

Original article

In print article

<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2025-43-05>

UDC 536.4, 662.61, 532.6

PACS numbers: 47.70-Pq, 47.55-D, 82.33-Vx

НОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ВИВЧЕННЯ ГОРІННЯ КРАПЕЛЬ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

М. О. Іванов , О. С. Черненко 

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, вул. В. Змієнка, 2, Одеса 65082, Україна

E-mail: teplophys@onu.edu.ua

Надійшла до редакції 05 жовтня 2025 р. Переглянуто 17 листопада 2025 р.

Прийнято до друку 20 листопада 2025 р.

На основі огляду відомих методів дослідження горіння крапель робиться висновок, що горіння емульсій супроводжується вищем мікроривбухів: поділом первинної краплі на вторинні. При цьому в залежності від інтенсивності підводу тепла можливий як невеликий викид матеріалу, так і руйнування краплі загалом. Використання емульсій важливе в напрямку зменшення викидів окислів азоту та збільшення повноти згорання рідкого палива. Метою цієї роботи є огляд власних методик дослідження горіння крапель емульсій, які мають ряд переваг.

У методі поруватої кульки описано нову методику проведення експрес-аналізу на швидкість вигорання рідини. Кулька, що змочена горючою рідиною, розміщується на спеціальній підставці на ваги. На залежності маси кульки від часу є лінійна ділянка, яка визначає швидкість горіння рідини. На відміну від існуючих методів, його перевагою є швидкість, повторюваність, використання малої кількості рідини та можливість швидко порівнювати швидкість горіння різних композиційних речовин, у тому числі емульсій.

Оригінальним методом є використання як електричного тригера виникнення мікроривбухів височастотного електричного розряду. Навіть невелика теплова потужність стримера достатня для спостереження пульсацій діаметра краплі емульсії в часі. Розглянута поведінка краплі емульсії вода-дизельне паливо (50%/50%), де вода має суттєво меншу температуру кипіння, ніж дизельне паливо. Стример, що проходить повз краплю на термопару, спочатку не встигає нагріти повністю всю краплю. Тому поблизу спаю утворюється парова бульбашка з водяних парів, яка розширюється, рухається від спаю термопар і лускається поблизу зовнішньої поверхні краплі. Це і призводить до викиду матеріалу емульсії (період пульсацій 10–25 мс). По мірі прогрівання всієї краплі, розширяться і лускатися будуть одночасно багато бульбашок, що призводить до появи більшої кількості мініпульсацій (2–3 мс).

У методі стаціонарної краплі реалізована постійна подача емульсії через голку всередині на порувату металеву частинку. Продемонстровано появу мікроривбухів на поверхні краплі, що горить. Вказана можливість використання височастотного електричного розряду при горінні емульсій з великим вмістом води (до 60%).

Ключові слова: випаровування, горіння, краплі, водопаливні емульсії, пульсації.

Як цитувати: М. О. Іванов, О. С. Черненко. Нові експериментальні підходи до вивчення горіння крапель водопаливних емульсій. Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія «Фізика». Вип. 43, 2025, 55–61. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2025-43-05>

In cites: M. O. Ivanov, O. S. Chernenko. New experimental approaches to studying the combustion of water-fuel emulsion droplets. Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Physics. Iss. 43, 2025, 55–61. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2025-43-05> (in Ukrainian).

ВСТУП

Водопаливні емульсії (ВПЕ) розглядають як перспективний вид альтернативного та екологічно безпечнішого палива для двигунів внутрішнього згорання, котлів та енергетичних установок. Наявність водної фази у складі палива здатна забезпечувати зниження температури горіння, зменшення утворення оксидів азоту та підвищення ефективності розпилення завдяки мікробибухам. ВПЕ дозволяють зменшити витрати основного палива, знизити рівень токсичних викидів, а також покращити процеси розпилення за рахунок внутрішніх фазових вибухів. Проте процеси випаровування та горіння емульсійних крапель залишаються складними, багатостадійними і значною мірою визначають технічну ефективність ВПЕ.

Ефективне розпилення багатоконпонентних рідин має вирішальне значення в різних промислових застосуваннях, таких як струменевий друк, фарбування розпиленням, нанесення покриттів і, що ще важливіше, автомобільні та газотурбінні двигуни [1, 2]. Краплі під дією додаткового теплопідведення можуть додатково фрагментуватися на вторинні краплі, що особливо важливо для емульсійних палив. Це пояснює використання емульсійних палив як альтернативних для камер згорання газових турбін та двигунів внутрішнього згорання завдяки їхнім перевагам у підвищенні ефективності згорання та зниженні викидів [3].

Типова емульсія вода-олія представляє собою дисперсну (краплі однієї незмішуваної рідини) та безперервну (іншу рідину) фази: обернена або пряма емульсія. Під час випаровування або згорання краплі емульсії температура краплі може зрости вище межі перегріву однієї з рідин. Так кипіння диспергованих субкрапель води призводить до утворення бульбашок пари в кількох місцях нуклеації [4]. Ці бульбашки можуть зливатися, рости та руйнуватися/розриватися, утворюючи вторинні краплі. Низько- або високоінтенсивне руйнування цих бульбашок із зародками призводить до часткового/повного руйнування первинної краплі на кілька вторинних крапель [5].

Наразі, завдяки експериментальним дослідженням та теоретичному моделюванню, широко визнано, що поведінка крапель емульсії вода-в-олії під час випаровування та горіння, в першу чергу, залежить від леткості та об'ємних часток складових елементів краплі [6]. Ймовірність та інтенсивність розпаду крапель зростають зі збільшенням концентрації води в краплі [7]. Різні дослідники чисельно змоделивали основні фізичні процеси, щоб отримати цінне розуміння поведінки крапель емульсії під час розпаду, використовуючи методи захоплення межі розділу. Їхні результати показали, що розмір та розташування

глобул води відіграють вирішальну роль у визначенні росту бульбашок та динаміки розпаду [8].

Ряд стандартних аналітичних та експериментальних методик визначення характеристик горіння індивідуальних горючих речовин не завжди можна застосувати для емульсійних палив. Тому розроблення нових підходів до дослідження горіння емульсійних крапель є важливою та своєчасною науковою задачею.

Наразі існує ряд класичних методів дослідження горіння окремих крапель. Найпростішим є метод підвішування краплі на кварцевому або металевому волокні (suspended droplet) [9]. Розміри крапель обмежуються діаметром 0.5–2.0 мм. Їх фіксують на тонкому волокні (кварцевому, вольфрамовому, сталевому). Підпалювання здійснюється лазером або пальником. Доволі просто досліджується стабільність процесу, зміна діаметра в часі та швидкість випаровування. Недоліком такого методу є вплив підвіски на теплоперенос та неможливість досліджувати дуже нестабільні емульсії.

Автори [10] розділили всю тривалість процесу горіння на чотири стадії, які мало змінювалися від співвідношення об'ємів води. Затримка займання монотонно збільшувалася з початковим діаметром краплі та співвідношенням об'ємів води. Збільшення співвідношення води підвищувало інтенсивність мікробибухів, тоді як підвищення температури краплі гальмувалося питомою теплоємністю та прихованою теплою води. Середня швидкість горіння зростала зі збільшенням початкового діаметра краплі. Однак, швидкість горіння несуттєво залежала від співвідношення об'ємів води.

Альтернативним методом є розташування краплі на ізольованій підкладці [11]. Так зручно досліджувати поширення фронту горіння на поверхні краплі. Він використовується для високо в'язких емульсій та для аналізу мікробибухів.

Іншою групою методів є методи з фіксацією крапель у повітрі, без контакту з іншими тілами: акустична або електростатична левітація краплі.

В акустичній левітації крапля утримується ультразвуковим полем [12]. Техніка акустичної левітації зазвичай створює стоячу хвилю, а потенційна яма звукового поля може бути використана для уловлювання невеликих об'єктів. Оскільки не задіяна тверда поверхня, можна точно вимірювати форму, швидкість випаровування, температуру.

Для ініціювання процесу горіння та інтенсифікації мікробибухів використовують методи високотемпературного нагрівання лазером (laser heating) або нагрітою поверхнею (500–1500) °С.

Одним із напрямків впливу на горіння дисперсних систем є вплив електричних розрядів. У роботі

розглянуто деякі оригінальні підходи до вивчення горіння емульсійних палив, що дозволяють вивчати особливості випаровування та горіння крапель водопаливних емульсій з різним вмістом води.

МЕТОД ПОРУВАТОЇ СФЕРИ

Відомим є ряд експериментальних та розрахункових методик визначення швидкості вигорання рідких індивідуальних палив. Насамперед це дослідження горіння в циліндричних ємностях різних діаметрів, де воно відбувається на плоскій поверхні. Однак при збільшенні діаметра ємності вище 15 см [13, 14] спостерігається «кисневе голодування», коли дифузія кисню не встигає рівномірно доставляти кисень. Наслідком цього є зменшення швидкості вигорання. Альтернативою «плоскому» вигоранню є горіння на сфері.

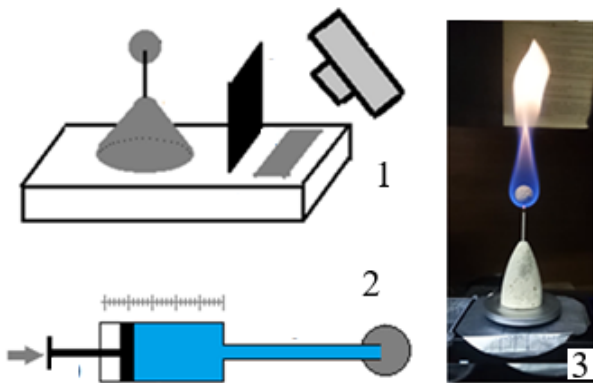


Рис. 1. Експериментальні установки для визначення швидкості вигорання рідких горючих методом «пористої сфери» (1) та «стаціонарної краплі» (2). Зовнішній вигляд «пористої сфери» (3), що горить змоченою горючою рідиною (етанолом).

Fig. 1. "Experimental setups for determining the burning rate of liquid fuels using the "porous sphere" (1) and "stationary droplet" (2) methods. External view of a "porous sphere" (3) burning while wetted with a liquid fuel (ethanol)."

Для визначення швидкості вигорання горючих рідких палив у вигляді крапель є ряд класичних методів: 1) падаючої краплі; 2) підвішеної краплі; 3) метод пористої сфери (стаціонарної краплі). У перших двох методах спостерігається зміна при горінні розміру краплі і, відповідно, зміна (зменшення) поверхні краплі. Характеристикою процесу є константа горіння K_{bur} (виражена, зазвичай, в одиницях m^2/c), яка залишається незалежною від початкового діаметра краплі.

У методі «пористої сфери» (стаціонарної краплі) поверхня горіння залишається сталою. Проте, для його

реалізації необхідно постійно підводити горючу рідину через певний канал всередину пористої сфери (рис. 1, установка 2). Сфера в найпростішому варіанті може бути виконана у вигляді скрученого в кульку металевого дроту. При цьому масова швидкість вигорання \dot{m} визначається масовою швидкістю подачі палива.

В одній із попередніх робіт авторів [15] була запропонована ще одна методика «пористої сфери» (рис. 1, установка 1), де площа горіння залишається незмінною. Кулька з керамзиту діаметром близько 10 мм опускалася в горючу рідину, де витримувалася ≈ 5 с для змочування. Згодом кулька на спеціальній легкій підставці (рис. 1) розміщувалася на електронних вагах (з точністю до ± 0.01 г). Після підпалювання газовим пальником на відеокамеру знімалися показання ваг через затемнюючий фільтр на дисплеї електронних ваг у часі $\Delta m(t)$.

Так, на рис. 2 представлені отримані залежності для піролізного палива з автомобільних покришок (П) та водних емульсій на його основі (з вмістом води 40% і 60%). На цій залежності спостерігається ділянка (більше половини загального часу горіння) з характерною лінійністю спаду маси. Поверхня випаровування пального зі зразка на цій ділянці залишається практично сталою.

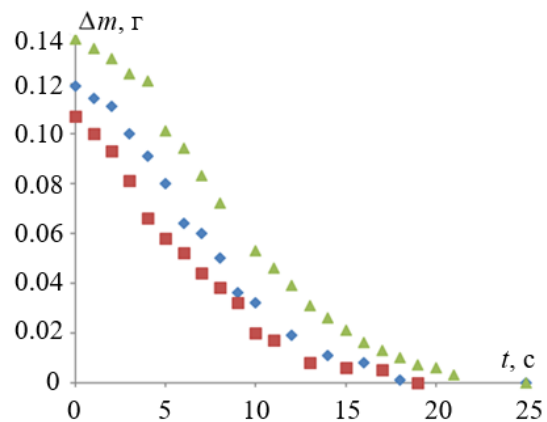


Рис. 2. Зміна маси краплі, змоченої горючою рідиною, при її горінні в часі: ▲ – П100, ● – П60В40, ■ – П40В60.

Fig. 2. Temporal variation of the mass of a droplet impregnated with a liquid fuel during combustion: ▲ – P100, ● – P60V40, ■ – P40V60.

Середній нахил кривих є 9.8, 8.6 і 8.0 мг/с, що свідчить про практично лінійне зменшення швидкості вигорання стосовно масової частки води ($Z_{води}$) в емульсії (в мг/с):

$$\dot{m} = 9.8 - 2.9Z_{води}.$$

Перевагою методу є порівняно швидке отримання результату без використання складних спеціальних інструментів при використанні малих об'ємів горючих рідин. Він забезпечує механічне утримання рідини на поверхні без введення додаткового теплового впливу, наприклад, термопари.

МЕТОД ДОДАТКОВОЇ ДІЇ ВИСОКОЧАСТОТНОГО РОЗРЯДУ

Як приклад було вибрано двофазні емульсії DW «дизель-вода» з часткою води 50%. Для змішування і емульгування використовувався ультразвуковий диспергатор УЗДН-1 на частоті 22 кГц. Поверхнево-активні речовини (ПАР) тут не використовувалися, що, зазвичай, дозволяє збільшити «життя» емульсії (час дестабілізації). Однак при технологічному спалюванні створена емульсія практично одразу подається на розпилювання в зону горіння. Тому можливий вплив ПАР тут не розглядався.

У нагрітому середовищі за рахунок прогрівання краплі доволі швидко виникає явище мікрровибуху: утворення і розширення парових бульбашок, що призводить до диспергування краплі на більш малі. Для вивчення особливостей процесу мікрровибуху, одразу після приготування краплю емульсії розміщували в повітрі кімнатної температури на тонку ХА термопару зі спаєм 0.5 мм [16]. Для ініціювання мікрровибуху на деякій відстані від краплі розміщували мідний електрод діаметром 150 мкм від мінігенератора Тесла. На краплю спрямовували височастотний розряд (з тепловою потужністю 0.25 Вт). Процес поведінки краплі знімали на відео, з якого методами покадрової цифрової обробки зображень в пакеті Matlab отримували залежність діаметра від часу.

Весь процес випаровування краплі при дії електричного розряду ділиться на два часові етапи. Перший – інертний розігрів. Другий – пульсаційний режим. У ньому розмір краплі з певною частотою періодично змінюється поблизу деякого середнього значення (рис. 3), яке з часом випаровування зменшується. Закон зміни середнього значення діаметра відповідає закону d^2 .

Якісна картина пульсацій на краплях емульсії змінюється в часі. Електричний стример діє через краплю на спай термопари. Через відносно погану теплопровідність емульсії, стример не встигає рівномірно прогріти весь об'єм краплі. Найінтенсивніше нагрівання спостерігається в ділянках, розташованих поблизу дії стримера та спаю термопари. Емульсія, яка вибрана об'єктом дослідження, складається з двох незмішуваних рідин, які суттєво відрізняються за температурою кипіння. Тому на межі поділу двох рідких фаз починається інтенсивне пароутворення саме води, яка порівняно з

дизельним паливом має меншу температуру кипіння. Оскільки спай термопари нагрівається швидше за рідину, парові бульбашки утворюються насамперед поблизу його поверхні, де спостерігається локально інтенсивне випаровування. Це призводить до появи однієї великої парової бульбашки, яка швидко збільшується у напрямку від спаю до поверхні краплі, досягає зовнішньої поверхні краплі і лускає (рис. 4а). При цьому відбувається викид частини матеріалу емульсії (крапля діаметром більше 0.1–0.2 мм). Період пульсацій тут становив від 10 до 25 мс (рис. 3б).

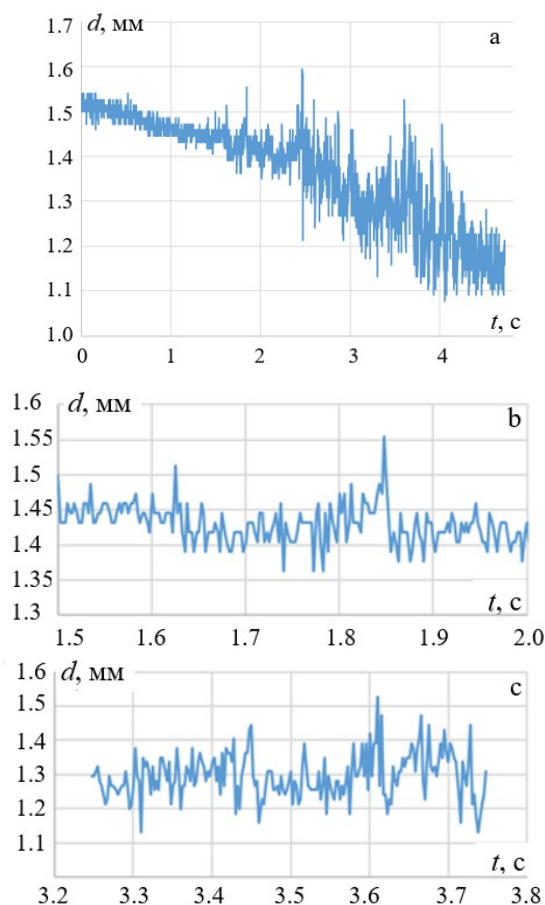


Рис. 3. Пульсаційна зміна діаметра в часі (результат обробки в пакеті Matlab) для емульсії дизельне паливо-вода (50%/50%).

Fig. 3. Pulsating variation of the diameter over time (results of processing in the MATLAB) for a diesel fuel-water emulsion (50%/50%).

По мірі прогрівання емульсії в об'ємі починає з'являтися велика кількість парових бульбашок (рис. 4б), які завдяки конвекції рухаються всередині краплі. Але їх інтенсивне зростання відбувається поблизу дії стримера, що проявляється в одночасному постійному збільшенні розмірів парових бульбашок. Тепер викид матеріалу (рис. 4с, обведено колами)

відбувається з меншим періодом у вигляді великої кількості малих крапельок (діаметром менше 0.1 мм). Діаметр краплі при таких випадках пульсує значно слабше. Період мініпульсацій складає близько 1–2 мс. (рис. 3с).

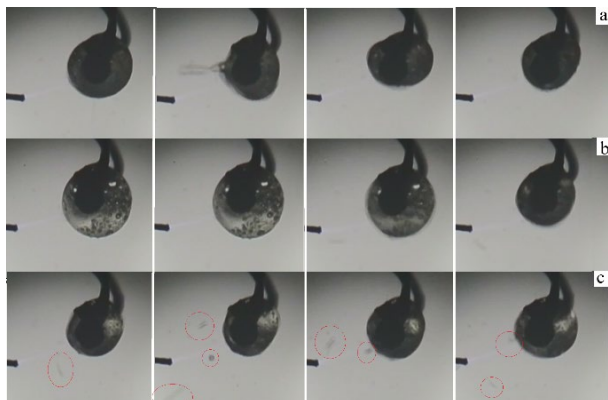


Рис. 4. Характерні пульсації розміру на різних стадіях горіння краплі емульсії дизельне паливо-вода (50%/50%).

Fig 4. Characteristic size pulsations at different stages of combustion of a diesel fuel-water emulsion (50%/50%).

Це унікальний підхід, який дозволяє точно ініціювати мікробибухи, модулювати тепловий баланс, досліджувати перехід від випаровування до фазового вибуху. У світовій літературі найближчим по суті методом є лазерне ініціювання, але описаний тут метод є електричним тригером.

МЕТОД СТАЦІОНАРНОЇ КРАПЛІ

Метод стаціонарної краплі може продемонструвати реалізацію мікробибухів на поверхні краплі. Так, в установці (рис. 1, установка 2) через трубку подається свіжоприготовлена емульсія, наприклад вода-дизельне паливо (склад 50% на 50%). Вона змочує металеву поруvату кульку діаметром 8 мм. Підпалювання здійснюється за допомогою газового пальника. Швидкість подачі емульсії підбирається таким чином, щоб масова швидкість подачі дорівнювала масовій швидкості згорання, тобто за відсутності прокапування надлишку рідини.

Видно (рис. 5), що на поверхні «краплі» спостерігаються бурхливі мікробибухи матеріалу емульсії, які ефективно згорають у навколишньому середовищі. Велику кількість і повне згорання вторинних крапель демонструє наявність димових слідів, що розходяться в різні боки від поверхні краплі. Це говорить про те, що наявність води в паливі може призводити до покращення і пришвидшення горіння горючої рідини.



Рис. 5. «Мікробибухи» при горінні емульсії дизельне паливо-вода (50%/50%) на стаціонарній сфері.

Fig. 5. “Microexplosions” during combustion of a diesel fuel-water emulsion (50%/50%) on a stationary sphere.

Схожі результати можна отримати при розпилюванні емульсії з великим вмістом води. Однак, додатково одразу після розпилювання емульсії на краплі можна діяти високочастотним електричним розрядом. Так, автори [17, 18] показують, що можливо реалізувати таке стійке горіння при масовій частці води до 60% в мазутно-водній емульсії.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано новий експериментальний підхід на основі поруvатої керамічної кульки, що дозволяє утримувати краплю емульсії без суттєвого тепловідводу та забезпечує стабільну геометрію краплі протягом усього циклу горіння. Методи поруvатої кульки і стаціонарної сфери можуть бути використані для калібрування моделей горіння ВПЕ у форсунках і камерах згорання.

Застосовано високочастотний електричний розряд як керований інструмент ініціювання та модифікації фазових вибухів усередині краплі ВПЕ, що дає можливість аналізувати перехід між режимами випаровування і вибухового розпаду. Розроблено комбіновану методику візуалізації, яка поєднує високошвидкісну зйомку та локальне електричне або теплове збурення, що дозволяє відстежувати динаміку мікробибухів та вторинного розпилення.

Кероване ініціювання мікробибухів за допомогою ВЧ-розряду відкриває можливості для оптимізації процесів форсункового розпилення, що здатне підвищити економічність і знизити викиди в двигунах та котлах. Запропоновані методики дозволяють оперативно оцінювати якість та стабільність емульсійних палив, що важливо для промислових застосувань. Розроблені підходи можуть бути використані в лабораторіях, що займаються розробкою альтернативних палив, а також у навчальному процесі.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interests.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A. Yarin. Annual Review of Fluid Mechanics, 38 (1), 159 (2006). <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092144>
2. E. Villermaux. Annual Review of Fluid Mechanics, 39, 419 (2007). <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.39.050905.110214>
3. A. Sartomo, B. Santos, O. Muraza. Energy Conversion and Management, 213, 112817 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112817>
4. C. T. Avedisian, R. P. Andres. Journal of Colloid and Interface Science, 64, 438 (1978). [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(78\)90386-7](https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90386-7)
5. V. Califano, R. Calabria. Fuel, 117, 87 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.073>
6. C. Law, C. Lee, N. Srinivasan. Combust. Flame, 37, 125 (1980). [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90080-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90080-2)
7. C. Law. Combust. Sci. Technol., 17, 29 (1977) <https://doi.org/10.1080/00102209708946810>
8. J. Shinjo, J. Xia, L.C. Ganippa, A. Megaritis. Phys. Fluids, 26, 103302 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4897918>
9. S. Priyadarshini, A. Yadav, A. Kushari, D. Chaitanya Kumar Rao. International Journal of Multiphase Flow, 193, 105418 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2025.105418>
10. H. Kim, S. Wook. Baek. Energy. 106, 422 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.006>
11. M. Strizhak, V. Piskunov, R. Volkov, J. Legros. Chemical engineering research and design, 127, 72 (2017) <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.09.008>
12. D. Zang, Y. Yu, Z. Chen, X. Li, H. Wu, X. Geng. Advances in Colloid and Interface Science, 243, 77 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.03.003>.
13. I. Marková, J. Lauko, L. Makovická Osvaldová, V. Mózer, J. Svetlík, M. Monoši and M. Orinčák. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17, 411 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17020411>
14. J. Wang, X. Cui, R. Zhang, Q. Xie, S. Zhang, L. Shi. International Journal of Thermal Sciences, 166, 106984 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106984>
15. О. Черненко, Г. Шингарьов, М. Іванов, В. Калінчак, О. Копійка. Фізика аеродисперсних систем, 60, 105 (2022). <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2022.60.267068>
16. О. Черненко, К. Тимофієнко, М. Іванов. Фізика аеродисперсних систем, 61, 212 (2023). <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292235>
17. В. Шевчук, А. Німич, О. Черненко, О. Сидоров., М. Іванов. Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса), 2(20), 139 (2023). <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.20.139-148>.
18. В. Шевчук, О. Черненко, О. Сидоров., М. Іванов, А. Німич. Вісник ОНУ. Хімія, 29, 2 (2024). [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2024.2\(88\).322132](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2024.2(88).322132)

REFERENCES

1. A. Yarin. Annual Review of Fluid Mechanics, 38 (1), 159 (2006). <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092144>
2. E. Villermaux. Annual Review of Fluid Mechanics, 39, 419 (2007). <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.39.050905.110214>
3. A. Sartomo, B. Santos, O. Muraza. Energy Conversion and Management, 213, 112817 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112817>
4. C. T. Avedisian, R. P. Andres. Journal of Colloid and Interface Science, 64, 438 (1978). [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(78\)90386-7](https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90386-7)
5. V. Califano, R. Calabria. Fuel, 117, 87 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.073>
6. C. Law, C. Lee, N. Srinivasan. Combust. Flame, 37, 125 (1980). [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90080-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90080-2)
7. C. Law. Combust. Sci. Technol., 17, 29 (1977) <https://doi.org/10.1080/00102209708946810>
8. J. Shinjo, J. Xia, L.C. Ganippa, A. Megaritis. Phys. Fluids, 26, 103302 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4897918>
9. S. Priyadarshini, A. Yadav, A. Kushari, D. Chaitanya Kumar Rao. International Journal of Multiphase Flow, 193, 105418 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2025.105418>
10. H. Kim, S. Wook. Baek. Energy. 106, 422 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.006>
11. M. Strizhak, V. Piskunov, R. Volkov, J. Legros. Chemical engineering research and design, 127, 72 (2017) <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.09.008>
12. D. Zang, Y. Yu, Z. Chen, X. Li, H. Wu, X. Geng. Advances in Colloid and Interface Science, 243, 77 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.03.003>.
13. I. Marková, J. Lauko, L. Makovická Osvaldová, V. Mózer, J. Svetlík, M. Monoši and M. Orinčák. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17, 411 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17020411>
14. J. Wang, X. Cui, R. Zhang, Q. Xie, S. Zhang, L. Shi. International Journal of Thermal Sciences, 166, 106984 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106984>
15. O. Chernenko, G. Shyngarev, M. Ivanov, V. Kalinchak, O. Kopyyka. Physics of Aerodisperse Systems, 60, 105 (2022). <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2022.60.267068> (in Ukrainian)
16. O. Chernenko, K. Timofienko, M. Ivanov. Physics of Aerodisperse Systems, 61, 212 (2023) <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292235> (in Ukrainian)
17. V. Shevchuk, A. Nimich, O. Chernenko, O. Sydorov., M. Ivanov. Collection of scientific works of Odesa Military Academy, 2(20), 139 (2023). <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.20.139-148>. (in Ukrainian)
18. B. Shevchuk, O. Chernenko, O. Sydorov., M. Ivanov, A. Nimich. Odesa National University Herald. Chemistry, 29, 2 (2024). [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2024.2\(88\).322132](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2024.2(88).322132) (in Ukrainian).

NEW EXPERIMENTAL APPROACHES TO THE STUDY OF COMBUSTION OF DROPLETS OF WATER-FUEL EMULSIONS

M. O. Ivanov, O. S. Chernenko

Odesa National I. I. Mechnikov University, 2 V. Zmienka Str., Odesa 65082, Ukraine

E-mail: teplophys@onu.edu.ua

Received on October 05, 2025. Reviewed on November 17, 2025.

Accepted for publication on November 20, 2025.

The based on a review of existing methods for studying droplet combustion, it is concluded that the combustion of emulsions is accompanied by the phenomenon of micro-explosions: the division of the primary droplet into secondary droplets. Depending on the intensity of heat input, both a small material ejection and complete droplet destruction can occur. The use of emulsions is important in reducing nitrogen oxide emissions and increasing the combustion efficiency of liquid fuels. The aim of this work is to review the authors' methods for studying the combustion of emulsion droplets, which have several advantages.

A new method for rapid analysis of the combustion rate of a liquid is described in the porous ball method. A ball soaked in a flammable liquid is placed on a special stand on a balance. The mass of the ball is measured over time, and a linear section of the mass vs. time curve defines the combustion rate of the liquid. Compared to existing methods, the advantage of this method is its speed, repeatability, low liquid consumption, and the ability to quickly compare different compositions, including emulsions.

An original method involves the use of high-frequency electrical discharge as an electric trigger for micro-explosion initiation. Even a small thermal power of the streamer is sufficient to observe the pulsations of the droplet diameter over time. The behavior of an emulsion droplet of water-diesel fuel (50%/50%) was studied, where water has a significantly lower boiling point than diesel fuel. The streamer passing near the droplet on a thermocouple does not fully heat the entire droplet initially. As a result, a steam bubble forms near the thermocouple joint, which expands, moves away from the joint, and bursts near the droplet's outer surface, leading to the emission of emulsion material (pulse period of 10–25 ms). As the entire droplet heats up, multiple bubbles expand and burst simultaneously, resulting in more mini-pulsations (2–3 ms).

In the stationary droplet method, continuous emulsion feeding through a needle to a porous metal particle is implemented. The visualization of micro-explosion formation on the droplet surface during combustion is demonstrated. The possibility of using high-frequency electrical discharge in the combustion of emulsions with a high water content (up to 60%) is also indicated.

Keywords: *evaporation, combustion, droplets, water-fuel emulsions, pulsations.*