Н.В., Гончарук Я.В. Напрями вдосконалення вирощування та переробки кукурудзи на біопаливо. Таврійський науковий вісник. 2022. 125. С. 25–32. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.125.4>.
4. Закон України «Про альтернативні палива» від 05.07.2025 № 1391-XIV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>. (дата звернення 24.02.2026).
5. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо обов'язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту» від 04.06.2024 № 3356-д. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/II03586I?an=6&scop=78&fcop=209> (дата звернення 24.02.2026).
6. Сосіда С.В. Поліпшення паливної економічності двигуна з іскровим запалюванням при використанні спиртовмісної добавки до бензину: дис. ... д-ра філософії у галузі 14 Електр. інженерія: 142, НТУ. Київ, 2024. 240 с.

7. Поляшенко С.О., Гасенко Д.І. Використання біоетанолу як альтернативного джерела енергії. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація». 2022. С. 157–158.
8. *Fahrenbruch, A. and Bachmann, J.* Ethanol Sensors for Flex Fuel Operation. MTZ Worldwide. 2008. 69(9). 46–49. <https://doi.org/10.1007/BF03227915>.
9. *Citroen C4 BioFlex* brings ethanol to Europe. URL: <https://www.carsales.com.au/editorial/details/citroen-c4-bioflex-brings-ethanol-to-europe-4827/> (дата звернення: 24.02.2026).
10. Біоетанол: практика та застосування. Досвід UTC. <https://uabio.org/>. 01.10.2020. URL: <https://uabio.org/materials/8798/> (дата звернення: 24.02.2026).
11. *John Deere* розробляє мультипаливний двигун. Аграрний ринок. 22.09.2022 URL: <https://news.finance.ua/ua/john-deere-rozroblyaye-mul-typalyvnyu-dvyhun> (дата звернення: 24.02.2026).
12. Бойченко С.В., Павлюх Л.І., Шкільнюк І.О. Аналіз екологічних властивостей компонентів традиційних альтернативних авіаційних бензинів. Наукоємні технології. 2019. № 2 (42). С. 195–206. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.42.13752>.
13. Мілоцький В.В., Ганжа С.Н. Спосіб підвищення октанового числа газоконденсатних і нафтових прямогонних бензинів. Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля. 2013. № 14 (203). С. 85–88.
14. Бойченко С.В., Бойченко М.С., Личмаченко О.Г., Кабан С.М. Вплив добавок аліфатичних спиртів на властивості бензинів: аналітичний огляд. Наукоємні технології. 2015. №1(25). С. 86–92.
15. *Drozdniak, I.D., Miroshnichenko, D.V., Shmeltser, E.O., Kormer, M.V., Pyshyev, S.V.* Investigation of possible losses of coal raw materials during its technological preparation for coking Message 2. The actual mass variation of coal in the process of its storage and crushing. Petroleum and Coal. 2019. Vol. 61, P 631–637.
16. Колісник М. Біоетанол: паливо, сировина, екологічна та продовольча безпека (21.06.2023). [Електронний ресурс]. URL: <https://epravda.com.ua/columns/2023/06/21/701427/> (дата звернення: 21.01.2026).
17. Бойченко С.В., Ланецький В.Г., Черняк Л.М., Радомська М.М., Кондакова О.Г. Дослідження впливу кавітаційної обробки на октанове число бензину. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. № 2. С. 107–114.
18. Целіщев О.Б., Лорія М.Г., Захаров І.І. Аналіз фізико-хімічних методів отримання гідроксильного радикала. Вісник національного технічного університету «ХП». 2011. № 65. С. 111–124.
19. Брей В.В., Щуцький І.В. Біоетанол в Україні. Вісник Національної академії наук України. 2016. № 6. С. 71–76. <https://doi.org/10.15407/vism2016.06.071>.
20. *Tselishchev O., Ijagbuji A., Loria M., Nosach V.* Synthesis of methanol from methane in cavitation field. Chemistry and chemical technology. 2018. Vol. 12. № 1. P. 69–73. <https://doi.org/10.23939/chcht12.01.069>.
21. Целіщев О.Б., Лорія М.Г., Носач В.О. Дослідження кавітаційного способу перетворення моторних палив. Технологический аудит и резервы производства. 2016. №4(4). 26–32.
22. Целіщев О.Б., Лорія М.Г. Дослідження кавітаційної обробки моторних палив. Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів: Монографія / за заг. ред. проф. С.В. Бойченка. К.: Центр навчальної літератури, 2017. Розділ 1. С. 29–32.
23. Целіщев О.Б., Лорія М.Г., Бойченко С.В., Єлісєєв П.Й., Матвєєва І.В. Дослідження впливу пероксиду водню на перетворення вуглеводнів в кавітаційному реакторі. Питання хімії та хімічної технології. 2018. № 6. С. 148–158. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2018-121-6-148-158>.
24. *Pyshyev, S., Prysiazhnyi, Y., Shved, M., Kulażyński, M., Miroshnichenko, D.* Effect of hydrodynamic parameters on the oxidative desulphurisation of low rank coal. International Journal of Coal Science and Technology. 2018. 5(2), P 213–229. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0205-6>.
25. Ободович О.М., Целень Б.Я., Степанова О.Є., Недбайло А.Є., Булій Ю.В. Технологія та обладнання для одержання універсального водовугільного палива. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2024. № 1. С. 13–18. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.02>.
26. Ободович О.М., Булій Ю.В., Сидоренко В.В., Степанова О.Є., Целень Б.Я. Вплив комплексної гідромеханічної обробки на дисперсність рослинної сировини в технології отримання паливного етанолу. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2025. Т. 84, № 3. С. 129–137. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2025.10>.
27. *Myronchuk, V., Obodovych, O., Stepanova, O., Gavva, O., Volodin, S., & Tselen, B.* (2025). Discrete-pulse energy input method for preretreatment of corn stalk in bioethanol production. Ukrainian Food Journal, 14(2), 342–353. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2025-14-2-11>.

28. Oleksandr M. Obodovych, Nataliia M. Fialko, Larysa A. Sablii, Olesya Ye. Stepanova, Bogdan Ya. Tselen. (2025). Intensification of hydrolysis of wheat straw polysaccharides with diluted acids due to new heat and mass transfer equipment. *Acta Periodica Technologica*. 2025. APTEFF, Issue 56, 461–471. <https://doi.org/10.2298/APT250708031O>.
29. Ободович О.М., Хоменко В.О., Шейко Т.В., Чернявський К.Є., Парченко В.М. Конверсія лігно-целюлозної біомаси з отриманням біопалива. *Теплофізика та Теплоенергетика*. 2025. 47(4), 105–116. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.11>.
30. Ободович О.М., Целень Б.Я., Іваницький Г.К., Хоменко В.О., Переяславцев О.М. Технологія та тепло-масообмінне обладнання для комплексної переробки бурякового жому в паливно-енергетичні та пектиновмісні продукти. *Теплофізика та Теплоенергетика*. 2025. 47(4), 38–48. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.4>.
31. Ободович О.М., Целень Б.Я., Степанова О.Є., Недбайло А.Є., Булій Ю.В. Дослідження реологічних показників водомазутних емульсій в залежності від технічних засобів та технологічних параметрів їх приготування. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. Т. 83, № 2. С. 69–79. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.06>.

BIOETHANOL AS A STRATEGICALLY IMPORTANT FACTOR IN ENERGY AND ENVIRONMENTAL SECURITY OF UKRAINE

Obodovych O.M.¹, Stepanova O.E.², Fialko N.M.³

¹Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0001-7213-3118, e-mail: tdsittf@ukr.net

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0002-7179-7251, e-mail: super-olesya2807@ukr.net

³Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2026.7>

The article provides a review of literature on the problem of improving motor fuels by adding bioethanol to gasoline with subsequent cavitation treatment of this mixture. A review and analysis of literature data on the processing of lignocellulosic raw materials and its waste into fuel bioethanol and the possibility of its use in a mixture with gasoline for internal combustion engines in the conditions of the Ukrainian economy are conducted. The use of rotary-pulsation devices developed at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine for mixing and homogenizing gasoline-alcohol solutions in order to increase their stability and prevent stratification is proposed.

The most common is the addition of bioethanol to gasoline in concentrations of 5, 10 and 15 %, which does not affect the operation of the internal combustion engine and allows significantly reducing exhaust emissions.

The main difficulty in the production of second-generation bioethanol lies in the conversion of lignocellulosic raw materials, which involves the separation of cellulose, lignin and hemicellulose. The Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine has proposed innovative heat and mass exchange equipment to intensify this process.

The other problem of the full use of bioethanol in the preparation of fuel mixtures (gasoline-bioethanol) is their stratification during long-term storage. The literature suggests the use of various types of cavitation devices to solve this problem. The Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine has developed a special design of a rotary-pulsation apparatus (RPA) designed for mixing and homogenizing gasoline-alcohol solutions in order to increase their stability and prevent stratification.

Given the important role of bioethanol, it is advisable to adopt legislative initiatives that will have a simultaneous positive effect on several sectors of the economy. This will reduce the state's dependence on energy imports, increase the potential of the agricultural sector, provide additional impetus to the processing industry, and strengthen Ukraine's position in achieving environmental aims.

References 31, figures 2.

Key words: gasoline-alcohol mixtures, biofuel, bioethanol, bioenergy, renewable energy sources, decarbo-nization, discrete-pulse energy input, intensification of heat and mass transfer processes, rotary-pulsation apparatus.

1. Geletukha, G.G., Zheliezna, T.A., Drahnev, S.V. and Kucheruk, P.P. (2023). Prospects for the production of advanced biofuels in Ukraine. *Energy Technologies & Resource Saving*, 76(3), 71–82, <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.06>.

2. Hontaruk, Ya. and Shevchuk, H. (2022). Napriamy vdoskonalennia vyrobnytstva ta pererobky produktsii APK na biopalyvo [Directions for improving the production and processing of agricultural products into biofuels]. *Ekonomika ta suspilstvo [Economy and Society]*, 36, <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-36-8>.

3. Honcharuk, I.V., Yemchyk, T.V., Kupchuk, I.M., Telekalo, N.V., Gontaruk, Ya.V. (2022). Napriamy vdoskonalennia vyroshchuvannia ta pererobky kukurudzy na biopalyvo [Directions of improving the cultivation and processing of corn for biofuels]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk [Taurida Scientific Herald]*, 125, 25–32, <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.125.4>.

4. *Zakon Ukrainy «Pro alternatyvni palyva» № 1391-XIV [Law of Ukraine "On Alternative Fuels"]*. (2025). available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>.

5. *Zakon Ukrainy «Pro vnesennia zmin do deiakikh zakoniv Ukrainy shchodo oboviazkovosti vykorystannia ridkoho biopalyva (biokomponentiv) u haluzi transportu» vid 04.06.2024 № 3356-d [Law of Ukraine "On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Mandatory Use of Liquid Biofuels (Biocomponents) in the Transport Sector" dated 04.06.2024 No. 3356-d]*, available at: <https://ips.ligazakon.net/document/JI03586I?an=6&scop=78&fcop=209>.

6. *Sosida S.V.* (2024). Polipshennia palyvnoi ekonomichnosti dvyhuna z iskrovym zapaliuvanniam pry vykorystanni spyrtovmisnoi dobavky do benzynu: dys. d-ra filosofii u haluzi 14 Elektr. inzheneriia [Improving the fuel efficiency of a spark-ignition engine when using an alcohol-containing additive to gasoline: PhD thesis in the field of 14 Electrical engineering], Kyiv, 240 p.
7. *Polyashenko, S., Gasenko, D.* (2022). Vykorystannya bioetanolu yak al'ternatyvnoho dzherela enerhiyi [Using bioethanol as an alternative energy source]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Automobile Transport in the Agricultural Sector: Planning, Design and Technological Operation", 157-158.
8. *Fahrenbruch, A. and Bachmann, J.* Ethanol Sensors for Flex Fuel Operation. MTZ Worldwide. 2008. 69(9). 46–49. <https://doi.org/10.1007/BF03227915>.
9. *Citroen C4 BioFlex* brings ethanol to Europe. URL: <https://www.carsales.com.au/editorial/details/citroen-c4-bioflex-brings-ethanol-to-europe-4827/>.
10. *Bioetanol: praktyka ta zastosuvannya.* Dosvid UTC [Bioethanol: Practice and Application. UTC Experience]. <https://uabio.org/>. 01.10.2020. URL: <https://uabio.org/materials/8798/>.
11. *John Deere rozroblyaye mul'typalyvnyy dvyhun.* Ahrarnyy rynek [John Deere is developing a multi-fuel engine. Agricultural market]. 22.09.2022 URL: <https://news.finance.ua/ua/john-deere-rozroblyaye-mul'-typalyvnyy-dvyhun>.
12. *Boichenko, S.V., Pavlyukh, L.I., Shkilnyuk, I.O.* (2019). Analiz ekolohichnykh vlastyvostey komponentiv tradytsiynykh al'ternatyvnykh aviatsiynykh benzyniv [Analysis of ecological properties of components of traditional alternative aviation gasoline]. Science-based technologies, 2(42), 195–206. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.42.13752>. (in Ukr.)
13. *Milotsky, V.V., Ganza, S.N.* (2016). Sposib pidvyshchennya oktanovoho chysla hazokondensatnykh i naftovykh pryamohonnykh benzyniv [Method of increasing octane number of gas condensate and oil straight gasoline]. Journal of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 14(203), 85–88. (in Ukr.)
14. *Boichenko, S.V., Boichenko, M.S., Lymachenko, O.G., Kaban, S.M.* (2015). Vplyv dobavok alifatychnykh spyrtiv na vlastyvoli benzyniv: analitychnyy ohlyad [Influence of aliphatic alcohol additives on gasoline properties: analytical]. Science-based technologies, 1(25), 86-92. (in Ukr.)
15. *Drozdnyk, I.D., Miroshnichenko, D.V., Shmeltser, E.O., Kormer, M.V., Pyshyev, S.V.* Investigation of possible losses of coal raw materials during its technological preparation for coking Message 2. The actual mass variation of coal in the process of its storage and crushing. Petroleum and Coal. 2019. Vol. 61, P 631–637.
16. *Kolisnyk, M.* Bioetanol: palyvo, syrovyna, ekolohichna ta prodovol'cha bezpeka [Bioethanol: fuel, raw material, environmental and food safety] (21.06.2023). URL: <https://epravda.com.ua/columns/2023/06/21/701427/>. (in Ukr.)
17. *Boychenko, S., Laneckiy, V., Chernyak, L., Radomska, M., Kondakova, O.* Doslidzhennya vplyvu kavitatsiynoyi obrobky na oktanove chyslo benzynu [Research of cavitation influence on automobile gasoline octane number]. Power engineering: economics, technique, ecology. 2017. № 2. С. 107–114.
18. *Tselishchev, O.B., Loriya, M.G., Zakharov I.I.* (2011). Analiz fizyko-khimichnykh metodiv otrymannya hidroksyl'noho radykala [Analysis of physicochemical methods of obtaining hydro-strong radical]. Bulletin of the National Technical University "KhPI", 65. 111-124. (in Ukr.)
19. *Bray, V.V., Shchutsky, I.V.* (2016). Bioethanol in Ukraine. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, 6, 71-76. <https://doi.org/10.15407/vsn2016.06.071>. (in Ukr.)
20. *Tselishchev, O., Ijagbuji, A., Loria, M., Nosach V.* Synthesis of methanol from methane in cavitation field. Chemistry and chemical technology. 2018. Vol. 12. № 1. P. 69–73. <https://doi.org/10.23939/chcht12.01.069>.
21. *Tselishchev, O.B., Loriya, M.G., Nosakh, V.A.* (2016). Doslidzhennya kavitatsiynoho sposobu peretvorenniya motornykh palyv [Investigation of the cavitation method of conversion of motor fuels]. Technological audit and production reserves, 4(4), 26-32. (in Ukr.)
22. *Tselishchev, O.B., Loriya, M.G.* (2017). Doslidzhennia kavitatsiynoi obrobky motornykh palyv [Research on cavitation treatment of motor fuels]. In S. V. Boichenko (Ed.), Problemy khimotolohii. Teoriia ta praktyka ratsionalnoho vykorystannya tradytsiynykh i alternatyvnykh palyvno-mastylnykh materialiv [Research of cavitation processing of motor fuels. Problems of chemotology. The theory and practice of rational use of traditional and alternative fuels and lubricants]: Monohrafi. Kyiv: Tsentri navchalnoi literatury, 29–32.
23. *Tselishchev, O.B., Loriya, M.G., Boichenko, S.V., Yeliseiev, P.I., Matvieieva, I.V.* (2018). Doslidzhennya vplyvu peroksydu vodnyu na peretvorenniya vuhlevodniv v kavitatsiynomu reaktori [Investigation of the influence of hydrogen peroxide on the transformation of hydrocarbons in a cavitation reactor]. Questions of chemistry and chemical technology, 6, 148-158. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2018-121-6-148-158>. (in Ukr.)
24. *Pyshyev, S., Prysiashnyi, Y., Shved, M., Kulažynski, M., Miroshnichenko, D.* (2018). Effect of hydrodynamic parameters on the oxidative desulphurisation of low rank coal. International Journal of Coal Science and Technology, 5(2), P 213–229. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0205-6>. (in Ukr.)

25. Obodovych, O.M., Tselen, B.Ya., Stepanova, O.Ye., Nedbailo, A.Ye., Bulii, Yu.V. (2024). Tekhnolohiya ta obladnannya dlya oderzhannya universal'nogo vodovuhil'nogo palyva [Technology and equipment for obtaining of universal hydrocarbon fuel]. *Energy Technologies & Resource Saving*, 1, 13–18. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.02>. (in Ukr.)
26. Obodovych O., Bulii, Y., Sydorenko, V., Stepanova, O., & Tselen, B. (2025). Vplyv kompleksnoyi hidromekhanichnoyi obrobky na dyspersnist' roslynnoyi syrovyny v tekhnolohiyi otrymannya palyvnoho etanolu [Influence of complex hydromechanical treatment on the dispersion of plant raw material in the technology of obtaining fuel ethanol]. *Energy Technologies & Resource Saving*, 84(3), 129–137. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2025.10>. (in Ukr.)
27. Myronchuk, V., Obodovych, O., Stepanova, O., Gavva, O., Volodin, S., & Tselen, B. (2025). Discrete-pulse energy input method for preretreatment of corn stalk in bioethanol production. *Ukrainian Food Journal*, 14(2), 342–353. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2025-14-2-11>.
28. Oleksandr M. Obodovych, Nataliia M. Fialko, Larysa A. Sablii, Olesya Ye. Stepanova, Bogdan Ya. Tselen. (2025). Intensification of hydrolysis of wheat straw polysaccharides with diluted acids due to new heat and mass transfer equipment. *Acta Periodica Technologica*. 2025. APTEFF, Issue 56, 461–471. <https://doi.org/10.2298/APT250708031O>.
29. Obodovych, O., Khomenko, V., Sheiko, T., Parchenko, V. & Chernyavskiy, K. (2025). Konversiya lihnotselyuloznoyi biomasy z otrymannyam biopalyva [Conversion of lignocellulos biomass to produce biofuel]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 50(4), 105–116. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.11>. (in Ukr.)
30. Obodovych, O., Tselen, B., Ivanytskyi, G., Khomenko, V., & Pereiaslavtsev, O. (2025). Tekhnolohiya ta teplomasoobminne obladnannya dlya kompleksnoyi pererobky buryakovoho zhomu v palyvno-enerhetychni ta pektynovmisni produkty [Technology and heat-and-mass transfer equipment for the integrated processing of sugar beet pulp into fuel, energy and pectin-containing products]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 50(4), 38–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.4>. (in Ukr.)
31. Obodovych, O., Tselen, B., Stepanova, O., Nedbailo, A., & Bulii, Y. (2025). Doslidzhennya reolohichnykh pokaznykiv vodomazutnykh emul'siy v zalezhnosti vid tekhnichnykh zasobiv ta tekhnolohichnykh parametriv yikh pryhotuvannya [Research of the rheological indicators of water-oil emulsions depending on the technical equipment and the technological parameters of their preparation]. *Energy Technologies & Resource Saving*, 83(2), 69–78. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.06>. (in Ukr.)

Отримано 27.01.2026
Received 27.01.2026

Прийнято до друку 04.05.2026
Accepted for publication 04.05.2026

Дата публікації 30.06.2026
Publication date 30.06.2026