

О. ЧЕРНЕНКО, М. ІВАНОВ, К. ТИМОФІЄНКО

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
(Вул. Всеволода Змієнка, 2, Одеса 65082; e-mail: teplophys@onu.edu.ua)

ПУЛЬСАЦІЙНЕ ВИПАРОВУВАННЯ КРАПЕЛЬ ЕМУЛЬСІЇ ПІД ДІЄЮ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ

УДК 536.423

Методом швидкісної відеозйомки досліджувалися пульсації розміру крапель емульсії дизель-вода під дією високочастотного електричного розряду, що приводить до диспергування крапель емульсії з великим вмістом води, на відміну від крапель однокомпонентних горючих рідин. Шляхом обробки відеофайлів процесу випаровування визначалася часова залежність проєкційного еквівалентного розміру крапель. Результати цієї роботи можуть бути використані в подальших дослідженнях розщеплення та горіння крапель емульсії із застосуванням додаткового високочастотного електричного розряду на стадії атомізації.

Ключові слова: емульсії, дизель-вода, краплі, електричний стример, пульсації, період, мікробибух.

1. Вступ

Одним із ключових завдань сучасної теплоенергетики є мінімізація шкідливих викидів, що утворюються під час спалювання вуглеводневих палив [1]. Одним із перспективних способів розв'язання цієї проблеми вважається введення води до складу палива. Наявність води в паливній суміші сприяє зменшенню температури полум'я, що, у свою чергу, дає змогу істотно скоротити утворення оксидів азоту (NO_x) та монооксиду вуглецю (СО). Крім того, вода впливає на реологічні характеристики палива, покращуючи умови його диспергування під час організації спалювання. Особливий інтерес викликає можливість застосування емульсійних палив ("масло у воді" та "вода в маслі") у

дизельних двигунах [2]. За певних термодинамічних умов під час згоряння емульсійних крапель у камері згоряння може реалізуватися явище мікробибуху – вибухоподібного кипіння, що призводить до розпаду краплі на дрібніші. Завдяки збільшенню сумарної поверхні контакту між паливом і окисником інтенсифікується процес згоряння, що позитивно впливає на його ефективність.

2. Аналіз літературних даних і постановка задачі

Формування емульсії передбачає наявність принаймні двох взаємно нерозчинних рідин – наприклад, води та рідкого палива. Після диспергації суміші незмішуваних рідин залежно від складу можуть утворюватися два основних типи емульсій: "нафта у воді" (O/W), коли паливна фаза диспергована у водяній, та "вода в нафті" (W/O), коли, навпаки, вода розподілена у паливній фазі [3].

Альтернативою води в емульсії з дизельним паливом можуть виступати спирти [4]. Активно проводяться дослідження емульсій з біооліями [5], відпрацьованими оліями [6] та мазутами [7]. Мікро-

Цитування: Черненко О., Іванов М., Тимофієнко К. Пульсаційне випаровування крапель емульсії під дією високочастотного електричного розряду. *Укр. фіз. журн.* **71**, № 6, 499 (2026).

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

ISSN 2071-0194. Укр. фіз. журн. 2026. Т. 71, № 6

вибухи, як правило, виникають у системах із помітною різницею у фізико-хімічних властивостях компонентів [8]. Серед переваг емульсійних палив є можливість використання компонентів, отриманих з відходів (олія) та “забрудненої” води, що містить, наприклад, нафтохімічні речовини.

Із підвищенням температури середовища для крапель емульсійного палива реалізуються три характерні режими теплової дії [9–11]: випаровування (evaporation), пихтіння (puffing) та мікробибух (micro-explosion). У першому випадку крапля поступово зменшується, зберігаючи цілісність поверхні. Під час пихтіння на поверхні формується локальне викривлення, яке швидко руйнується, породжуючи дрібні краплі рідкого палива. Це пов’язано з кипінням крапель води всередині краплі емульсії. Під час подальшої інтенсифікації нагрівання відбувається одночасне утворення численних парових бульбашок, що спричинює вибухове розширення краплі – мікробибух.

Як показано в роботі [12], під час нагрівання емульсій у печі спостерігалось поступове збільшення розмірів краплі та поява струменя рідини, який виходив крізь поверхню внаслідок зростання локального тиску, викликаного розривом парових бульбашок поблизу зовнішнього шару. Такий процес створює канал для викиду пари під великим тиском, що сприяє розриву рідинної оболонки на численні фрагменти. Характерний діаметр вторинних крапель після мікробибуху, як правило, не перевищує 200 мкм.

Для визначення умов, за яких відбувається мікробибух крапель емульсій, у літературі запропоновано декілька аналітичних підходів [9]:

1. аналіз досягнення критичної температури зародження – температури, близької до точки кипіння одного з компонентів емульсії на межі поділу фаз типу вода–в-олії (W/O);
2. оцінка перевищення тиску всередині парової бульбашки над сумою зовнішнього тиску та сил поверхневого натягу на границі фаз;
3. визначення критичного радіуса парової бульбашки, який встановлюють експериментальним шляхом.

У роботі [13] наведено результати високошвидкісної відеозйомки процесу горіння краплі емульсії з часткою води близько 50%. Встановлено, що температура займання олійної фази перевищує температуру кипіння води, тому мікробибух ініціюється

нагріванням водяних глобул усередині краплі. Поведінка таких систем суттєво відрізняється від горіння “чистого” палива: якщо для однорідної краплі масла діє класичний d^2 -закон, то для емульсії фіксується локальний спалах поблизу поверхні, за яким, після мікробибуху, настає газофазне горіння в усьому об’ємі навколо краплі. Показано, що температура в печі слабо впливає на тривалість горіння крапель емульсій, і помітно впливає лише на швидкість їх прогрівання й затримку займання. Тому наголошується на можливості обмеження попереднього підігріву камери згоряння до температур, достатніх для ініціації займання, але нижчих за критичні.

Окрім вивчення поведінки окремих крапель емульсій, значна увага приділяється експериментам у натурних умовах, які моделюють процес згоряння розпиленого факелу емульсійного палива. Під час таких досліджень вирізняють два основні чинники, що можуть призводити до пригнічення процесу горіння при використанні палив з підвищеним вмістом води. По-перше, спостерігається інтенсивне охолодження полум’я, зумовлене витратами тепла на випаровування і прогрівання водяної фази. По-друге, за стехіометричних умов горіння частка кисню в суміші реагентів зменшується зі збільшенням вмісту води, що обмежує інтенсивність окиснення.

У роботі [14] наведено схематичну діаграму горючості парів вищих вуглеводнів, змішаних із повітрям і водяною парою за атмосферного тиску. Показано, що зі збільшенням частки водяної пари звужується діапазон концентрації вуглеводнів, за якої можливе займання. Водночас, згідно з теоретичними розрахунками, навіть суміші, що містять до 75 мас.% води, можуть бути легкозаймистими за стехіометричних повітряних умов. З підвищенням вмісту кисню в газовому дутті при згорянні емульсій з 50 мас.% води підвищується ефективність процесу з 45% до 78%. Це пояснюється браком азоту, який у звичайних умовах є інертним компонентом.

Концентрація води в паливі, як і вміст кисню в окислювачі, суттєво впливають на рівень утворення оксидів азоту (NO_x). Так, під час згоряння чистого мазуту в чистому кисні концентрація NO_x сягала близько 760 ppm, тоді як при використанні емульсій із вмістом води 25, 50 і 75 мас.% ці показники знижувалися відповідно до 430, 210 і

100 ppm. Таке зменшення прямо пов'язане зі зниженням температури полум'я, що підтверджує позитивний вплив водяної компоненти на екологічні характеристики процесу згоряння.

Експериментальні дані щодо згоряння емульсій типу масло/вода з часткою води 10 і 20% у дизельному двигуні [15] також показали, що порівняно зі звичайним дизельним паливом (ДП) спостерігається зниження інтенсивності горіння (менша яскравість полум'я), а також зменшення утворення оксидів азоту (NO_x), диму й скорочення тривалості процесу згоряння.

Одним із перспективних способів керування процесом горіння газоподібних, рідких і диспергованих паливних систем є використання електричних розрядів різних типів [16–18]. У роботі [19] досліджено випаровування крапель рідин та емульсій у повітрі за умов теплового впливу височастотного електричного розряду. Для емульсій з часткою води до 50% після стадії прогрівання фіксувалися пульсації геометричних розмірів крапель: їх діаметр змінювався періодично навколо певного середнього значення, яке поступово зменшувалося зі зростанням тривалості випаровування. Такі пульсації пояснюються випаровуванням водяних глобул усередині краплі та утворенням парових бульбашок, що призводять до періодичних коливань її об'єму. Втрата маси емульсії під дією електричного розряду відбувається переважно через викиди рідини під час пихтіння, спричинені локальним розривом оболонки краплі.

Отже, дослідження процесів горіння й випаровування емульсійних палив залишається актуальним завданням сучасної енергетики.

Метою цієї роботи є експериментальне вивчення закономірностей випаровування крапель водопаливних емульсій з різною часткою води під впливом височастотного електричного розряду.

3. Матеріали та методи дослідження

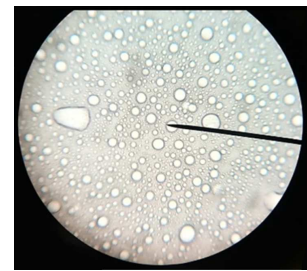
Об'єктами експерименту слугували двофазні емульсійні системи типу “дизель–вода”, які готували без використання поверхнево-активних речовин. Об'ємна частка води змінювалася в межах від 0 до 80% із кроком 10%. Для процесів змішування й утворення емульсії застосовувався ультразвуковий диспергатор УЗДН-1, що працює на частоті 22 кГц. Зонд пристрою занурювали у



a



b



c

Рис. 1. Вигляд суміші до перемішування і через 5 хвилин після нього для емульсій D60W40, D50W50 (a). Зображення під мікроскопом емульсії D50W50 за хвилину після приготування: розміри крапель з $D_{50} = 5,5$ мкм і $D_{90} = 10$ мкм (b)

скляну ємність об'ємом 10 мл (рис. 1, a), у якій попередньо розміщували компоненти системи. Тривалість обробки становила приблизно одну хвилину.

У результаті дії ультразвуку суміш двох взаємно нерозчинних рідин перетворювалася візуально на однорідну білу суспензію в усьому об'ємі, що надалі використовувалася для проведення досліджень. Найбільш ефективно перемішування компонентів спостерігалось з часткою води 40–60% за об'ємом. Це перевірялося за допомогою пляшкового тесту (bottle test) [20] за часом відшарування в пляшці. Свіжоприготовану емульсію залишають у спокої в невеликій пляшечці й фіксується час до появи видимого розділення або відсоток розділеної води з часом.

Так, для вказаних емульсій час відшарування був більше 3 годин. Для емульсій з малим вмістом води чи дизеля відшарування ставало помітним через 10 хвилин. Аналогічним чином досліджувалася стабільність водяних емульсій з відпрацьованим мастилом [18]. Час половинного розшарування для емульсій з частками води до 30% складає 750–1200 с. Спосіб підготовки емульсії також впливає на час розшарування [20]: чим менші краплі, тим емульсія стабільніша. Тому використання ультразвукового диспергатора є вдалим рішенням.

Одразу після приготування зразка емульсії кілька крапель відбирали піпеткою і наносили на предметне скло під оптичним мікроскопом (рис. 1, c).

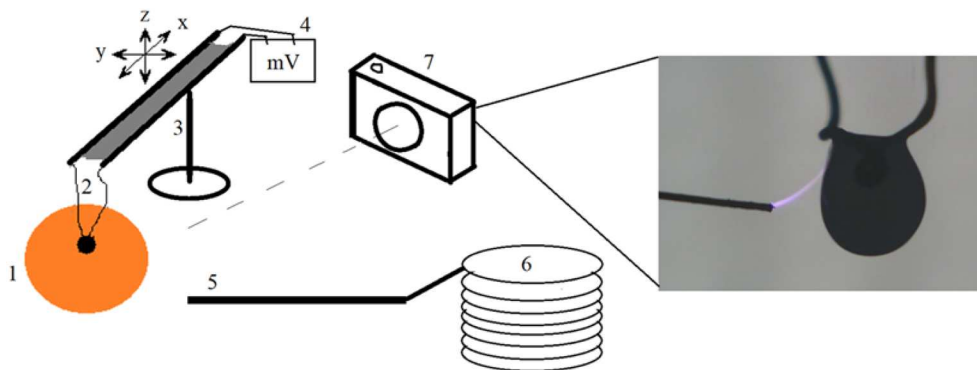


Рис. 2. Експериментальна установка: 1 – крапля емульсії, 2 – термопара, 3 – регульоване в просторі кріплення на штативі, 4 – мілівольтметр, 5 – електрод, 6 – котушка генератора Тесла, 7 – фотоапарат

Діаметр голки в окулярі становив 7,5 мкм. На мікрофотографіях чітко простежуються прозорі сферичні частинки різного діаметра. Середній розмір крапель змінювався залежно від складу емульсії, найменші частинки спостерігалися в емульсіях з вмістом води 40–60%. Стан емульсії через 5 хвилин після приготування показано на рис. 1, *b*. Тобто основна частка об'єму води в краплях відповідає краплям розміром понад 2 мкм, що є характерним для ультразвукової обробки на частоті 22 кГц без використання ПАР.

У роботі [21] показано, що на прикладі емульсії D95W5 дестабілізація починається вже через 10 секунд після утворення: середній діаметр крапель води збільшується з 0,41 мкм до 15,38 мкм. Оскільки поверхнево-активна речовина (ПАР) у систему не вводилась, міжкрапельні сили відштовхування були недостатні для стабілізації, що спричинило злиття крапель. Це відбувалося через поступове зменшення тонкої міжфазної плівки, що розділяє краплі, під дією сил Ван-дер-Ваальса. Уже через 25 секунд утворювалися краплі такого розміру, що вони починали осідати на дно посудини.

У цьому дослідженні (рис. 1, *c*) також спостерігалося утворення помітно більших крапель під час забору зразка та його нанесення на предметне скло. Разом із тим, у зразку залишалася значна кількість дрібнодисперсних (мікронних) частинок. Повне розшарування системи ставало очевидним вже через добу після приготування. Тому припускалося, що протягом 5 хвилин після приготування емульсії і проведенням спалювання ряду крапель склад емульсії був незмінним.

Зазвичай, у системі подачі палива одноциліндрового дизельного двигуна час проходження па-

лива від моменту утворення суміші до її впорскування в камеру згоряння становить близько 2–5 секунд. У випадку двигунів, що працюють на водопаливних емульсіях, утворення суміші води й дизельного палива здійснюється ультразвуковим емульгуванням безпосередньо перед камерою згоряння [22]. Тому, як зазначається в [22], у таких системах процеси дестабілізації емульсій не враховуються, адже за відсутності ПАР вона призначена не для зберігання, а для негайного використання у процесі згоряння.

4. Експериментальна установка

Для проведення дослідження використовувалася тонка термопара типу ХА зі спаєм діаметром 0,5 мм, розміщена у повітряному середовищі за кімнатної температури. На спай термопари наносилася крапля емульсії, яка готувалася безпосередньо перед експериментом (рис. 2). Процес змочування здійснювався так, щоб спай містився всередині об'єму краплі.

На певній відстані від краплі встановлювався мідний електрод діаметром близько 150 мкм, підключений до мінігенератора Тесла з напругою живлення 9–12 В. У певний момент часу вмикалося живлення котушки, після чого на краплю подавався високочастотний електричний розряд.

Для оцінки теплової потужності розряду попередньо проводилися експерименти з окремими краплями води або етанолу, спостерігаючи їх випаровування під дією розряду. Якщо припустити, що вся тепла енергія, що надходить від розряду, передається краплі (внесок тепловіддачі становить менш ніж 10% від потужності P), то процес можна

Таблиця 1. Значення електропровідності емульсій в ppm

Чиста	Обернена		Близького складу			Пряма		Чиста
D100	D90W10	D80W20	D60W40	D50W50	D40W60	D20W80	D10W90	W100
0	40	65	100	150	200	370	440	500

описати рівнянням:

$$L\rho \frac{dV}{dt} = P.$$

Тут L – питома теплота пароутворення, ρ – густина рідини. Виходячи з цього рівняння об’єм краплі повинен зменшуватися лінійно з часом. Розраховані за цією моделлю значення потужності розряду P становили від 0,13 до 0,25 Вт, залежно від відстані між електродом і краплею [19].

З наближенням розряду до краплі спостерігалося спочатку зростання, а потім зменшення теплової потужності нагрівання. Розряд має форму циліндра довжиною близько 1,5–2 мм. Коли крапля віддалялася від зони розряду, ефективність теплопередачі зменшувалася. У випадку наближення електрода на відстань, меншу за довжину розряду в стані спокою, реальна довжина каналу скорочувалася. Тому виділення тепла в плазмовому каналі зменшувалося, що відповідно знижувало тепловіддачу до краплі.

Потужність електричного розряду також оцінювалася за його тепловим впливом на парафін. Для цього використовували твердий фрагмент парафіну, попередньо витриманий за кімнатної температури. Визначали масу зразка до дії розряду й через деякий час, протягом якого частина речовини розплавлялася й стікала з поверхні твердого шматка. За різницею маси парафіну, що розплавився, обчислювали теплову потужність розряду, яка склала приблизно 0,13 Вт.

Для аналізу поведінки краплі емульсії здійснювали відеозйомку зі швидкістю 400 кадрів за секунду. Зйомку проводили фотоапаратом Nikon J1, закріпленим на оптичній лаві разом із об’єктивом. На тлі розташовувалося світлодіодне джерело освітлення, що забезпечувало рівномірне підсвічування й контрастне відображення форми краплі. Отримані відеоматеріали покадрово аналізувалися. Для кожного кадру визначали контур поверхні

краплі (без урахування термоелектродів термопари) й еквівалентний проекційний діаметр, що використовувався для подальших розрахунків динаміки зміни форми краплі.

5. Результати дослідження

Випаровування крапель чистих рідин (дизельного палива й води) під дією електричного розряду відбувається згідно з класичним d^2 -законом. При цьому внутрішня структура краплі залишалася однорідною, без помітних особливостей або зон фазового розділення.

У разі змішування дизельного палива з водою, залежно від їх співвідношення, утворювалася пряма або зворотна емульсія. Пряма емульсія (O/W) – це система типу “олія у воді”, де дисперсійним середовищем є вода, а паливо формує дисперсну фазу. Зворотна емульсія (W/O) – це система “вода в олії”, у якій, навпаки, паливо є дисперсійним середовищем, а вода – дисперсною фазою.

Тип емульсії визначали за допомогою методу електропровідності. Високі значення електропровідності свідчать про наявність полярного середовища, тобто емульсія належить до типу O/W. Натомість низька електропровідність відповідає емульсіям типу W/O. Для кількісної оцінки електропровідності використовувався TDS-метр, який дає результат у ppm (кількість іонів на мільйон частинок). Отримані одразу після приготування результати подано в табл. 1. Спостерігається закономірність: за малої частки води електропровідність незначна, що підтверджує утворення зворотної емульсії, а за великої частки води електропровідність зростає, вказуючи на формування прямої емульсії.

На рис. 3 наведено залежність діаметра краплі емульсії від часу під дією електричного розряду для різних об’ємних часток води. Окрім високочастотних пульсацій розміру краплі, виявлено якісну різницю в поведінці прямих і зворотних емульсій.

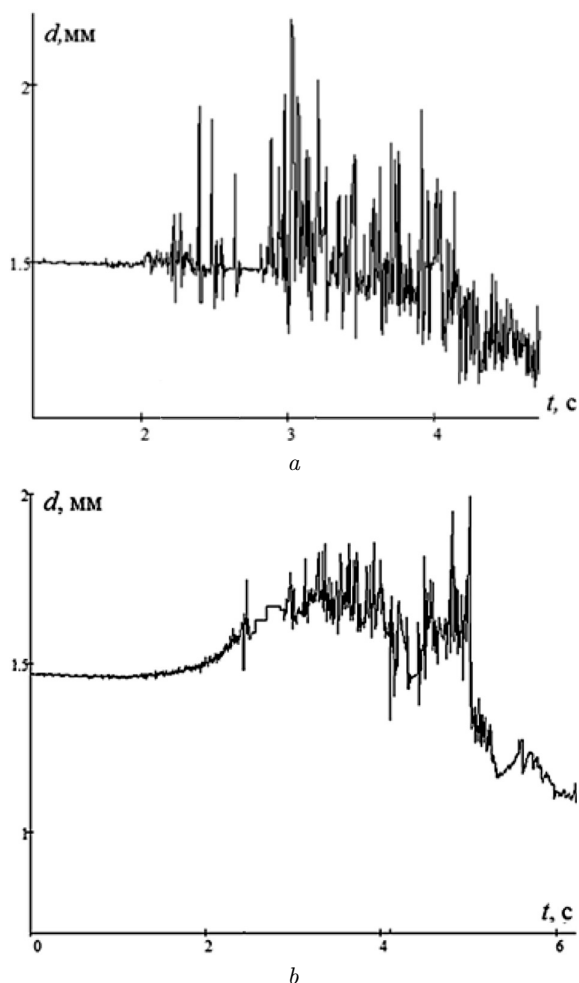


Рис. 3. Характерна зміна з часом розміру краплі емульсії: D70W30 (a) і D30W70 (b)

Для зворотних емульсій характерне випаровування, що відповідає закону d^2 , тоді як для прямих емульсій на початковому етапі спостерігається помітне збільшення розміру краплі, після чого настає різке зменшення її діаметра.

Для краплі оберненої емульсії D80W20 характерне викидання дрібнодисперсних частинок розміром менше 100 мкм, які миттєво згоряють, утворюючи димову хмару (рис. 4, a). Залежність діаметра краплі від часу $d(t)$ відповідає закону d^2 , проте на графіку спостерігаються численні пульсації, що дещо “розмивають” цей закон. Більші краплі розміром (понад 100 мкм) утворюються рідко, тому пульсації та викиди речовини лише незначно впливають на сумарну швидкість випаровування.

Для краплі складу D70W30 частота пульсацій змінюється в процесі випаровування. На початковій стадії, після нагрівання, спостерігається викид дрібних крапель з поверхні краплі з періодом близько 20 мс. На наступному етапі пульсації пов’язані з утворенням парових бульбашок, що розширюються поблизу поверхні краплі, після чого відбувається їх луснення (рис. 4, b). Зі зменшенням діаметра краплі період пульсацій стає рівним 25–30 мс.

Для систем із близькими частками води й палива, зокрема емульсії D60W40, спостерігалися інтенсивні пульсації з періодом 13–20 мс, пов’язані з розширенням парових бульбашок всередині краплі, що призводило до зміни діаметра приблизно на $\pm 25\%$. Після луснення бульбашок відбувався викид більших крапель діаметром до 200 мкм.

У процесі випаровування крапель емульсії всередині об’єму утворювалися парові бульбашки, які рухалися циркуляційними траєкторіями. Електричний розряд діяв переважно на спай у верхній частині краплі, спричиняючи рух бульбашок від цієї області. Для обернених емульсій кількість бульбашок була невеликою, а їх зростання повільним, що зумовлювало поступове збільшення діаметра краплі і викид речовини переважно через розрив однієї великої бульбашки.

Для емульсій із близьким вмістом водяної та паливної фаз спостерігалось одночасне зростання кількох парових бульбашок. У зоні поблизу спаю термопари, де температура була вищою, кількість бульбашок збільшувалася (рис. 4, c). Біля входу електрода ці бульбашки інтенсивно нагрівалися, що призводило до мікровикидів дрібних крапель. Відповідно, період пульсацій у цій зоні зменшувався до 7,5–12,5 мс.

Емульсія з високим вмістом води (70–90%) – пряма емульсія O/W. Основною особливістю їх випаровування є формування піноподібної поверхневої структури. У верхній частині краплі, поблизу нагрітого спаю, інтенсивно утворюються парові бульбашки (рис. 4, d), які протягом деякого часу утримуються на поверхні, після чого лопаються, утворюючи дрібні крапельки. При цьому загальний діаметр краплі може збільшуватися приблизно на 20% (рис. 3, b).

Для крапель емульсії D30W70 кількість і розміри парових бульбашок були меншими, ніж у системі D20W80, а період пульсацій, пов’язаний із

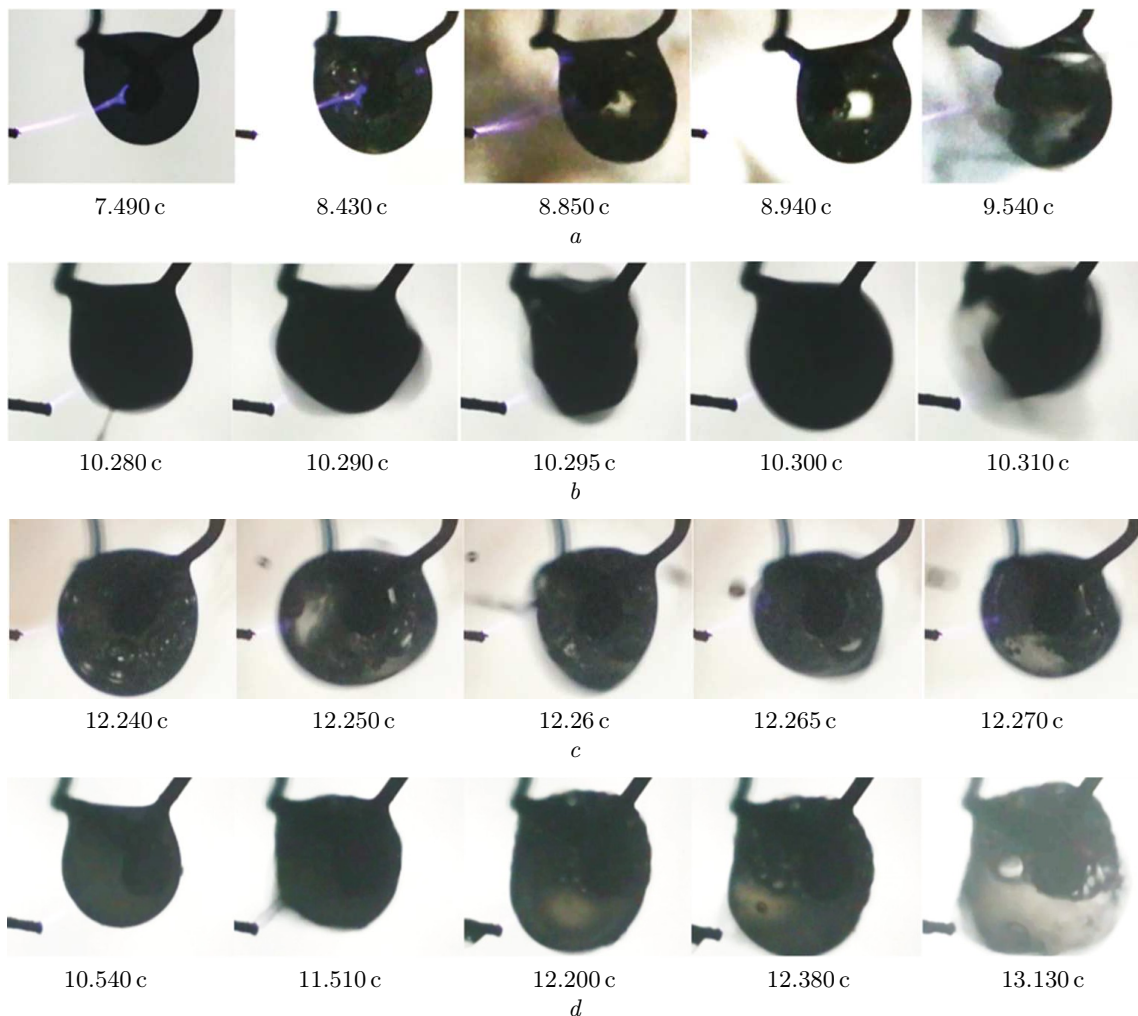


Рис. 4. Приклади форми крапель емульсій під час пульсацій: D80W20 (a), D70W30 (b), D50W50 (c), D30W70 (d)

відривом дрібних крапель (<100 мкм), становив 10–15 мс.

У випадку емульсії D10W90 процес пароутворення відбувався всередині об'єму краплі. На відеозаписах чітко спостерігався рух парових бульбашок по замкнених траєкторіях, тоді як амплітуда пульсацій діаметра залишалася мінімальною.

6. Обговорення дослідження

На рис. 5 наведено експериментальні дані, що відображають залежність періоду пульсацій розміру краплі емульсії від концентрації водяної фази. Загалом, пульсації переважно відбуваються в діапазоні 10–20 мс. Для обернених емульсій характер-

ні невеликі за амплітудою коливання діаметра, а форма краплі залишається близькою до сферичної. Для таких крапель характерні послідовні мікровикиди рідини, в результаті яких утворюються дрібні крапельки діаметром до 100 мкм.

Для прямих емульсій також спостерігаються малі викиди крапель, однак додатково формується піноподібна структура з парових бульбашок, що виникають біля поверхні краплі. Це явище призводить до зростання середнього діаметра краплі приблизно на 25%, після чого піна поступово руйнується внаслідок луснення бульбашок.

Таку поведінку можна пояснити зменшенням поверхневого натягу в компонентах емульсії при

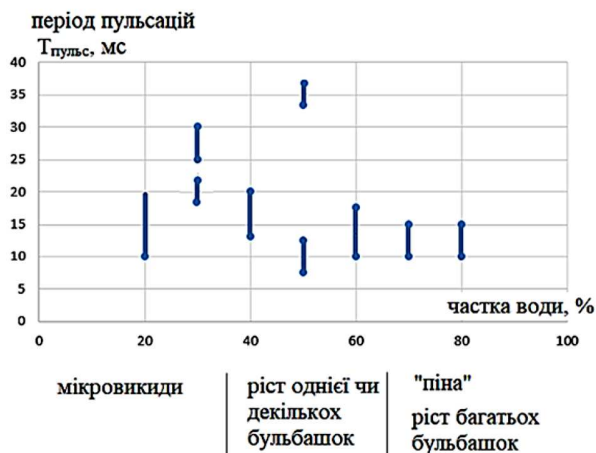


Рис. 5. Характерні періоди пульсацій розміру крапель емульсії залежно від частки води

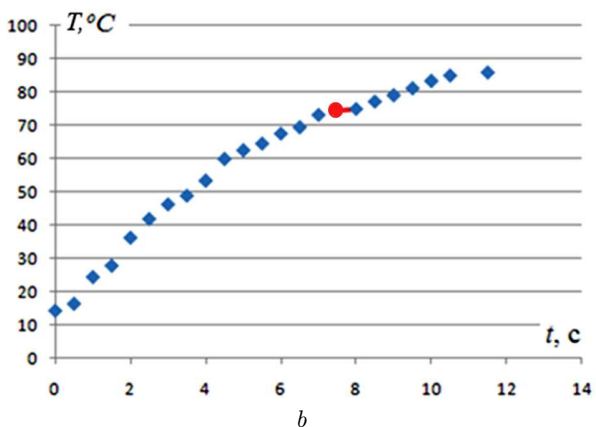
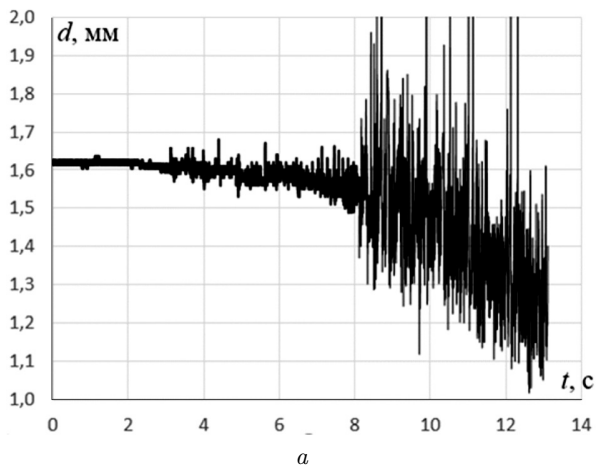


Рис. 6. Залежності діаметра d краплі емульсії D50W50 (початковий діаметр 1,62 мм) (а) і температури T термопари в точці розташування краплі від часу (б)

нагріванні. Зокрема, за температури 20 °C поверхневий натяг дизельного палива (ДП) становить 29 мН/м, а води – 73 мН/м; за температури 100 °C – відповідно 20 мН/м і 59 мН/м. Оскільки поверхневий натяг у ДП нижчий, ніж у води, пара утворюється переважно на межі глобул палива, які виконують роль зародків кипіння.

Для емульсій із близькими частками води і палива характерні виражені пульсації, що супроводжуються хаотичними деформаціями форми краплі. Це зумовлено зростанням кількох парових бульбашок усередині краплі, утворенням парового наросту на поверхні та подальшим лусненням бульбашок.

Час нагрівання краплі до початку пульсацій, який, за результатами дослідів, варіювався в межах 1–11 с залежно від низки факторів:

1. Розмір краплі. Діаметр досліджених крапель змінювався в межах 1,4–2,6 мм. Навіть незначне збільшення розміру з 1,5 мм до 1,9 мм призводило до зростання часу прогріву з 2,5 с до 6 с.

2. Склад емульсії. Оскільки питома теплоємність води приблизно вдвічі більша, ніж у дизельного палива, емульсії з меншою часткою води прогріваються швидше.

3. Початкова температура термопари. Під час серійних дослідів термопари після кожного вимірювання залишалася частково нагрітою. Це скорочувало час нагрівання наступних крапель, адже тривалість високошвидкісної відеозйомки була обмежена п'ятьма секундами, і для кожної серії проводилися кілька послідовних експозицій.

На рис. 6 показано зміну діаметра краплі емульсії D50W50 з початковим діаметром краплі рівним 1,6 мм і температури термопари в точці, в якій розміщувалася крапля, що нагрівалася електричним розрядом. Кружечком позначено момент появи мікровибухів на поверхні краплі. Зазначимо, що температура краплі в цей момент є нижчою за температуру кипіння води. Якщо скористатися умовою рівності тисків у паровій бульбашці, можна оцінити, що рівноважний радіус такої бульбашки за температури 75 °C становить близько 2 мкм.

7. Висновки

Аналіз експериментальних даних дає змогу сформулювати цілісне уявлення про взаємодію електричного розряду з краплею емульсії. Під час дослідів

електричний стример проходить крізь об'єм краплі, досягаючи спаю термопари, що виконує роль приймача теплової енергії.

У результаті впливу розряду відбувається процес, який можна чітко поділити на два часові етапи: фаза інерційного нагріву (коли температура краплі поступово зростає без помітних структурних змін) і пульсаційний режим (у якому розмір краплі періодично змінюється з певною частотою навколо середнього значення, що поступово зменшується внаслідок випаровування).

Через обмежену тривалість дії розряду стример не встигає рівномірно прогріти весь об'єм краплі. Найінтенсивніше нагрівання відбувається в зонах, розташованих поблизу траєкторії стримера та спаю термопари. Під дією електричного розряду емульсії з високим вмістом води зазнають диспергування, тоді як чисті горючі рідини такої поведінки не виявляють. Оскільки спай термопари нагрівається швидше за рідину, парові бульбашки утворюються насамперед на його поверхні, де спостерігається локально інтенсивне випаровування. На початку пульсацій ці бульбашки розширюються в напрямку від спаю до поверхні краплі, переважно в зоні, наближеній до електричного стримера.

Цей ефект пояснює, чому експериментальні значення часу прогріву виявилися меншими, ніж розрахункові, а також чому спостережуваний період пульсацій становив приблизно половину теоретично очікуваного [19].

Для обернених емульсій (вміст води <30%) типовим є зростання однієї парової бульбашки, розмір якої може бути порівняним із діаметром самої краплі. У системах із близьким співвідношенням компонентів ($Z_w = 40\text{--}60\%$) пульсації зумовлені одночасним розширенням кількох бульбашок. У свою чергу, прями́ емульсії (частка води >70%) характеризуються формуванням пінистої структури, що складається з парових бульбашок, оточених молекулярними оболонками дизельного палива; ці бульбашки можуть зростати і лускати майже одночасно.

Втрати речовини в емульсійних краплях завдяки впливу розряду відбуваються переважно внаслідок мікробухів і викидів мікрокрапель у момент луснення. За результатами вимірювань, період пульсацій розміру крапель під дією електричного розряду становив у середньому 10–25 мс.

1. X. Pei, P. Guida, K.M. AlAhmadi, I.A. Al Ghamdi, S. Saxena, W.L. Roberts. Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame. *Fuel Processing Technology* **216**, 106800 (2021).
2. Shuhn-Shyurng Hou, Fakhrur M. Rizal, Ta-Hui Lin, Tzu-Yueh Yang, Hou-Peng Wan. Microexplosion and ignition of droplets of fuel oil/bio-oil (derived from lauan wood) blends. *Fuel* **113**, 31 (2013).
3. I. Park, Oh. Jungmo. Study on the characteristics of performance, combustion, and emissions for a diesel water emulsion fuel on a combustion visualization engine and a commercial diesel engine. *Fuel* **311**, 122520 (2022).
4. Chi-Yao Chao, Hsuan-Wei Tsai, Kuo-Long Pan, Chih-Wei Hsieh. On the microexplosion mechanisms of burning droplets blended with biodiesel and alcohol. *Combustion and Flame* **205**, 397 (2019).
5. A. Hoxie, R. Schoo, J. Braden. Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets. *Fuel* **120**, 22 (2014).
6. E. Mura, R. Calabria, V. Califano, P. Massoli, J. Bellettre. Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches. *Experimental Thermal and Fluid Sci.* **56**, 69 (2014).
7. Shuhn-Shyurng Hou, Fakhrur M. Rizal, Ta-Hui Lin, Tzu-Yueh Yang, Hou-Peng Wan. Microexplosion and ignition of droplets of fuel oil/bio-oil (derived from lauan wood) blends. *Fuel* **113**, 31 (2013).
8. Weiwei Shang, Shouyin Yang, Tiemin Xuan, Zhixia He, and Jiawei Cao. Experimental studies on combustion and microexplosion characteristics of nalkane droplets. *Energy Fuels* **34** (12), 16613 (2020).
9. D.V. Antonov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak. Micro-explosion phenomenon: Conditions and benefits. *Energies* **15**, 7670 (2022).
10. P. Strizhak, M. V. Piskunov, R.S. Volkov, J.C. Legros. Evaporation, boiling and explosive breakup of oil-water emulsion drops under intense radiant heating. *Chem. Engin. Res. Design* **127**, 72 (2017).
11. J. Won, S.W. Baek, H. Kim. Autoignition and combustion behavior of emulsion droplet under elevated temperature and pressure conditions. *Energy* **163**, 800 (2018).
12. M.M. Avulapati, T. Megaritis, J. Xia, L. Ganippa. Experimental understanding on the dynamics of micro-explosion and puffing in ternary emulsion droplets. *Fuel* **239**, 1284 (2019).
13. G.V. Kuznetsov, K.Yu. Vershinina, T.R. Valiullin, P.A. Strizhak. Differences in ignition and combustion characteristics of waste-derived oil-water emulsions and coal-water slurries containing petrochemicals. *Fuel Proc. Technol.* **179**, 407 (2018).
14. C. Gabera, P. Wachter, M. Demuth, C. Hochenaue. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen. *Fuel*, **282**, 118692 (2020).

15. D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium. *Acta Astronautica*, **160**, 258 (2019).
16. Shuai Huang, Tie Li, Xinran Wang, Run Chen, Rundai Yang, Zhonghua Qian. Effects of various discharge strategies on ignition and combustion of lean natural gas mixture under the static and turbulent conditions. *Exper. Thermal and Fluid Sci.* **133**, 110581 (2022).
17. N.A. Bulychev. Electric discharge in liquids under the effect of vibration. *Intern. J. Recent Technol. Engin.* **8** (4), 68 (2019).
18. В.Г. Шевчук, А.В. Німич, О.С. Черненко, О.Є. Сидоров, М.О. Иванов. Використання водяних емульсій відпрацьованих моторних мастил в якості високоефективного горючого. *Збірник наукових праць Військової академії (Одеса)* **2** (20), 139 (2023).
19. О.С. Черненко, К.В. Тимофієнко, М.О. Иванов. Випаровування крапель горючих рідин в електричному розряді. *Фізика аеродисперсних систем* **61**, 212 (2023).
20. A. Husain, A.A. Adewunmi, M. Mahmoud, M. Kamal. Stability of diesel/water emulsions: experimental and modeling investigations. *J. Energy Res. Technol.* **143** (11), 1 (2021).
21. A.M. Ithnin, W.J. Yahya, M.A. Ahmad, N.A. Ramlan, H. Abdul Kadir, N.A.C. Sidik, T. Koga. Emulsifier-free water-in-diesel emulsion fuel: Its stability behaviour, engine performance and exhaust emission. *Fuel* **215**, 454 (2018).
22. C. Mata, V. Rojas-Reinoso, J. A. Soriano. Experimental determination and modelling of fuel rate of injection: A review. *Fuel* **343**, 127895 (2023). Одержано 12.02.26

O.S. Chernenko,
M.O. Ivanov, K.V. Tymofienko

PULSATING EVAPORATION
OF EMULSION DROPLETS UNDER THE ACTION
OF A HIGH-FREQUENCY ELECTRIC DISCHARGE

The pulsations of droplet size in diesel-water emulsions under the action of a high-frequency electric discharge have been studied using high-speed video recording. The discharge leads to the dispersion of emulsion droplets with a high water content, in contrast to droplets of pure combustible liquids. By processing video recordings of the evaporation process, the time dependence of the projection-equivalent droplet size was determined. The results of this study can be used in further investigations of the spray combustion of emulsion droplets when an additional high-frequency electric discharge is applied at the atomization stage.

Keywords: diesel-water emulsions, droplets, electric streamer, pulsations, period, microexplosion.