

УДК 665.73

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/24>**Ярошевич М.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Соломаха А.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОДО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ ДЛЯ ПЕРЕВЕДЕННЯ ПОБУТОВИХ КОТЛІВ НА АЛЬТЕРНАТИВНІ ВИДИ ПАЛИВА

Відомо, що додавання води до крапель палива призводить до швидкого збільшення площі поверхні рідкого палива. Це, в свою чергу, призводить до збільшення швидкості випаровування палива та утворення однорідної пароповітряної суміші палива. Останнє важливо для підвищення ефективності технології згорання, в тому числі тих, що використовуються в камерах згорання побутових котлів. Застосування водо-паливної емульсії у водогрійних котлах як основний вид палива дозволяє зменшити споживання сірчистих мазутів, тим самим захистити навколишнє середовище від викидів оксидів сірки та азоту та скоротити використання традиційного палива. Дослідження показали, що вміст води в емульсії сильно впливає на температуру полум'я, виділення тепла полум'я та ефективність горіння. У статті зазначені основні переваги використання водоемульсійної суміші в якості палива, перераховані способи отримання водо-паливних емульсій, що найвірогідніше можуть бути використані в промисловому виробництві: механічний, ультразвуковий, хімічний, тощо; детальніше розглянуто один з таких методів як пріоритетний для використання в подальшому дослідженні. Описано експериментальний стенд та методику визначення теплопродуктивності водогрійного котла малої потужності. Актуальність теми зумовлена посиленою необхідністю в підвищенні надійності та незалежності енергосистеми України. Переведення котлів малої потужності на альтернативні види палива дозволить впровадити в серійне виробництво лінію побутових котлів на водо-паливній емульсії. В статті зроблено огляд існуючих досліджень щодо впливу складу та дисперсності на процеси горіння суміші в камері згорання та теплопродуктивність паливних пристроїв. Метою дослідження є розробка експериментального стенду та методу розрахунку ефективності котла для різних видів та складу палива.

Ключові слова: водо-паливна емульсія, водогрійний котел, дизельне паливо, дисперсність, мікрровибух, теплопродуктивність, альтернативне паливо.

Постановка проблеми. В умовах російсько-української війни критичне значення для забезпечення функціонування енергосистеми України має незалежність та раціональне використання паливних ресурсів. Це спрямувало дослідницькі програми на впровадження нових методів і методологій, які забезпечують раціональне споживання палива, утримують низькі рівні викидів та зменшують залежність від імпорتنих енергоресурсів. Одним із перспективних напрямків вирішення спалювання важких обводнених вуглеводнів є застосування водоемульсійних палив (ВЕР). Водно-дизельні емульсії отримують гомогенізацією дизельного палива з водою для рівномірного розподілу однієї дисперсної фази в іншій безперервній фазі. Експериментальні випробування показали, що використання оптимальних умов

емульсійного палива може ефективно зменшити забруднення дизельного двигуна та покращити якість повітря за рахунок зменшення викидів оксидів азоту (NOx) і твердих частинок (ТЧ) [1]. Стійкість та ефективність горіння такої паливної емульсії значно буде залежати від наявної кількості та дисперсності води у ВЕР.

Водно-дизельна емульсія є доволі перспективним напрямком в галузі енергетики, особливо враховуючи прагнення до зменшення кількості шкідливих для екології викидів. Це потребує додаткових досліджень і експериментів у лабораторії щоб детально знати, яка найкраща оптимізація відсотка води та типу поверхнево-активної речовини. Використання альтернативного палива є обов'язковим, оскільки сьогодні у світі споживається набагато більше викопного палива.

Іншою причиною є проблеми з навколишнім середовищем, оскільки забруднення та зміни клімату загрожують екосистемі землі. І, звісно, загострюється проблема безпеки та працездатності найпотужнішої в Європі Запорізької АЕС, яка покрила потужності виробництва електрики взимку 2022–2023 року.

Хоча технологія водно-дизельної емульсії ще не комерціалізована, вона має потенціал, щоб задовольнити енергетичні потреби різних важливих секторів, наприклад транспорту, генерації теплової та електричної енергії, використовуючи комбіновані паливні ресурси та зменшуючи забруднення.

Сьогодні такі технології емульгування та параметри ВЕП ще недостатньо вивчені, тому мають велике наукове та практичне значення. Проведений аналіз теорії, які описують вплив дисперсності та кількості води у емульсії на показники горіння, показує, що вони є суперечливими [1]. Отримання різних результатів зумовлено різноманітністю початкових характеристик розглянутих речовин: складу, в'язкості, температури та ін. Автори проводили дослідження при різних режимах обладнання, склад палива в кожному окремому випадку відрізнявся [1, 2]. Очевидно, що у кожному випадку буде різна оптимальна «поверхня» співвідношень розмірів крапель води і її кількості у ВЕП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ВЕП – це система, що складається з двох рідких фаз, одна з яких диспергована у вигляді крапель в іншу [1]. Рідина, яка роздроблена на краплі, називається дисперсною фазою, а рідина, у якій знаходяться ці краплі, називається дисперсійним середовищем. Дві рідини, наприклад, мастило (М) та вода (В), можуть утворювати два види емульсії: мастило у воді (М/В) – пряму емульсію, і вода в мастилі (В/М) – зворотну [1]. Найбільше практичне значення мають зворотні емульсії. Тому, в подальшому під терміном «емульсія» чи «паливна емульсія» (ПЕ) матиметься на увазі – зворотна емульсія.

При спалюванні ВПЕ необхідно враховувати як її вид, так і дисперсні характеристики одержуваної емульсії. Автори роботи [3] вважають, що оптимальною є вологість на рівні до 12%, після досягнення якої слід обмежувати кількість води, що диспергується до палива. Під оптимальною вологістю ВПЕ розглядається вологість, що забезпечує мінімальний вихід сажистих частинок [3]. Але ця вологість не завжди є оптимальною з точки зору економічних показників роботи паливного

агрегату. Крім того, у цьому випадку не вдається зменшити вихід інших канцерогенних речовин (NOx, SOx), змінити корозійні властивості димових газів.

Концентрація NOx має максимум в області розмірів дисперсної фази 35...43 мкм (мінімальні концентрації сажистих частинок відповідають максимальному значенню концентрацій NOx), що пояснюється деяким збільшенням температури факела за рахунок інтенсифікації процесу горіння при найбільшому числі мікробухів крапель ВПЕ. При великих розмірах дисперсної фази відбувається зниження температури факела внаслідок баластування зони активного горіння парами води.

Одним із методів зменшення викидів NOx є зниження температури полум'я горіння, що, з іншого боку, призводить до того, що баланс між утворенням сажі та вигоранням схиляється до збільшення викидів твердих частинок.

Однак викиди твердих часток можна зменшити, перешкоджаючи їх утворенню шляхом кращого змішування палива та покращуючи їх окислення шляхом підвищення температури згорання, що призведе до збільшення викидів NOx. Таким чином, потрібен ретельний баланс для досягнення повного згорання при помірній температурі полум'я, якщо обидва (NOx і твердих частинок) мають бути зменшені одночасно. Одним із способів подолання цієї дилеми є заміна чистого дизельного палива водно-дизельними емульсіями як альтернативним паливом.

Водоемульсійне паливо впливає на зміни температури камери згорання та процеси згорання, що, у свою чергу, впливає на зниження обох викидів. У камері згорання відбувається два важливих процеси, а саме зниження температури згорання та явище мікробуху [4].

1. Вода в емульсійному паливі, яке подається в камеру згорання, викликає зниження температури.

Вода має нижчу температуру кипіння, ніж дизельне паливо. В результаті вода в емульсійному паливі поглинає додаткове тепло і знижує температуру [4]. З іншого боку, рівень температур у камері згорання впливає на утворення викидів NOx. Таким чином, водоемульсійне паливо призводить до зниження температури в камері згорання та призводить до зменшення викидів NOx.

2. Явище мікробуху

Мікробух краплі палива, емульшованої часткою води, відбувається через швидке випаровування водної фази, що розбиває краплю емульсії на так звані «вторинні краплі». Суть цього явища полягає в тому, що крапля розпиленої емульсії

складається з частинок палива, всередині яких знаходяться одна або кілька мікрокраплин води. При горінні дизельного палива процес відбувається при тисках, що перевищують критичні тиски всіх вуглеводнів, що входять до складу дизельного палива. [5]. Мікрочастинки води швидше перетворюються на пароподібний стан, ніж паливо, в якому вони знаходяться. У процесі випаровування, коли тиск водяної пари перевищить сили поверхневого натягу плівки палива, станеться руйнування краплі у вигляді вибуху. В результаті цього краплі емульсії дробляться на більш дрібні частинки, що забезпечує краще сумішоутворення (рис. 1).

Окрім цього, мікробибух полегшує процес змішування, що, у свою чергу, зменшує час реакції [6].

Мікробибух є важливим явищем у процесі вторинного розпилення емульсійних палив. Як правило, на це явище впливає летючість основного палива, тип емульсії, вміст води, діаметр диспергованої рідини, розташування диспергованої рідини та умови навколишнього середовища, такі як тиск і температура.

Існує кілька способів отримання водо-дизельної емульсії [7]:

1. Механічний спосіб: цей метод використовує механічну силу для змішування дизельного палива та води з допомогою спеціальних змішувальних пристроїв, таких як міксери. Цей процес може відбуватися в спеціальних контейнерах або прямо в паливному баку транспортного засобу.

2. Ультразвуковий спосіб: ультразвукові пристрої використовуються для створення високочастотних звукових хвиль, які сприяють змішуванню води та дизельного палива. Цей метод є швидким і ефективним, дозволяючи отримати стабільну емульсію з високою якістю змішування.

3. Хімічний спосіб: хімічні домішки, відомі як емульгатори, додаються до дизельного палива та води для поліпшення їх змішування. Емульгатори допомагають знизити поверхневе натягування між водою та паливом, що дозволяє створити стабільну емульсію. Цей метод зазвичай використовується на промислових об'єктах.

4. Утворення емульсії з використанням спеціальних пристроїв: деякі спеціальні пристрої, такі як емульсифікатори і диспергатори, можуть використовуватися для створення водо-дизельної емульсії. Вони створюють високу швидкість змішування між водою та паливом, що сприяє формуванню емульсії з більш стабільними характеристиками.

Одним зі способів отримання водо-дизельної емульсії є кавітація. Кавітація – це фізичний процес, при якому утворюються та руйнуються мікроскопічні газові бульбашки в рідині під дією зміни тиску. Утворення та колапс бульбашок кавітації створюють потужні ударні хвилі, які можуть призвести до змішування та емульгування двох фаз. Процес отримання емульсії кавітацією зазвичай включає такі кроки [11]:

1. Підготовка розчину: розчин, який складається з двох фаз, піддається попередньому змішуванню та приготуванню.

2. Кавітація: спеціальний кавітаційний пристрій, такий як кавітаційний апарат або ультразвуковий кавітаційний генератор, використовується для створення кавітаційних бульбашок у розчині. Зміна тиску та вібрація пристрою призводять до утворення та руйнування бульбашок, що призводить до мікроскопічного змішування фаз.

3. Формування емульсії: в результаті кавітації розчин перетворюється на емульсію, де дві фази розподілені одна в одній у вигляді дрібних крапель або часток.



Рис. 1. Процес мікробибуху у водоемульсійному паливі

Важливо враховувати, що процес отримання емульсії кавітацією може вимагати оптимізації параметрів, таких як температура, тиск, частота ультразвуку або інші параметри залежно від конкретних умов та властивостей фаз, які підлягають емульгуванню [7].

Зважаючи на той факт, що емульсія використовується як паливо в дизельних двигунах, рекомендується, щоб вона була стабільною. Це можна реалізувати за допомогою відповідних поверхнево-активних речовин. Поверхнево-активні речовини повинні легко горіти без сажі та без вмісту сірки та азоту. Крім того, вони не повинні впливати на фізико-хімічні властивості палива. Зазвичай кількість поверхнево-активних речовин, що вводиться в процес емульсії, знаходиться в діапазоні 0,5–5% за об'ємом [7].

Вплив поверхнево-активної речовини на характеристики емульсії вода-в-дизелі, що стосується згорання та викидів, описаний в деяких джерелах [8]. В роботі [9] досліджували емульсію «вода-в-дизелі» зі звичайними поверхнево-активними речовинами (сорбітан-моноолеат) і поверхнево-активними речовинами Gemini для основних викидів забруднюючих речовин. Дослідження були проведені на випробувальному стенді з чотиритактним чотирициліндровим двигуном, і дійшли висновку, що для 15% вмісту води вдається на 71% зменшити викиди твердих частинок із поверхнево-активною речовиною Gemini у дизельному емульсійному паливі [9].

Існує два типи техніки емульгування, а саме двофазна (іноді її називають первинною) і трифазна емульсія (іноді її називають багатофазною або вторинною емульсією), яка включає складні емульсії з більш ніж трьома рідкими інгредієнтами. Двофазна емульсія складається з однієї суцільної фази та рідин з однодисперсною фазою, тоді як трифазна емульсія складається з однієї суцільної фази та двох або більше рідин з дисперсною фазою [10].

Дві рідини повинні бути незмішуваними або взаємно нерозчинними одна в одній. Щоб диспергувати одну рідину в іншу, слід застосувати достатнє перемішування. Може бути присутнім емульгатор (поверхнево-активна речовина) або комбінація емульгаторів. Поверхнево-активні речовини, що використовуються для утворення емульсії вода-в-дизельному паливі, повинні легко горіти без сажі та не містити сірки та азоту, як описано в [8]. Крім того, вони не повинні впливати на фізико-хімічні властивості палива. Поверхнево-активні речовини з сімейства аліфатичних вугле-

воднів є найкращими кандидатами для використання в якості емульгаторів. Зазвичай кількість поверхнево-активних речовин, що використовуються для емульгування, знаходиться в діапазоні 0,5–5% за об'ємом, оскільки збільшення концентрації поверхнево-активної речовини знижує стабільність емульсії.

Постановка завдання. Метою статті є опис методики визначення теплопродуктивності котла при спалюванні водно-дизельної емульсії на створеному експериментальному стенді.

Методика дослідження. Принцип вимірювання наочніше показати на схемі підключення котла для теплотехнічного випробування на рисунку 2. Вимірювання та обробки дослідних величин буде проведено на базі ДСТУ 3948-2000 [12].

На схемі наведено:

- систему відведення тепла, яке генерує котел;

- систему відведення продуктів згорання від котла.

Система відведення тепла, яке генерує котел, складається з циркуляційного насоса, теплообмінника, з'єднувальних трубопроводів, обладнаних запірною-регулювальною арматурою, та засобу для вимірювання витрат води через водяну порожнину котла.

Теплообмінник, призначений для охолодження води, нагрітої в котлі, може бути поверхневого або змішувального типу. На рисунку 1 показано теплообмінник поверхневого типу.

Схема відведення продуктів згорання від котла складається з димососа, газоходів, обладнаних дросельною затулкою для регулювання розрідження за котлом.

Вимірювання розрідження за котлом, температури продуктів згорання, що відводяться від котла, а також відбирання проб цих продуктів для аналізу здійснюють на ділянці газоходу, призначеній для вимірювання і наведеній на рисунку 2. Газохід повинен мати поперечний перетин, що відповідає приєднувальному патрубку котла [12].

В котел подається паливо з початковими параметрами та складом. Температура всередині котла вимірюється поверхневою термопарою в комплексі з автоматичним потенціометром (7 та 11). Температура та склад продуктів згорання вимірюються на прямій ділянці газоходу газоаналізатором 8 та термопарою 9.

Система відведення тепла, яке генерує котел, складається з циркуляційного насоса 4, теплообмінника 3 (в нашому випадку поверхневого типу), з'єднувальних трубопроводів, обладнаних

запірно-регулювальною арматурою 5, та засобу для вимірювання витрат води 2 через водяну порожнину котла. Температура води на вході на та виході з котла вимірюється термометрами 6.

Випробування проводимуться при вмісті води у ВЕП від 0% до 70% за ДСТУ 3948-2000 за наступною методикою.

Випробування виконують за номінальної теплопродуктивності котла та оптимальних значень розведення продуктів згоряння і розрідження за котлом. Їх визначають під час налагоджувального випробування і встановлюють відповідними органами керування паликових пристроїв та дросельної затулки в системі відведення продуктів згоряння. Витрати рідкого палива під час випробування визначають з проміжком не більше 15 хв. Тривалість випробування котла в стаціонарному режимі повинна бути не менше 2 год [12].

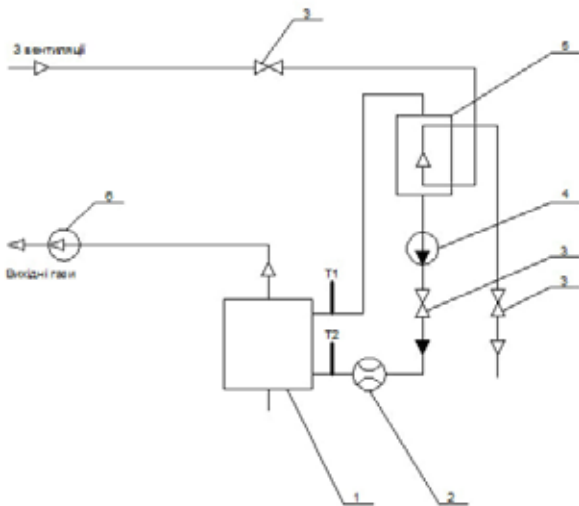


Рис. 2. Схемі підключення котла для теплотехнічного випробування: 1 – котел; 2 – засіб вимірювання витрат палива; 3 – крани; 4 – циркуляційний насос; 5 – теплообмінник «повітря-вода»; 6 – термометр

Після досягнення стаціонарного режиму роботи водонагрівача через проміжки часу, що не перевищують 15 хв, здійснюють вимірювання витрат води через водонагрівач і температур води на вході у водонагрівач і на виході з нього. Три-

валість випробування водонагрівача в стаціонарному режимі повинна бути не менше 1 год [12].

Опрацювання результатів вимірювань. Для дослідження планується обчислити теплопродуктивність котла для кожного складу з відсотковим вмістом води в емульгованому паливі від 0 до 70%, вивести математичну залежність та визначити оптимальні робочі параметри з огляду на техніко-економічні показники.

Номінальна теплопродуктивність котла Q_k , в кіловатах, для котлів на рідкому паливі, дорівнює:

$$Q_k = Q_v \quad (1)$$

де Q_v – складник теплопродуктивності котла, обумовлений відведенням тепла водою, кВт, і визначається за формулою:

$$Q_v = 0,00116 \cdot G_v \cdot (t_r - t_x), \quad (2)$$

де G_v – витрати води через котел, кг/год;
 t_r – температура води на виході з котла, °С;
 t_x – температура води на вході в котел, °С.

Обчислення витрат палива

Витрати рідкого палива B , у кілограмах, обчислюють за формулою:

$$B = \frac{3600 \cdot M}{\tau_3}, \quad (3)$$

де M – маса рідкого палива, спаленого в котлі за час випробування, кг;
 τ_3 – тривалість випробування, год.

Висновки. В роботі виконано аналіз наявних літературних джерел щодо використання водопаливної емульсії «вода-дизель», який показав перспективність використання подібного палива для України. Перспективним варіантом приготування палива є підготовка емульсії за допомогою кавітаційної обробки з подальшою стабілізацією емульсії поверхнево активною речовиною. На основі отриманих даних було зроблено принципову схему для дослідження процесу спалювання палива в стандартному котлі з можливістю вимірювання основних параметрів роботи установки, а саме температур, витрат, складу продуктів згоряння та ін. Розроблено методику для обрахунку основних характеристик апарату. В наступних статтях планується надати результати експериментальних досліджень отриманих, на описаному стенді.

Список літератури:

1. Мельник В. О. Аналіз складу та дисперсності паливних емульсій. *Нафтогазова енергетика*. 2020. (1(33)), 124–131.
2. El shenawy, E. A., et al. Investigation and performance analysis of water-diesel emulsion for improvement of performance and emission characteristics of partially premixed charge compression ignition (PPCCI) diesel engines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019, 36: 100546.
3. Саха, Д.; Синха, А.; Синха, А.; Рой, Б.; Мішра, Л. Вплив водно-дизельної емульгації на продуктивність і характеристики викидів CI Engine: огляд; Конспект лекцій з машинобудування; Springer: Cham, Швейцарія, 2022; частина F1; С. 95–107.

4. Wang, Z.; Cao, J.; Yuan, B.; Wang, Y.; Cheng, X. Effect of ambient temperature on the evaporation characteristics of water-in-oil emulsified diesel droplets. *K. Cheng Je Wu Li Hsueh Pao/J. Eng. Thermophys.* 2022, 43, 2256–2266.
5. Kadota, T.; Yamasaki, H. Recent Advances in the Combustion of Water Fuel Emulsion. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2002, 28, 385–404.
6. Ballester J, Dopazo C, Vidal P, Ojeda L. Large-scale laboratory experiments on pollutant emissions in heavy oil combustion, vol. 2. Gordon and Breach; 1995.
7. A. Sartomo, B. Santoso, Ubaidillah, O. Muraza, “Recent progress on mixing technology for water-emulsion fuel: A review”, *Energy Conversion and Management*, vol. 213, 2020, 112817.
8. Hamdan, M. O., Selim M., Al-Omari S.A., Elnajjar E., Ghannam M., “Effect of Stabilized Water-Diesel Emulsions on External Combustion Characteristics”, Paper No. HT2013-17027, ASME 2013 Summer Heat Transfer Conference, July 14-19, 2013, Minneapolis, Minnesota, USA. doi:10.1115/HT2013-17027
9. M. Nadeem, C. Rangkuti, K. Anuar, M. R. U. Haq, I. B. Tan, and S. S. Shah, “Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants,” *Fuel*, vol. 85, no. 14-15, pp. 2111–2119, 2006.
10. G. Chen and D. Tao, “An experimental study of stability of oil-water emulsion,” *Fuel Processing Technology*, vol. 86, no. 5, pp. 499–508, 2005.
11. Яо К., Чжао С., Лю Л., Лю З. та Чен Г. (2022). Ультразвукова емульгація: основні характеристики, кавітація, механізм, пристрої та застосування. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 16 (11), 1560-1583.
12. ДСТУ 3948-2000 «Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт. Методи випробування і контролю теплотехнічних показників».

Yaroshevych M.V., Solomakha A.S. PECULIARITIES OF USING WATER-FUEL EMULSION FOR CONVERTING HOUSEHOLD BOILERS TO ALTERNATIVE TYPES OF FUEL

It is known that adding water to fuel droplets leads to a rapid increase in the surface area of the liquid fuel. This, in turn, leads to an increase in the rate of fuel evaporation and the formation of a homogeneous vapor-air mixture of fuel. The latter is important for increasing the efficiency of combustion technologies, including those used in the combustion chambers of household boilers. The use of water-fuel emulsion in water-heating boilers as the main type of fuel allows to reduce the consumption of sulfur fuel oils, thereby protecting the environment from emissions of sulfur and nitrogen oxides and reducing the use of traditional fuels. Studies have shown that the water content of an emulsion strongly affects flame temperature, flame heat release, and combustion efficiency. The article indicates the main advantages of using a water-emulsion mixture as fuel, lists the methods of obtaining water-fuel emulsions that can most likely be used in industrial production: mechanical, ultrasonic, chemical, etc.; one of such methods is considered in more detail as a priority for use in further research. The experimental stand and the method of determining the heat output of a small-capacity water heating boiler are described. The relevance of the topic is due to the increased need to increase the reliability and independence of the energy system of Ukraine. The conversion of low-power boilers to alternative types of fuel will make it possible to introduce a line of household water-fuel emulsion boilers into serial production. The article provides an overview of existing research on the influence of composition and dispersion on the combustion processes of the mixture in the combustion chamber and the thermal efficiency of fuel devices. The purpose of the study is to develop an experimental stand and a method of calculating boiler efficiency for different types and composition of fuel.

Key words: water-fuel emulsion, water heating boiler, diesel fuel, dispersity, microexplosion, thermal productivity, alternative fuel.