

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-100-109>

УДК 662.758

КАВІТАЦІЙНА ОБРОБКА СУМІШЕЙ ЛІНІЙНИХ АЛКАНІВ З ПЕРЕКИСОМ ВОДНЮ ТА ДОПОМІЖНИМИ АГЕНТАМИ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА МОТОРНИХ ПАЛИВ

Сергієнко Д.В., Целіщев О.Б., Кудрявцев С.О., Лорія М.Г.

CAVITATION TREATMENT OF MIXTURES OF LINEAR ALKANES WITH HYDROGEN PEROXIDE AND AUXILIARY AGENTS AS A METHOD FOR INCREASING THE OCTANE NUMBER OF MOTOR FUELS.

Serhiienko D.V., Tselishchev O.B., Kudryavtsev S.O., Loria M.G.

У роботі представлено результати дослідження застосування кавітаційної обробки сумішей лінійних алканів з перекисом водню та спиртовими ко-агентами для підвищення октанового числа моторних палив. Кавітація, що супроводжується утворенням і колапсом парових бульбашок у рідині, створює локалізовані зони з екстремальними температурами (10^3 – 10^5 K) і тисками (до 100 МПа), в яких відбуваються радикальні реакції, ізомеризація, крекінг та утворення кисневмісних сполук. Введення H_2O_2 у систему призводить до утворення гідроксильних радикалів ($\bullet OH$), здатних ініціювати активацію інертних алканів і сприяти їх структурним перетворенням. Спирти, зокрема біоетанол та ізопропанол, виконують функцію як високооктанових компонентів, так і модифікаторів радикальних процесів, підвищуючи селективність утворення бажаних продуктів. Експериментальні дані свідчать, що кавітаційна обробка з перекисом водню H_2O_2 забезпечує приріст октанового числа на 1,3–3,5 RON, з ізопропанолом забезпечує приріст октанового числа на 0,3–0,9 RON, а з біоетанолом — до 2,6 RON, з оптимальними концентраціями спирту 1,0%, 3,5% та 6,5% об.

Поєднання кавітації з добавками дозволяє зменшити витрати спирту на 14–17% для отримання палива класів А-95 та А-98 у порівнянні з механічним змішуванням. Проаналізовано промислові перспективи впровадження, зокрема переваги гідродинамічної кавітації у вартості та енергоефективності, а також наявні обмеження — потреба в оптимізації параметрів процесу, контроль утворення побічних продуктів, запобігання ерозії обладнання та уточнення механізмів ізомеризації. Запропоновано напрями подальших досліджень, включаючи детальне картування параметрів, оцінку

довготривалої стабільності палива та масштабування процесу до промислового рівня. Отримані результати підтверджують технічну й економічну доцільність технології як альтернативи або доповнення традиційним методам підвищення октанового числа.

Ключові слова: кавітація, октанове число, перекис водню, радикальна хімія, ізомеризація, моторні палива.

Вступ. Октанове число є одним із ключових показників якості бензину та визначає його здатність протистояти детонації під час роботи двигуна внутрішнього згоряння. Детонація — це передчасне самозаймання паливовітряної суміші, яке призводить до нерівномірного згоряння, втрати потужності, підвищеного зносу деталей двигуна та навіть його пошкодження. Високе октанове число вказує на здатність палива зберігати стабільність під дією високого тиску та температури, що є особливо важливим для двигунів з високим ступенем стискання або форсованих двигунів.

У світовій практиці застосовують кілька методів визначення октанового числа: дослідницьке октанове число (Research Octane Number, RON), моторне октанове число (Motor Octane Number, MON) та середнє значення, що відображається на паливних колонках $((R+M)/2)$. Кожен з них враховує різні режими роботи двигуна, але всі вони спрямовані на оцінку стійкості палива до детонації.

Хімічний склад бензину безпосередньо впливає на його октанове число. Прямоланцюгові алкани (н-парафіни) мають низькі октанові значення, тоді як розгалужені алкани (ізопарафіни), нафтени та ароматичні сполуки характеризуються значно кращими антидетонаційними властивостями. Наприклад, н-гептан має RON, умовно прийнятий за 0, тоді як ізооктан (2,2,4-триметилпентан) має RON, прийнятий за еталонне значення 100. Таким чином, збільшення частки розгалужених та ароматичних вуглеводнів у паливі є ефективним шляхом підвищення його якості.

Промислові технології, спрямовані на покращення антидетонаційних властивостей бензину, історично розвивалися в кількох напрямках. Найбільш поширені з них:

- Каталітичний риформінг — процес, у якому низькооктанові парафіни та нафтени перетворюються на високооктанові ароматичні вуглеводні та ізопарафіни. Для цього використовуються платинові чи ренійвмісні каталізatori при високих температурах і тисках. Перевага цього методу — значний приріст октанового числа; недоліки — висока енергоємність, утворення шкідливих побічних продуктів (наприклад, бензолу) та чутливість каталізаторів до забруднень.

- Ізомеризація — процес перебудови молекулярної структури н-парафінів у їх розгалужені ізомери. Метод є менш енергоємним порівняно з риформінгом і особливо ефективний для легких алканів (C_4 – C_6). Однак ефект від ізомеризації обмежений, а процес потребує високої чистоти сировини та каталізаторів.

- Використання антидетонаційних присадок — добавок, що підвищують октанове число, таких як метил-трет-бутиловий ефір (МТБЕ), етанол або органометалічні сполуки (наприклад, тетраетилсвинець у минулому). Хоча ці присадки можуть забезпечити швидке та значне підвищення октанового числа, багато з них мають негативний екологічний вплив або призводять до проблем з експлуатаційними характеристиками двигуна.

У сучасних умовах ці методи часто комбінують, але вони залишаються енергоємними, потребують значних інвестицій в обладнання та нерідко мають екологічні обмеження.

Кавітація — це процес утворення та наступного колапсу парових або газових бульбашок у рідині внаслідок локального зниження тиску нижче тиску насиченої пари.

При колапсі бульбашок утворюються локальні "гарячі точки" з екстремальними температурами (до десятків тисяч К) і тисками (сотні атмосфер), що призводить до утворення високореакційних частинок — радикалів, іонів та збуджених молекул.

У паливній хімії кавітація може виконувати роль "нетермічного" каталізатора процесів, забезпечуючи:

- Розрив хімічних зв'язків у молекулах вуглеводнів (крекінг).

- Ініціювання радикальних реакцій, що ведуть до ізомеризації або ароматизації.

- Окиснення небажаних домішок, наприклад, сірковмісних сполук, що є основою технологій десульфуризації. Кавітація може бути реалізована у двох основних формах:

Гідродинамічна кавітація (ГК) — створюється за рахунок пропускання рідини через звуження, що викликає падіння тиску і зародження бульбашок.

Ультразвукова кавітація (УК) — утворюється при впливі на рідину ультразвуковими хвилями (>20 кГц), що чергують фази стиснення і розрідження.

Обидва типи мають потенціал для модернізації палив, але гідродинамічна кавітація зазвичай вважається більш енергоефективною та простішою для масштабування.

Додавання у систему перекису водню (H_2O_2) відкриває додаткові шляхи активації хімічних реакцій. Під дією кавітації H_2O_2 розкладається на гідроксильні радикали ($\bullet OH$) — одні з найсильніших окисників, здатних атакувати навіть хімічно інертні алкани. Це може призводити як до часткового крекінгу, так і до перебудови молекулярної структури (ізомеризації). Спирти (етанол, ізопропанол, ізобутанол) у цьому процесі виконують дві функції:

- Пряме підвищення октанового числа як високооктанові компоненти суміші.

- Модифікація радикальних процесів, що відбуваються в умовах кавітації, з можливістю селективного утворення бажаних продуктів. Комбінація кавітації, H_2O_2 та спиртів створює синергічний ефект, який дозволяє підвищити октанове число палива та знизити потребу у дорогих присадках.

Кавітація може бути гідродинамічною (ГК) або ультразвуковою (УК). Обидва типи забезпечують генерацію високих локальних температур (10^3 – 10^5 К) і тисків (до 100 МПа), що

призводить до утворення радикалів та фрагментації молекул.

Особливий інтерес викликає поєднання кавітаційної обробки з перекисом водню (H_2O_2), який під дією кавітації розкладається з утворенням гідроксильних радикалів ($\bullet OH$) — потужних окисників, здатних ініціювати реакції вуглеводнів, зокрема крекінг, ізомеризацію та утворення кисневмісних високооктанових компонентів.

Попри численні дослідження кавітаційних методів обробки палива, застосування їх у поєднанні з H_2O_2 та спиртовими ко-агентами для прямого підвищення октанового числа залишається відносно новим напрямом.

В роботах [1,2] розглянуто гідродинамічну кавітацію яка генерується за рахунок перепадів тиску в потоці рідини через спеціальні насадки або вентурі-трубки [1]. *Переважаючого методу є висока енергоефективність, відносно низька вартість устаткування, простота масштабування.* Однак має місто ерозія елементів апаратури та необхідність точного підбору гідравлічних параметрів [2], що ускладнює практичну реалізацію.

Автори [3,4] досліджували ультразвукову кавітацію, що створюється завдяки високочастотним коливанням (>20 кГц), які викликають локальний колапс бульбашок у рідині [3]. *Метод характеризується* можливістю точного контролю інтенсивності, можливістю локальної обробки малих об'ємів та високим виходом радикалів. Але *недоліком є* висока енерговитратність, складність масштабування для промислових потоків.

Поєднання гідродинамічної і ультразвукової кавітації досліджено у роботі [5]. Метод дозволяє сумістити високу інтенсивність утворення радикалів із більшою продуктивністю системи. Це дозволить підвищувати ефективність обробки та можливість роботи зі складними сумішами [5]. *Однак* складна конструкція установок, великі капітальні витрати обмежують практичне використання методу.

У роботі [6,7] автори дослідили введення H_2O_2 , що призводить до утворення гідроксильних радикалів ($\bullet OH$), які ініціюють перетворення вуглеводнів [6]. *Це* значно підвищує RON та передбачає можливість обробки інертних алканів. Але потреба у точному дозуванні H_2O_2 для запобігання надлишковому окисненню ускладнює процес та його практичну реалізацію.

Кавітація зі спиртами як ко-агентами розглянуто у роботі [8]. Спирти (етанол, ізопропанол, бутанол) виконують функцію високооктанових компонентів і модифікаторів радикальних реакцій. *це призводить до* додаткового підвищення RON, зменшення витрат спирту при кавітаційній активації. Але *є обмежує використання методу залежність від* концентрації та складу палива.

Метод кавітаційної десульфуризації дозволяє зменшити вміст сірковмісних сполук у паливі шляхом окисного руйнування під дією радикалів [9]. Це має екологічний ефект та можливість інтеграції у виробничі лінії. *Однак існує* ризик утворення небажаних побічних продуктів.

Гідродинамічна і ультразвукова кавітація успішно застосовуються для інтенсифікації виробництва біодизеля з рослинних олій [10]. *Це* скорочує час реакції та зменшує витрату каталізатора, але є обмеження щодо масштабування процесу через піноутворення.

При порівнянні досліджень можна стверджувати, що, що ГК є економічно вигіднішою для великих потоків, тоді як УК підходить для лабораторних та спеціалізованих установок. Сучасні виклики — потреба у підвищенні якості палива при зменшенні енергоспоживання та викидів — роблять кавітаційні технології перспективною альтернативою традиційним методам підвищення октанового числа. Поєднання кавітації з H_2O_2 та спиртами дає змогу досягати значних структурних змін у паливі за нижчих енерговитрат і з меншими витратами присадок, що визначає наукову та практичну значущість подальших досліджень у цьому напрямку.

Метою роботи є визначення можливості застосування кавітаційної обробки сумішей лінійних алканів з перекисом водню та спиртовими ко-агентами для підвищення октанового числа моторних палив.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- дослідити вплив кавітації у поєднанні з H_2O_2 та спиртами на октанове число моторних палив, виявити оптимальні параметри процесу та оцінити його промислову доцільність;

- дослідити промислові перспективи впровадження технології підвищення октанового числа бензину А-92 методом гідродинамічної кавітації з використанням кисневмісних агентів.

Основними об'єктами дослідження були модельні паливні суміші на основі комерційного

бензину марки А-92, а також індивідуальні лінійні алкани (зокрема н-гептан) як модельні представники низькооктанових компонентів. Вибір А-92 обумовлений його поширеністю та відносно низьким октановим числом, що дає змогу чітко оцінити ефективність методів модифікації.

Для підвищення реакційної здатності системи застосовували окислювальний агент — перекис водню (H_2O_2) технічної чистоти. В якості ко-агентів використовували спирти різної будови: біоетанол (C_2H_5OH), ізопропанол (C_3H_7OH), що дозволяло дослідити вплив як молекулярної маси, так і розгалуженості на ефективність кавітаційної модифікації.

Розглянемо передумови запропонованого процесу. Кавітація, явище, що включає утворення та колапс парових бульбашок у рідині, генерує екстремальні локалізовані умови, такі як високі температури та тиски. Ці умови можуть індукувати хімічні перетворення у вуглеводнях, що робить кавітацію перспективною технологією для модернізації моторних палив, зокрема для підвищення їхнього октанового числа. Дослідження показують, що кавітація може сприяти модифікації лінійних алканів, переважно через радикальні реакції, ізомеризацію та утворення високооктанових компонентів.

При поєднанні з допоміжними агентами, такими як перекис водню та спирти, октанове число бензину може бути значно підвищене, з повідомленнями про збільшення до 2,6 пунктів. Хоча існуючі промислові застосування кавітації в модернізації палива (наприклад, зниження в'язкості, десульфуризація) демонструють її комерційну життєздатність, необхідні подальші дослідження для повної оптимізації її застосування для прямої ізомеризації алканів та вирішення проблем масштабування, таких як пошкодження обладнання та управління побічними продуктами. Розглянемо механізми, ефективність та промислові перспективи кавітаційної обробки для підвищення октанового числа.

Октанове число є критичним показником стійкості палива до самозаймання або "детонації" у двигунах внутрішнього згоряння. Вищі октанові числа вказують на більшу стабільність палива під тиском, що є важливим для ефективності, потужності та довговічності двигуна, особливо у високопродуктивних або висококомпресійних двигунах. Октанове число зазвичай вимірюється як дослідницьке октанове число (RON) або моторне октанове число

(MON), при цьому октанове число на насосі $(R+M)/2$ є їх середнім значенням.

Досліджуваний бензин переважно складається з вуглеводнів, включаючи лінійні алкани (парафіни), розгалужені алкани (ізопарафіни), циклічні алкани (нафтени) та ароматичні сполуки. Прямоланцюгові алкани мають низькі октанові числа та схильні до самозаймання, тоді як розгалужені алкани (ізомери) демонструють значно вищі октанові показники.³ Наприклад, н-гептан має октанове число 0, тоді як ізооктан (2,2,4-триметилпентан) має еталонне значення 100.¹ Збільшення ступеня розгалуження в легких алканах безпосередньо підвищує їхнє октанове число.

Традиційні методи підвищення октанового числа бензину в основному включають модифікацію молекулярної структури та використання присадок. Каталітичний риформінг є ключовим промисловим процесом, який перетворює низькооктанові лінійні вуглеводні (парафіни) на розгалужені алкани (ізопарафіни) та циклічні нафтени. Ці сполуки потім частково дегідруються для отримання високооктанових ароматичних вуглеводнів, таких як бензол, толуол та ксилол.⁶ Процеси ізомеризації також безпосередньо перетворюють н-парафіни на ізо-парафіни для підвищення октанового числа. Крім того, використовуються різні хімічні присадки як октанові бустери, включаючи оксигенати (наприклад, етанол, диметилкарбонат), ефіри (наприклад, етил-трет-бутиловий ефір), антидетонаційні агенти (наприклад, фероцен), наночастинки та ароматичні сполуки. Ці присадки або покращують ефективність згоряння, або підвищують стійкість до детонації, або безпосередньо сприяють октановому числу.

Перекис водню (H_2O_2) є ключовим допоміжним агентом у кавітаційній модифікації палива. Під дією динамічної кавітації H_2O_2 розкладається на високореактивні гідроксильні радикали ($\bullet OH$).¹² Це розкладання значно прискорюється ультразвуковою вібрацією, збільшуючи швидкість розкладання H_2O_2 до 400% порівняно зі звичайними методами.¹³ Утворення самого H_2O_2 може бути посилене ультразвуковою кавітацією, особливо на межі розділу вода-нафта, через каскадну реакцію, що включає розчинений кисень та супероксидні радикали ($O_2 \rightarrow \bullet O_2^- \rightarrow H_2O_2$).

Гідроксильні радикали є високореактивними проміжними продуктами в хімії вуглеводнів, відомими своєю здатністю

активувати інертні молекули алканів. Їхня взаємодія з алканами зазвичай включає видалення атома водню, утворюючи воду та алкільний радикал ($R\bullet$). Цей алкільний радикал потім може реагувати далі, наприклад, з киснем, утворюючи пероксильний радикал. Присутність $\bullet OH$ радикалів є вирішальною для ініціювання вільнорадикальних ланцюгових реакцій у вуглеводнях.

Спирти, такі як біоетанол та ізопропанол є ефективними допоміжними агентами в кавітаційних процесах. Вони можуть виступати як високооктанові компоненти для змішування, оскільки спирти за своєю природою мають вищі октанові числа, ніж багато лінійних алканів. Вони також можуть бути поглиначами/донорами радикалів, потенційно впливаючи на шляхи реакцій та розподіл продуктів. Крім того, кавітація, як зазначається, ініціює реакції між вільними радикалами та спиртами. Ця синергія може призвести до утворення інших кисневмісних сполук (спиртів, кетонів, альдегідів), які додатково підвищують октанове число.

Хоча перекис водню є критично важливим для генерації високореактивних частинок, які активують інертні алкани, його основна роль у підвищенні октанового числа шляхом ізомеризації/розгалуження може бути непрямою або частиною ширшої реакційної мережі. Пряме розгалуження лінійних алканів до ізопарафінів для підвищення октанового числа, як це прямо зазначено у та як мета ізомеризації, приписується скоріше екстремальним умовам самої кавітації або іншим каталітичним процесам, а не специфічному механізму розгалуження, опосередкованому H_2O_2 . Роль H_2O_2 може полягати в ініціюванні загальної активації алканів, що призводить до крекінгу, окислення або сприяє подальшій рекомбінації/перегрупуванню, або виробленню високооктанових оксигенатів. Це розрізнення є критичним для розуміння точних хімічних шляхів.

Усі хімічні реагенти відповідали лабораторним стандартам чистоти та не потребували додаткової очистки: бензин А-92 — придбаний на сертифікованій АЗС, біоетанол, ізопропанол — чистота 99,8% (Merck), H_2O_2 (30% мас.) — виробник «Хімреактив».

Для отримання цілісного уявлення про процеси, що відбуваються в бензині, були проведені експериментальні дослідження,

спрямовані на визначення впливу перекису водню на перебіг кавітаційного процесу.

У досліджах як форсунки застосовувалися звужуючі пристрої, геометрія каналів яких наближена до форми дозвукового сопла Лавалю. Використовувалися форсунки діаметром 1,0 мм. Моторне паливо подавалося з напірної ємності об'ємом 80 л, тоді як водний розчин перекису водню надходив з окремої ємності об'ємом 8 л безпосередньо на всмоктування насосом високого тиску. Для вирівнювання тиску обидві ємності були з'єднані між собою трубопроводом.

Щоб забезпечити рівномірне змішування, розчин перекису водню та спирти вводилися у струмінь палива. Отримані продукти переробки збиралися в окремій ємності об'ємом 100 л, після чого їх піддавали відстоюванню й відділенню від залишків водного розчину перекису. Далі проби аналізувалися методом хроматографії.

Витрата моторного палива під час дослідів змінювалася в межах від 0 до 7 л/хв, а витрата розчину перекису водню — від 0 до 0,7 л/хв. Контроль подачі здійснювався витратомірами, а регулювання відбувалося за допомогою вентилів, установлених на лініях подачі палива та розчину перекису до насоса високого тиску.

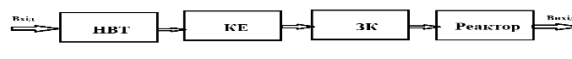


Рис. 1. Структурна схема установки для кавітаційної переробки моторних палив:

НВТ – насос високого тиску, КЕ – кавітаційний елемент, ЗК – зона кавітації

Для дослідження впливу концентрації перекису водню та спиртів на процес кавітаційної переробки бензину в якості сировини було обрано бензин А-92. Склад вихідного бензину та аналіз його октанового числа:

- Н-парафіни (нормальні алкани) – 10–20 %
- Ізопарафіни – 25–40 %
- Олефіни – 10–20 %
- Нафтени (циклопарафіни) – 5–15 %
- Ароматичні вуглеводні – 25–35 %
- у тому числі бензол ≤ 1 % (за стандартом Євро-5).

Октанове число (ОЧ) — це показник детонаційної стійкості бензину, тобто його здатності згорати у двигуні без самозаймання. Вимірюється у відсотках співвідношення ізооктану (ОЧ = 100) та н-гептану (ОЧ = 0) в еталонній суміші. Чим вище ОЧ, тим менше

схильність палива до детонації. Для товарних бензинів застосовують два методи:

1. **RON (Research Octane Number)** – дослідне число, визначене при «м'якому» режимі роботи двигуна (низькі оберти, легке навантаження). Для А-92: **не нижче 92**.

2. **MON (Motor Octane Number)** – моторне число, визначене при «жорсткому» режимі (високі оберти, високе навантаження). Для А-92: **приблизно 82**.

Іноді на заправках у Європі вказують **середнє значення** $(RON+MON)/2 = AKI$, але в Україні традиційно застосовується RON.

ОЧ (RON): ≥ 92 – забезпечує стабільну роботу двигунів середнього ступеня стискання (8,5–10). **ОЧ (MON): ≈ 82** – нижче за А-95 (у якого $MON \approx 85$), тому у важких режимах двигун на А-92 більш схильний до детонації. У порівнянні з А-95 та А-98, бензин А-92 дешевший, але менш ефективний у високофорсованих моторах. А-92 має достатнє октанове число для більшості «класичних» бензинових двигунів, проте для сучасних високонавантажених моторів рекомендують А-95 або вище, щоб уникнути детонації, підвищити ефективність та ресурс двигуна.

Для встановлення залежності октанового числа бензину після кавітаційної обробки без перекису водню було поставлено серію дослідів, в яких досліджуваний бензин витратою 5 л/хв прокачувався через кавітаційну установку. Витрата розчину перекису водню складала 0 л/хв. Тиск змінювався від 0 до 30 МПа. Діаметр сопла складав 1 мм. Результати дослідження зміни октанового числа від зміни тиску перед форсункою наведені на рис.2.

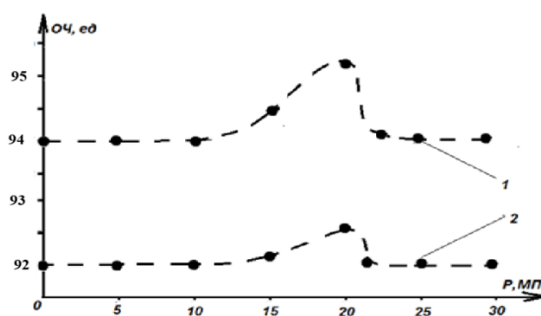


Рис. 2. Зміна октанового числа при кавітаційній обробці бензину А-92 без перекису водню:
1 – дослідницький метод; 2 – моторний метод

Як слід з аналізу залежностей, що наведено на рис.3, при тиску меншому за 10 МПа ніяких змін з досліджуваним бензином не відбувається. При збільшенні тиску з 10 МПа до 20 МПа,

октанове число зростає з 82 до 83,5 одиниць за моторним методом і з 92 до 94,7 одиниць за дослідницьким. Результати хроматографічного аналізу вказують на те, що після кавітаційної обробки в бензині з'явився толуол. Концентрація толуолу склала $\sim 3\%$. При цьому масова концентрація гексану зменшилася з 9,15% до 5,92%. Також незначно збільшилася кількість ізопарафінів з 31,22% до 32,61%. Відбувається це за рахунок процесу кавітації, що відбувається в бензині. В наслідок кавітаційного впливу руйнуються зв'язки С-С в алканах (переважно в гексані) і надалі відбувається утворення ізопарафінів і толуолу.

Максимальне октанове число, що вдалося досягти відповідає тиску 20 МПа. При подальшому збільшенні тиску спостерігається зворотній ефект - октанове число починає зменшуватися. При тиску вище 23 МПа ніяких змін в складі бензину вже не відбувається. Пояснюється це тим, що при таких параметрах за форсункою весь бензин переходить в паровий стан і ефекту кавітації не відбувається.

Для визначення впливу зміни концентрації перекису водню у водному розчині, що подається в кавітаційний реактор, на процес кавітаційної обробки бензину було поставлено серію дослідів, в якій витрата бензину складала 5 л/хв., а витрата водного розчину перекису водню складала 0,5 л/хв. Концентрація перекису водню у водному розчині змінювалася в діапазоні від 0 до 20%. Тиск перед форсункою складав 20 МПа. Результати досліджень наведено на рис. 3.

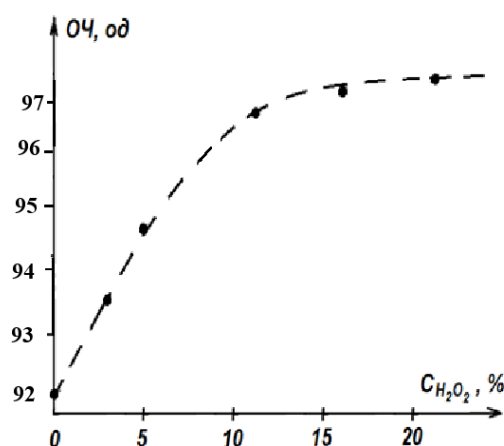


Рис. 3. Залежність октанового числа бензину (дослідницький метод) від концентрації перекису водню в водному розчині при співвідношенні бензин - розчин перекису водню 10:1

Суміш бензину і розчину перекису водню, що не прореагувала, збирають у збірнику та після відстоювання розділяють. Бензин піддають хроматографічному аналізу.

З аналізу залежності, яку наведено на рис. 3, можна зробити висновок, що додавання до бензину, що подається в кавітаційний реактор, водного розчину перекису водню з концентрацією до 10% призводить до суттєвого збільшення октанового числа. Таким чином вдалося підвищити цей показник до 98 одиниць. Подальше збільшення концентрації перекису водню не призводить до подальшого суттєвого збільшення октанового числа октанового числа.

Аналіз наведених даних дозволяє стверджувати, що в наслідок кавітаційної обробки бензину А-92 у присутності перекису водню в бензині утворюється метанол та толуол. Крім того, відбувається процес часткової ізомеризації алканів. Все це призводить до збільшення октанового числа бензину на 3-6 одиниць. Отже пряму конверсію алканів ряду C_5 – C_{10} (бензинів) в метанол можна розглядати як спосіб підвищення якості моторних палив. Це доказує правильність розробленого у [3] теоретичного обґрунтування процесу взаємодії алканів з гідроксильним радикалом.

Цікавим є той факт, що при кавітаційній обробці зміни відбуваються не у всіх групах складових частин бензину й більш того усередині однієї групи зміни відбуваються не у всіх гомологів.

Для підвищення реакційної здатності системи застосовували спирти різної будови: біоетанол (C_2H_5OH), ізопропанол (C_3H_7OH) та н-бутанол (C_4H_9OH), що дозволяло дослідити вплив як молекулярної маси, так і розгалуженості на ефективність кавітаційної модифікації.

Спирти (біоетанол, ізопропанол) виконують подвійну роль — підвищують октанове число як компоненти суміші та впливають на хімічні шляхи реакцій, стабілізуючи радикальні проміжні сполуки.

На рис.4 показана залежність октанового числа бензину А-92 від концентрації біоетанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці.

Графік залежності октанового числа бензину А-92 від концентрації етанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці має характерну вигнуту форму (параболічний тип кривої). На початку (0–2% об. етанолу): приріст октанового числа майже лінійний і помітний, оскільки навіть малі дози етанолу мають високе власне RON. Середні концентрації (6–10% об.):

крива виходить на максимум. Для етанолу оптимум зміщується дещо далі, ніж для ізопропанолу: зазвичай у діапазоні ~9–10% об. спостерігається пік. Високі концентрації (>10% об.): ефект приросту RON стабілізується або починає знижуватися. Це зумовлено зростанням вмісту кисню в суміші, впливом на теплоутворення та парціальні характеристики горіння. Пік для бензину А-92 із етанолом після гідродинамічної кавітаційної обробки становить приблизно: концентрація етанолу: ~9–10% об, приріст октанового числа: близько +2.5...3.0 пунктів RON (залежно від умов експерименту). За результатами досліджень можна зробити висновок, що гідродинамічна кавітація покращує диспергування та мікрозмішування етанолу в бензині. Це дає більш стабільну та однорідну паливну суміш, що підсилює антидетонаційний ефект. Завдяки цьому навіть менші концентрації етанолу працюють ефективніше, ніж у звичайному змішуванні.

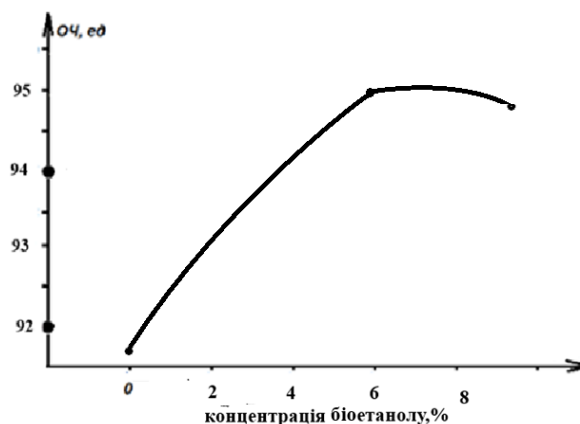


Рис. 4. Графік залежності октанового числа бензину А-92 від концентрації біоетанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці

На рис.5 показана залежність октанового числа бензину А-92 від концентрації ізопропанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці.

Графік показує, що за збільшення частки ізопропанолу приріст октанового числа (RON) спершу зростає швидко, досягаючи максимуму за ~7–8% об. Після піку ефект поступово зменшується (при 10–12% об. приріст уже нижчий, ніж на максимумі). Це можна пояснити тим, що ізопропанол — кисневмісний компонент із високим власним RON і від'ємною чутливістю; кавітація покращує диспергування та мікрозмішування, сприяє утворенню стабільніших мікрофаз, тому антидетонаційний ефект посилюється. За більших концентрацій

з'являються зони спадної віддачі (перенасичення кисневмісним компонентом, зміни теплотворності, леткості, чутливості), тож приріст RON спадає. З практичних досліджень можна зробити висновок, що для А-92 з кавітаційною обробкою оптимальний діапазон ізопропанолу — близько 7–8% об.; вище — зменшення вигоди та можливі побічні ефекти (леткість, холодні властивості, сумісність із матеріалами).

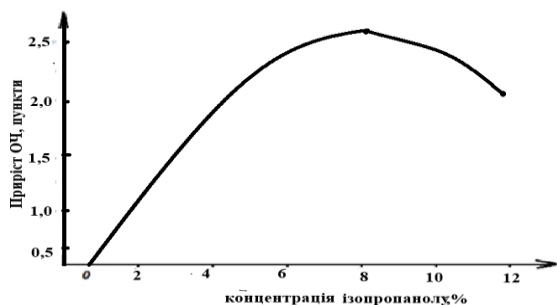


Рис. 5. Графік залежності октанового числа бензину А-92 від концентрації ізопропанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці

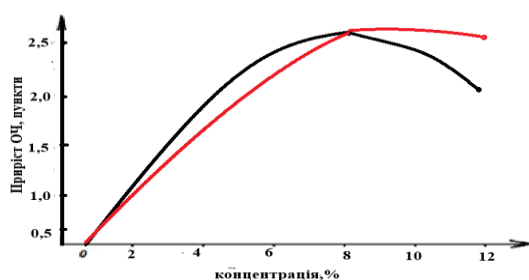


Рис. 6. Порівняння впливу ізопропанолу та біоетанолу на октанове число бензину А-92

При порівнянні впливу біоетанолу та ізопропанолу для бензину А-92 з кавітаційною обробкою можна зробити висновок, що ізопропанол: оптимум близько 7.9% об., приріст ~2.6 п. RON, біоетанол: оптимум зсунений далі — ~9.2% об., приріст ~2.6 п. RON.

Це означає, що: ізопропанол ефективніше підвищує RON на нижчих концентраціях, даючи швидкий приріст. Етанол має схожий максимальний ефект, але його пік зсувається до вищої концентрації.

Зростання вимог до якості моторних палив і посилення екологічних норм стимулюють пошук технологій, що дозволяють підвищувати октанове число бензинів без застосування токсичних ароматичних присадок та складних нафтохімічних процесів. Одним із перспективних методів є гідродинамічна кавітація — процес утворення та колапсу

кавітаційних бульбашок у рідині, що супроводжується локальними високими тисками, температурами та інтенсивним мікрозмішуванням.

Дослідження показують, що поєднання ГДК з додаванням кисневмісних агентів (біоетанол, ізопропанол, перекис водню) дозволяє ефективно підвищувати октанове число бензину А-92. Механізм впливу гідродинамічна кавітація є в тому, що кавітаційні імпульси забезпечують ультрадисперсне змішування, зменшення фазової сегрегації та підвищену стабільність паливних композицій. Вони мають високе власне октанове число та сприяють покращенню процесів згоряння завдяки наявності в молекулі кисню. Синергетичний ефект полягає в тому, що сумісне використання гідродинамічної кавітації і агентів дозволяє досягати вищого приросту октанового числа при менших концентраціях добавок.

Зробимо порівняльний аналіз агентів. Біоетанол має RON ~108, біогенне походження, відновлюваний ресурс. Оптимум біоетанолу складає ~9–10% об., приріст RON до +3 пунктів. Переваги біоетанолу це доступність, зниження викидів CO і CH, інтеграція у програми відновлюваної енергетики. Також є й недоліки: гігроскопічність, ризик фазового розшарування при зберіганні. Ізопропанол має RON >100, є продуктом нафтохімії або бродіння. Оптимумальне збільшення октанового числа ~7–8% об., приріст RON до +2.6 пунктів. Перевагами ізопропанолу є ефективність використання при нижчих дозах, добра розчинність у бензині. Але в Україні обмежене виробництво ізопропанолу та є потреба в імпорті. Перекис водню (H₂O₂) є сильним окисником, водночас нестабільний у паливних сумішах. Оптимальна кількість 15–20% об., зріст октанового числа до 8 пунктів. Але має недоліки: швидкий розклад, утворення води, ризики корозії.

Розглядаючи гідродинамічну кавітацію з позицій промислової доцільності, насамперед варто акцентувати увагу на тому, що обладнання для реалізації цього процесу істотно простіше за конструкцією, ніж традиційні каталітичні установки, які вимагають складних систем контролю та високотемпературних режимів. Кавітаційні реактори, у свою чергу, не лише компактніші й технологічно менш вибагливі, але й у багато разів дешевші за ультразвукові аналоги, що забезпечує їм значну перевагу при масштабуванні виробництва. Така доступність

відкриває можливість інтеграції технології навіть у відносно невеликі нафтопереробні комплекси, для яких капітальні інвестиції у складні системи є економічно невиправданими.

Ще одним вагомим аргументом на користь гідродинамічної кавітації є її виняткова енергоефективність. Середні енерговитрати становлять лише 0.1–0.3 кВт·год на 1 м³ обробленої паливної суміші, що у 3–5 разів менше порівняно з традиційними методами механічного диспергування. Така економія електроенергії набуває особливого значення в умовах зростання тарифів і підвищеної уваги до енергетичної незалежності, адже дозволяє не тільки зменшити собівартість виробництва, але й мінімізувати вуглецевий слід паливних підприємств.

Важливою складовою економічної доцільності є й можливість відмови від дорогих нафтохімічних присадок, зокрема метил-трет-бутилового етеру (МТБЕ) та метилметакрилату (ММА), які традиційно використовувалися для підвищення октанового числа. Їхня заміна більш доступними кисневмісними агентами (біоетанол, ізопропанол), ефективність яких значно зростає за рахунок кавітаційної обробки, дозволяє істотно знизити витрати на виробництво кінцевого продукту без втрати його експлуатаційних характеристик.

Нарешті, слід підкреслити й екологічний вимір: впровадження технології гідродинамічної кавітації в поєднанні з використанням відновлюваної сировини (зокрема біоетанолу) сприяє скороченню викидів токсичних ароматичних сполук та продуктів неповного згоряння. Таким чином, економічні вигоди доповнюються екологічними дивідендами, що особливо важливо в умовах посилення міжнародних стандартів та регуляторних обмежень у сфері пального.

Серед спектра можливих кисневмісних агентів, які розглядаються в контексті поєднання з гідродинамічною кавітацією, біоетанол виступає найбільш реалістичним і стратегічно виправданим вибором. Його переваги зумовлені не лише високими антидетонаційними властивостями та екологічним походженням, а й політико-економічним контекстом: на тлі розвитку біоенергетики в Європейському Союзі та активної нормативної підтримки відновлюваних джерел енергії застосування біоетанолу як паливної добавки органічно вписується у сучасну парадигму «зеленої» трансформації. Це означає, що впровадження такої технології не

тільки покращує якість пального, але й сприяє гармонізації з європейськими стандартами та відкриває доступ до міжнародних ринків.

Кавітаційно-допоміжна обробка з H₂O₂ та спиртовими добавками є перспективним методом підвищення октанового числа моторних палив. Її переваги полягають у можливості досягати значних структурних змін при нижчих енергетичних витратах та скороченні використання дорогих присадок.

Література

1. Buyevich, Y., et al. Current State of Research on the Mechanism of Cavitation Effects in the Treatment of Liquid Petroleum Products—Review and Proposals for Further Research. *Fluids* 2020. 5(2), 73 <https://doi.org/10.3390/fluids5020073>.
2. Suslick, K.S., Sonochemistry. *Science* 1990. 247(4949), 1439–1445. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1439>.
3. Rajoriya, S., et al., Industrial applications of hydrodynamic cavitation: A review. *Ultrasonics Sonochemistry* 2016. 36, 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.005>.
4. Shibata, Y., et al. On-Demand Octane Number Enhancement Technology by Aerobic Oxidation. *SAE Technical Paper* 2016. 2016-01-2167. <https://doi.org/10.4271/2016-01-2167>.
5. Thanapimmetha, A., et al., Biodiesel production from waste cooking oil using hydrodynamic cavitation: Effects of operating parameters and process intensification. *Renewable Energy* 2019. 133, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.040>.
6. Patil, P.N., et al. Intensification of esterification of waste cooking oil using a hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry* 2014. 21(2), 590–595. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.014>.
7. Tselishchev, A. Research of change in fraction composition of vehicle gasoline in the modification of its biodethanol in the cavitation field / Loriya, M., Boychenko, S., Kudryavtsev, S., Laneckij, V. // *EUREKA, Physics and Engineering* 2020(5), c. 12–20

References

1. Buyevich, Y., et al. Current State of Research on the Mechanism of Cavitation Effects in the Treatment of Liquid Petroleum Products—Review and Proposals for Further Research. *Fluids* 2020.5(2), 73 <https://doi.org/10.3390/fluids5020073>.
2. Suslick, K.S., Sonochemistry. *Science* 1990. 247(4949), 1439–1445. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1439>.
3. Rajoriya, S., et al. Industrial applications of hydrodynamic cavitation: A review. *Ultrasonics Sonochemistry* 2016. 36, 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.005>.
4. Shibata, Y., et al., 2016. On-Demand Octane Number Enhancement Technology by Aerobic

- Oxidation. SAE Technical Paper 2016-01-2167. <https://doi.org/10.4271/2016-01-2167>.
5. Thanapimmetha, A., et al., Biodiesel production from waste cooking oil using hydrodynamic cavitation: Effects of operating parameters and process intensification. *Renewable Energy* 2019. 133, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.040>.
 6. Patil, P.N., et al. Intensification of esterification of waste cooking oil using a hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry* 2014. 21(2), 590–595. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.014>.
 8. Tselishchev, A. Research of change in fraction composition of vehicle gasoline in the modification of its biodethanol in the cavitation field / Loriya, M., Boychenko, S., Kudryavtsev, S., Laneckij, V. // *EUREKA, Physics and Engineering* 2020(5), S. 12–20.

Serhiienko D.V., Tselishchev O.B., Kudryavtsev S.O., Loriya M.G. Cavitation treatment of mixtures of linear alkanes with hydrogen peroxide and auxiliary agents as a method for increasing the octane number of motor fuels.

The paper presents the results of a study on the use of cavitation treatment of mixtures of linear alkanes with hydrogen peroxide and alcohol co-agents to increase the octane number of motor fuels. Cavitation, accompanied by the formation and collapse of vapour bubbles in a liquid, creates localised zones with extreme temperatures (10^3 – 10^5 K) and pressures (up to 100 MPa), in which radical reactions, isomerisation, cracking and the formation of oxygen-containing compounds occur. The introduction of H_2O_2 into the system leads to the formation of hydroxyl radicals ($\bullet OH$), which are capable of initiating the activation of inert alkanes and promoting their structural transformations. Alcohols, in particular bioethanol and isopropanol, act as both high-octane components and modifiers of radical processes, increasing the selectivity of the formation of desired products. Experimental data show that cavitation treatment with hydrogen peroxide H_2O_2 provides an octane number increase of 1.3–3.5 RON, with

isopropanol provides an octane number increase of 0.3–0.9 RON, and with bioethanol — up to 2.6 RON, with optimal alcohol concentrations of 1.0%, 3.5% and 6.5% by volume.

The combination of cavitation with additives reduces alcohol consumption by 14–17% for A-95 and A-98 fuel grades compared to mechanical mixing. The industrial prospects for implementation have been analysed, in particular the advantages of hydrodynamic cavitation in terms of cost and energy efficiency, as well as the existing limitations — the need to optimise process parameters, control the formation of by-products, prevent equipment erosion and refine isomerisation mechanisms. Areas for further research are proposed, including detailed parameter mapping, assessment of long-term fuel stability, and scaling of the process to an industrial level. The results confirm the technical and economic feasibility of the technology as an alternative or supplement to traditional methods of increasing the octane number.

Keywords: cavitation, octane number, hydrogen peroxide, radical chemistry, isomerisation, motor fuels.

Сергієнко Дмитро Васильович – аспірант факультету інженерії Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, sergienko_dmitri@ukr.net

Целішев Олексій Борисович – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, celishev@snu.edu.ua

Кудрявцев Сергій Олександрович – к.т.н., доцент, декан факультету інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, kudryavcevev@snu.edu.ua

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua

Стаття подана 10.10.2025.