

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра фізики та астрономії

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

«Випаровування та горіння крапель емульгованих палив»

«Evaporation and burning of emulsified fuel droplets»

Виконав: здобувач денної форми навчання

спеціальності 104- Фізика та астрономія

(код, назва спеціальності)

Освітня програма Фізика та астрономія

(назва)

Тимофієнко Костянтин Вікторович

(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)

Керівник д.ф.-м.н., професор Черненко О.С. _____

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент д.ф.-м.н., професор Полетаєв М.І.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:

Протокол засідання кафедри

Фізики та астрономії

№ ____ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Завідувач кафедри

_____ Гоцунський Володимир

(підпис)

(прізвище, ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № _____

протокол № ____ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Оцінка _____ / _____ / _____

(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК

_____ Гоцунський Володимир

(підпис)

(прізвище, ім'я)

Одеса 2024

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Огляд досліджень з випаровування і горіння крапель емульсії	5
2. Експериментальні дослідження випаровування і горіння крапель емульсій	13
2.1. Приготування емульсій	13
2.2. Випаровування емульсій в нагрітій печі	18
2.3. Випаровування і горіння крапель емульсій під дією електричного розряду	21
3. Фізико-математичне моделювання випаровування крапель емульсій в електричному розряді	30
3.1. Модель передвибухової динаміки розігріву краплі ВПЕ	30
3.2. Перший етап випаровування краплі емульсії під дією електричного розряду	31
3.3. Другий етап випаровування краплі емульсії під дією електричного розряду	34
3.4. Вплив параметрів на характеристики випаровування	38
Результати роботи та висновки	42
Список використаних джерел	43

ВСТУП

Важливим питанням сучасної теплоенергетики є зниження викидів шкідливих речовин при спалюванні вуглеводневого палива. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є використання води у складі вуглеводневого палива. Вода сприяє зниженню температури полум'я, і завдяки цьому викиди NO_x можуть бути значно зменшені. Крім того, використання води може призводити до зміни реологічних властивостей палива, що в свою чергу сприяє якості його розпилення. Перспективним напрямком сучасних досліджень є аналіз можливості використання емульсійного палива (масло-у-воді та вода-в-маслі) в дизельних двигунах. За певних умов горіння крапель емульсії всередині камери згорання двигуна може супроводжуватися досить важливим з прикладної точки зору явищем мікрОВИбуху. Суть цього явища полягає у вибуховому кипінні крапель емульсії, що призводить до утворення масиву досить дрібних крапель палива. Завдяки збільшенню поверхні контакту між реагуючими компонентами підвищується ефективність горіння. Механізм горіння крапель емульсії суттєво залежить від їх структури (від кількості та діаметра крапель дисперсної фази та діаметра краплі емульсії в цілому).

Змінюючи структурні параметри емульсійного палива, можна суттєво змінити його властивості.

Вода в водо-мазутній емульсії - це вже не баласт, а своєрідний каталізатор, що покращує та прискорює процес спалювання палива. Адаже при поступовому підвищенні температури (вже при 170°C) можливе дроблення крапель емульсії з подальшим переходом у пароподібний стан (мікрОВИбух крапель води). Крім того дроблення крапель рідкого пального можливе внаслідок накопичення на її поверхні електричного заряду. А зменшення розмірів крапель призводить до підвищення швидкості їх вигорання, а, як наслідок, і повноти згорання палива.

Мета роботи: вивчити особливості випаровування та горіння крапель водопаливних емульсій з різним вмістом води під дією високочастотного електричного розряду.

Завдання роботи:

1. зробити огляд сучасних досліджень по горінню крапель емульсованого палива;
2. дослідити випаровування крапель емульсій в нагрітій печі;
3. дослідити вплив електричного розряду на випаровування і горіння емульсій в повітрі кімнатної температури;
4. розвинути фізико-математичну модель процесів тепломасообміну, яка пояснює пульсаційну поведінку поверхні краплі таких емульсій при дії високочастотного розряду.

Об'єкт дослідження – краплі водно-дизельних емульсій.

Предмет дослідження – процеси тепло масообміну, випаровування та горіння крапель в електричному розряді.

Розділ 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИПАРОВУВАННЯ І ГОРІННЯ КРАПЕЛЬ ЕМУЛЬСІЇ

В цьому розділі проводиться короткий огляд останніх публікацій з дослідження горіння крапель водо-паливних емульсій. Вони направлені на пошуки альтернативних палив, зменшення шкідливих викидів та переробки «брудної води» з залишками нафтопродуктів.

Останнім часом ведеться пошук альтернативних палив для економії або заміни традиційних горючих [1]. Зокрема, це направлено на зменшення деяких забруднюючих речовин під час спалювання, таких як тверді частинки (PM), оксид азоту (NO_x) і монооксид вуглецю (CO), які є шкідливими для навколишнього середовища та здоров'я людини. Емульсійне паливо отримало особливу увагу як альтернативне паливо для зменшення викидів забруднюючих речовин і підвищення ефективності згорання. Вода сприяє зниженню температури полум'я, і завдяки цьому викиди NO_x можуть бути значно зменшені. При використанні таких палив вода дозволяє змінити їх фізико-хімічні властивості. Метою даної роботи є короткий огляд сучасних досліджень і останніх напрацювань в даній тематиці.

Для створення емульсії потрібно мінімум дві незмішувані речовини, наприклад (вода і рідке паливо). В залежності від їх співвідношення після диспергації (перемішування) можуть бути два типи емульсійного палива: «нафта у воді» (O/W), у якому паливо диспергується у воді, і тип «вода в нафті» (W/O), у якому вода диспергується в маслі [2].

В роботі [3] проілюстровані три режими нагрівання краплі паливної емульсії: випаровування (evaporation), пихтіння (puffing) та мікробибуху (micro-explosion). В першому режимі поверхня краплі залишається цілою і з часом розмір краплі монотонно зменшується. В режимі пихтіння в деякому місці поверхні з'являється нарост (викривлення), який через короткий проміжок часу лопається і біля краплі з'являються значно менші краплі масла. Це пов'язано з кипінням крапель води всередині краплі емульсії. При більш інтенсивному нагріванні, коли всередині краплі зароджуються багато

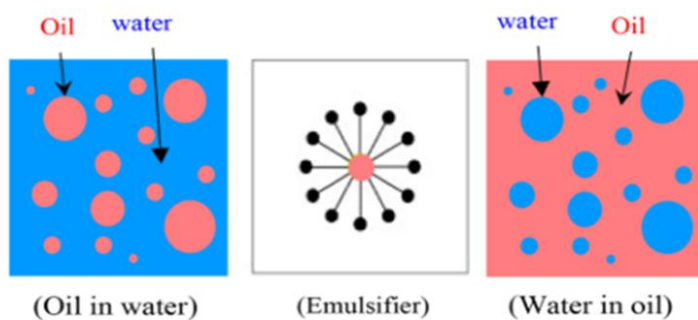


Рис. 1.1. Тип і дисперсна структура емульсій олія-вода: а) пряма; б) обернена [2].

парових бульбашок, можливе різке збільшення розміру краплі і її руйнування, що називається мікробибухом. Протікання того чи іншого режиму залежить від значення температури краплі: при менших спостерігається випаровування, при більших – мікробибух.

Для оцінки умов виникнення мікробибуху є декілька підходів:

- 1) оцінка досягнення критичної температури зародження (близької до температури кипіння одного з компонентів емульсії) на межі W/O.
- 2) тиск в паровій бульбашці на межі W/O перевищує поверхневий натяг і тиск навколишнього середовища.
- 3) досягнення парової бульбашки критичного радіусу, що знаходиться експериментально.

В роботі [4] проводилося дослідження поведінки емульсійної краплі, що виникала в результаті злиття краплі води і краплі рідке паливо (олія, гас). В

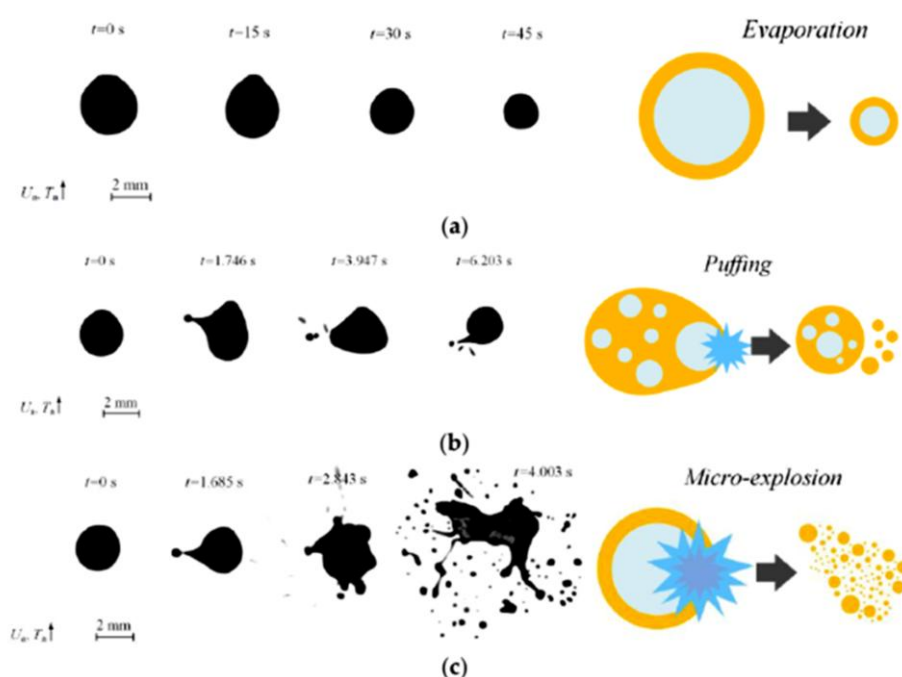


Рис. 1.2. Три режими випаровування краплі: а) звичайне, б) пихтіння, в) мікробибух [3].

результаті утворювалася неоднорідна крапля з добре помітною межею розділу нафтопродукт/вода. Таку краплю нагрівають на нагрітій підкладці або в потоці гарячого повітря. При високій температурі протягом дуже короткого часу 1-2 мс спостерігався мікрОВибух такої краплі. Автори звернули увагу, що коли відбувається перевищення мінімального порогу відношення радіаційного $Q_{\text{рад}}$ до повного теплового потоку на краплю $Q_{\text{сум}}$, час випаровування різко зменшується. Це відбувається за рахунок швидкого кипіння краплі емульсії та її вибухового роздроблення з утворенням великої групи дрібних крапель (аерозоль). Цей результат пояснювався більшим поглинання нафтопродуктів випромінюваної енергії в порівнянні з водою і, відповідно, більша кількість теплової енергії підводиться до межі розділу нафта/вода.

Характеристики займання (час та мінімальна температура) та горіння (час та теплота згорання) водо-паливних ретельно перемішаних емульсій отриманих із відходів (олія), що містять нафтохімічні речовини [5]. В даному випадку температура займання олії була вища за температуру кипіння води. Що говорить про те, що мікрОВибух спричинює нагрівання саме глобул води. Представлені кадри швидкісної відеозйомки горіння краплі емульсії з 50%

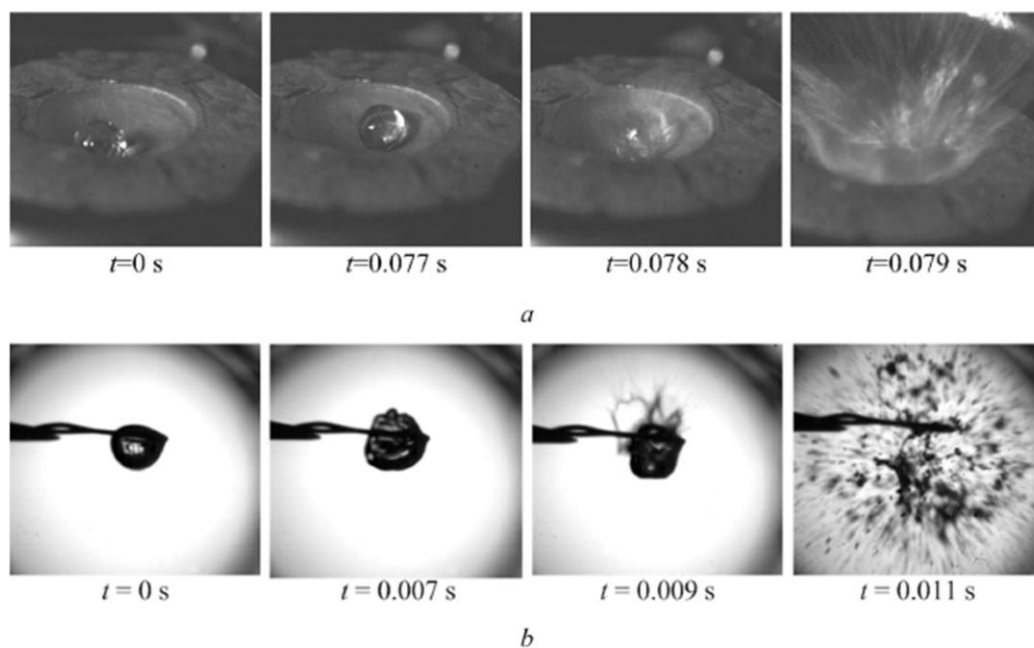


Рис. 1.3. МікрОВибух краплі на підложці і підвісі [4].

води. Якщо горіння краплі «чистого» масла виглядає як класичне горіння краплі рідини: рівномірне зменшення квадрату розміру горіння парів відбувається поблизу поверхні краплі). Для вказаної емульсії в деякий момент часу біля поверхні краплі відбувається спочатку невеликий спалах, а згодом (після мікрОВИбуху) відбувається парофазне горіння у всьому просторі печі навколо краплі. Загальний механізм горіння емульсії включає такі стадії: 1) інертний нагрів, 2) випаровування води та рідкого палива, 3) утворення газофазної суміші з парів, 4) газофазне займання і 5) згоряння суміші.

Час затримки займання (2-3 с) і час горіння (4-5 с) крапель емульсії (діаметр 2.5 мм) зменшується порівняно з однорідним рідким паливом без води. Цей результат пояснюється тим, що при додаванні води кипіння і подальший розпад краплі паливної емульсії інтенсифікувалися. В залежності від температури зменшення часу затримки склав біля 1 с, а часу горіння 2 с. В режимі низькотемпературного горіння тривалість вигорання всіх досліджуваних палив слабо залежить від температури печі. Отже, оточуюче середовище суттєво впливає на нагрів палива (час затримки займання) і тому можна обмежитися попереднім нагріванням камери згоряння не вище екстремальних температур, які є достатніми (мінімальними або пороговими) для займання. Мінімальна температура займання вища для емульсії O/W50% (~460 °C), де для «чистого» палива ~380°C.

В роботі [6] вивчається самозаймання та горіння краплі емульсії в умовах підвищеної температури та тиску. Автори показали, що при температурі 500-600 °C і тиску в 1 атм краплі не спалахували. Однак при підвищенні тиску спостерігалось спалахування крапель. Це пояснювалось зменшення тепловідводу потоком Стефана (пропорційний коефіцієнту дифузії) при підвищення тиску.

Після внесення краплі в піч її температура поступово зростала і наближалася до температури кипіння води (152 C при 5 бар). Діаметр краплі спочатку незначно збільшився через теплове розширення, а потім почав

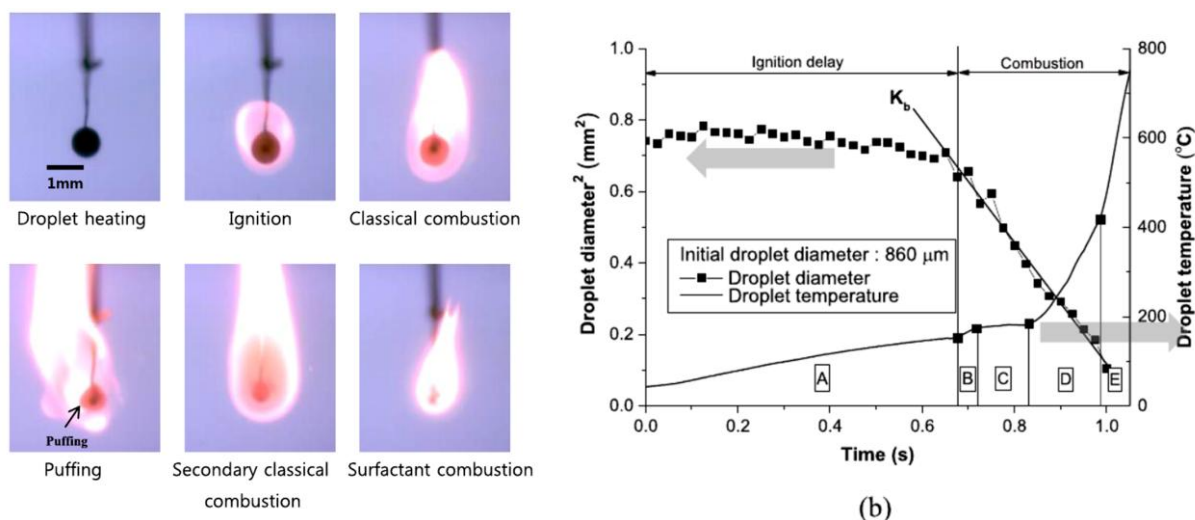


Рис. 1.4. Горіння краплі емульсії [6].

зменшуватися. Протягом цього періоду не спостерігалось роздування крапель, оскільки краплі недостатньо нагрівалися для утворення водяної пари. Час між початком експерименту та запалюванням є затримкою запалювання. За цих умов займання парів відбувалося поблизу поверхні краплі. Коли полум'я розвивалося навколо краплі, температура краплі швидко зростала. Після запалювання протягом короткого періоду часу спостерігалось класичне краплинне горіння. Адже температура краплі ще не досягла температури кипіння води, щоб розпочався процес надування (puffing). Температура краплі зростала, поки не досягла приблизно 170 С.

Після цього за умови тиску 5 бар розпочинався процес надування. Коли температура краплі перевищувала температуру кипіння води, перегріті краплі води в краплі перетворювалися на водяну пару і вибухали з поверхні краплі. При цьому температура краплі залишалася практично незмінною, бо поглинуте тепло йшло на випаровування води. Після відбувається вторинне класичне горіння краплі, оскільки вміст води в краплі зменшувався під час надування. Значне підвищення температури краплі спостерігалось на пізніх стадіях горіння краплі.

Авулапаті і колеги [7] теж досліджували процес мікробибуху крапель емульсій в печі. Вони спостерігали монотонне збільшення розміру краплі і появу струменя рідини, що виходить з поверхні краплі через високий локальний внутрішній тиск, викликаний розширенням і розривом бульбашок

ближче до поверхні. Це створює шлях для пари всередині краплі рідини для викиду під високим тиском, що призводить до сильного виштовхування пари. Цей сильний викид пари в решті-решт призводив до витягування плівки рідини і подальшого її руйнування на краплі. Характерні розміри крапель після мікробибуху є менше 200 мкм.

Крім дослідження поодиноких крапель емульсій увага приділяється і натурним дослідженням горіння розпиленого факелу емульсійного палива.

Відомі два основні ефекти придушення (погіршення) горіння в альтернативних видах палива з підвищеним вмістом води [8]. По-перше, виникає сильний ефект охолодження через випаровування та нагрівання води, а по-друге, концентрація кисню в реагентах дещо зменшується зі збільшенням вмісту води, якщо підтримується стехіометричне горіння. На рис. 1.5 показана схематична діаграма горючості парів вищих вуглеводнів, змішаних з повітрям і водяною парою при атмосферному тиску. Зі збільшення вмісту водяної пари в повітрі зменшується діапазон концентрацій парів вуглеводнів для їх займання. При спалюванні емульсії в чистому повітрі кількість водяної пари збільшується після її випаровування. З цієї діаграми (рис. 1.5) видно, що теоретично вищі вуглеводні з вмістом води до 75 мас.% легкозаймисті в стехіометричних повітряних атмосферах. Невеликі коливання складу газової суміші є критичними. Якщо вміст води в газовій суміші не можна зменшити, то вміст азоту в окислювачі можна легко зменшити за допомогою збагачених киснем розпилювачів або при використанні чистого кисню замість повітря.

В даній роботі [8] показано, як ефективність згоряння крапель емульсій з вмістом води 50 % мас. в кисні збільшується до 78% в порівнянні з повітрям (45%) через відсутність азоту, присутнього в процесі згоряння. З цієї причини кисневе спалювання здається ідеальним для спалювання низькокалорійного палива з вираженим вмістом води.

Вміст води в паливі, як і концентрація кисню в окислювачі, мали значний вплив на викиди NO_x . У випадку згоряння чистого мазуту на

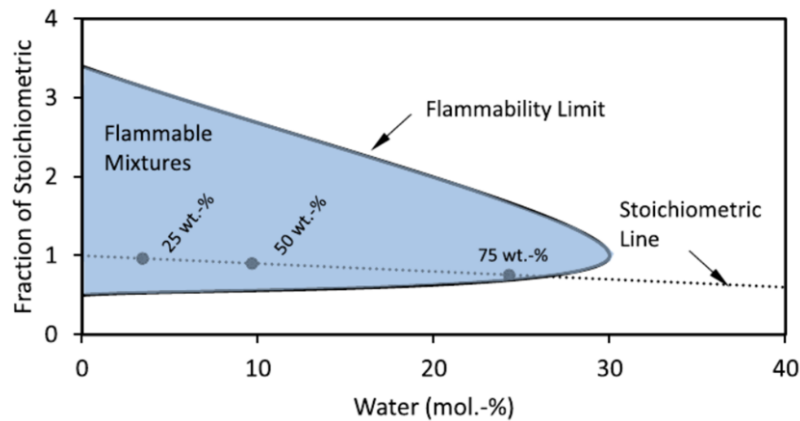


Рис. 1.5. Схематична діаграма горючості парів вищих вуглеводнів (C_nH_{2n+2} з $n < 5$), змішаних з повітрям і водяною парою при атмосферному тиску [8], а також стехіометричних сумішей ОВЕ-повітря з вмістом води 25, 50 і 75% мас.

кисневому паливі викиди NO_x становили 760 ppm і були швидко зменшені за рахунок спалювання емульсії з великим вмістом води: до 430, 210 і 100 ppm для вмісту води, відповідно, 25, 50 і 75 мас.%. Це було безпосередньо пов'язане зі зниженою температурою горіння і, таким чином, демонструє сприятливий вплив підвищеного вмісту води в паливі на викиди NO_x .

Результати спалювання емульсій масло/вода з вмістом води в 10 і 20 % в дизельному двигуні [9] показали зменшення інтенсивності горіння (яскравості полум'я), димоутворення і часу горіння (до 15.3%) порівняно з дизельним паливом (ДП), а також скоротився період горіння. Чиста витрата палива (без урахування вмісту води в DWE) збільшилася в середньому на 5.2% порівняно з витратою ДП. Хоча тепловий ефект емульсії, природно, що був меншим. Температура вихлопу знизилася в середньому на $-5,1\%$ для DWE порівняно з DO. В середньому використання емульсії зменшило викиди NO_x на -19.6% і дим на -66.3% порівняно з ДП.

Результати тестування двигуна та візуалізації згоряння, під час згоряння DWE розпилення палива було викликано мікробухом води, а тривалість згоряння була зменшена завдяки покращенню згоряння. Це було пов'язано зі збільшенням ефективності змішування палива з повітрям і зниженням температури горіння за рахунок прихованої теплоти випаровування води. Отже, можна було одночасно зменшити кількість NO_x і диму.

Одним із напрямків спалювання емульсій є її попереднє спінення [10]. Для цього емульсію вспінюють з киснем чи перекисом водню. А вже потім подають на спалювання.

Таким чином, зробивши огляд сучасних досліджень було встановлено, що горіння емульсій є актуальною задачею. Переважно їх дослідження відбувається експериментально. Тому в своїй роботі поставлені наступні актуальні завдання:

1. Аналітичний опис характеристик мікровибухів та пульсацій при нагріванні крапель водопаливних емульсій
2. Вплив електричного розряду на випаровування і горіння крапель емульсій (з вмістом води до 60-70%).

Так в роботі [11] розглядається випаровування краплі рідин в повітрі кімнатної при дії високочастотного електричного розряду. Аналіз проводився в припущенні, що дія розряду є тепловою. Показано, що при випаровуванні крапель емульсії (з вмістом води до 50%) після стадії прогрівання спостерігаються пульсації геометричного розміру. Розмір краплі з певною частотою періодично змінюється поблизу деякого середнього значення, яке з часом «випаровування» зменшується. Побудована фізико-математична модель розігріву краплі при тепловій дії розряду. Пульсації пояснюються випаровуванням глобул води всередині краплі емульсії і подальшим збільшенням розмірів парових бульбашок. Втрата матеріалу емульсії при дії електричного розряду відбувається в основному за рахунок викидів під час пихтіння. Тобто електричний розряд приводить до диспергування крапель емульсій з великим вмістом води на відміну від крапель індивідуальних горючих рідин.

Аналогічні дослідження випаровування і горіння краплі водо-масляної емульсії в нагрітій печі проводилися Кондратьєвим і Опятюком [12].

Є ще ряд цікавих публікацій з даної тематики [13-].

Розділ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПАРОВУВАННЯ І ГОРІННЯ ЕМУЛЬСІЙ

2.1. Приготування емульсій.

Ультразвукові апарати зондового типу використовуються для створення емульсій та змішування рідин. Ультразвукова енергія викликає кавітацію, утворення та схлопування мікроскопічних бульбашок. Цей процес допомагає емульгувати рідини, що не змішуються, отримуючи стабільні і дрібнодисперсні емульсії.

Двофазна емульсія являє собою суміш води в дизельному паливі без використання будь-якої поверхнево-активної речовини. У двофазному двигуні на WDE потоки води та дизельного палива піддаються ультразвуковій емульгуванню безпосередньо перед двигуном. Ультразвукова двофазна емульсія «вода в дизельному паливі» надходить безпосередньо з ультразвукового проточного реактора двигун внутрішнього згоряння. Без поверхнево-активної речовини емульсія призначена задля зберігання, а безпосереднього згоряння.

В якості об'єктів дослідження були вибрані емульсії «дизель-вода» в діапазоні зміни частки води від 0 до 100 % з кроком в 10%.

В скляну ємність з об'ємом 10 мл медичним шприцом вносилися відповідна кількість дизельного палива (з ОККО) та води (бюветна). Зовнішній вид всіх попередніх зразків зображений на рис. 2.1.

Для змішування і емульгування використовувався ультразвуковий диспергатор УЗДН-1 на частоті 22 кГц. Зонд емульгатора поміщувався в робочу ємність приблизно на рівні 0.5-1 см від дна ємності. Процес тривав близько 1 хв. Під час емульгації зонд в ручному режимі переміщували вертикально (для більш ретельного перемішування всього об'єму). В результаті суміш двох нерозчинних рідин (одна в одній) перетворювалася в білу субстанцію по всьому об'єму, яку в подальшому названа «емульсією».



Рис. 2.1. Вигляд суміші до перемішування: зліва направо D10W90, D20W80, D30W70, D40W60, D50W50, D60W40.



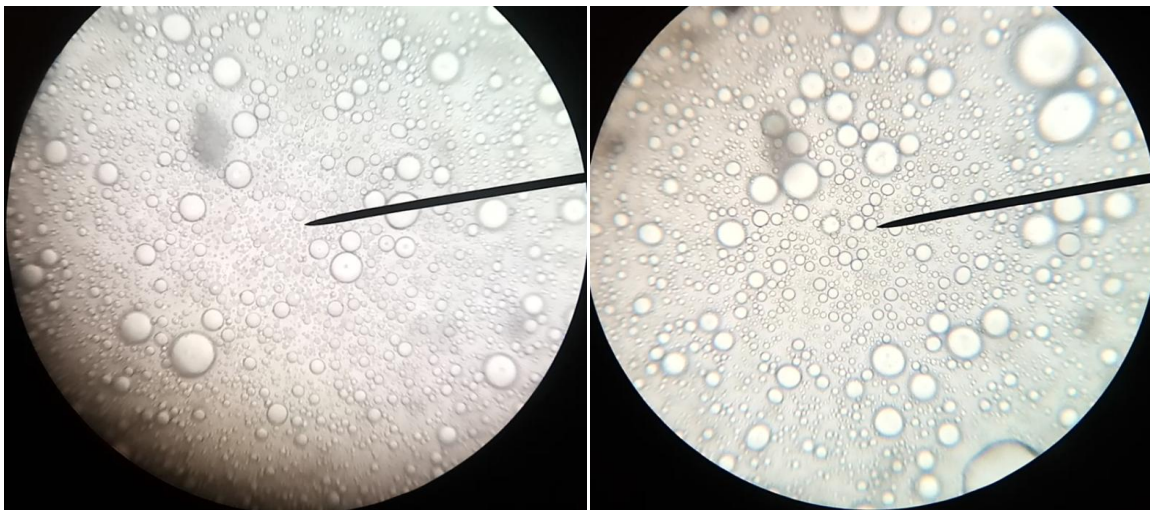
Рис. 2.2. Вигляд суміші після перемішування: зліва направо D10W90, D20W80, D30W70, D40W60, D50W50, D60W40, D70W30, D80W20, D90W10.

Стан утвореної «емульсії» після приготування через 5 хвилин зображений на рис.2.2. Видно, що при часі дії ультразвуку протягом 1 хвилини емульсія не однорідна. На місці, де була вода, тепер виникла біла субстанція. На місці дизельного пального – мутна рідина, що переважно складається з дизеля. При концентрації води в 40 і 50 об'ємних % перемішування дизелю і води є найкращим. Тут спостерігається найбільша кількість «емульсії» – білої субстанції.

Одразу після приготування отримані емульсії були оглянуті в оптичний мікроскоп (рис. 2.3) на предметному склі. Діаметр голки в окулярі складав 7.5 мкм. У наведених трьох зразках, як видно, присутні чітко виражені прозорі кульки різного розміру. Середній розмір кульок різний, але в емульсії D40W60 він найменший.

В роботі [13] на прикладі емульсії D95W5 показано, що протягом 10 с емульсія починає дестабілізуватись. Так за 10 с середній розмір краплі води з

D20W80



D40w60



D60W40

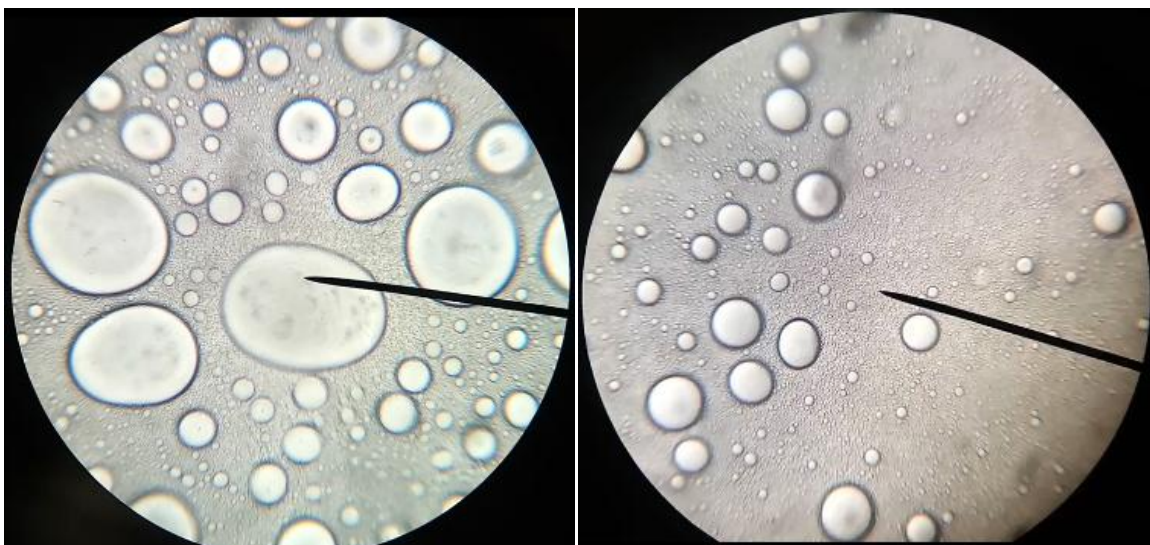


Рис. 2.3. Вид емульсії в мікроскоп після близько 30 секунд після приготування.

0.409 мкм швидко збільшується до 15.38 мкм. Спочатку, оскільки емульсія щойно виготовлена при ультразвуковій обробці, краплі мають мізерний розмір і вони вільно рухаються в безперервній фазі емульсії. Однак, оскільки поверхнево-активна речовина не додається, сила відштовхування, яка утримує дисперговані краплі води, стає слабкою, що призводить до збирання крапель. Краплі спочатку розділені тонкою плівкою. Товщина тонкої плівки буде швидко зменшуватися протягом короткого періоду часу через притягання сил Ван-дер-Ваальса. Коли плівка крапель досягне критичного значення, вона розірветься, що призведе до того, що новоутворені краплі рухатимуться одна до одної, утворюючи більшу краплю. Через 25 с краплі стають більшими та важчими, і в результаті вони опускаються на дно контейнера. Це свідчить про те, що процес осадження вже почався. Потім, коли час збільшується до 132 с, процес дестабілізації продовжується, утворюючи все більшу і більшу кількість крапель, які опускаються на дно скляної ємності.

В нашому випадку видно, що за час відбору, розміщенні на предметному склі та отриманні фото утворювалися видимі великі краплі. В той же час були присутні і велика кількість мікронних крапель. Розшарування чітко прослідковується вже через добу (рис. 2.4). В чистому дизелі і воді процес кавітації теж відбувається.

Зазвичай у системі подачі палива одноциліндрового дизельного двигуна тривалість руху палива від моменту створення до його повного впорскування



Рис. 2.4. (Зліва направо). Дизельне паливо і вода після дії ультразвукового зонду і емульсія після відстоювання приблизно добу.

в камеру згоряння займає близько 2–5 с. Тому в таких двигунах на процес дестабілізації не враховують.

Відомо, що емульсія – це система з рідкою безперервною фазою та дисперсною фазою, що складається з крапель рідини. Найбільш поширені два типи емульсій: емульсія "масло у воді" та емульсія "вода в олії" (рис. 1.1). В емульсії "масло у воді" безперервною фазою є вода, а дисперсної - олія, тоді як в емульсії "вода в олії" безперервною фазою є олія, а дисперсної - вода.

Чи перетвориться емульсія "вода в маслі" на емульсію "масло у воді", залежить від об'ємної частки обох фаз та емульгатора. Емульгатор - це речовина, яка стабілізує емульсію, адсорбуючись на межі розділу фаз олія/вода. Найбільш поширеною формою емульгатора є поверхнево-активні речовини, хоча полімерні та тверді частинки часто виконують аналогічну роль.

В нашому випадку ПАР в суміш не додавалися. Тому для пояснення появи бульбашок використаємо поняття ультразвукової кавітації – утворення і активність газових або парових бульбашок (порожнин) в середовищі, що опромінюється ультразвуком. Існує два види ультразвукової кавітації. Перший – інерційна кавітація, природа якої пов'язані з утворенням в рідині парогазових порожнин внаслідок розтягування рідини під час негативного напівперіоду коливань в акустичної хвилі і різкого їх стиснення в напівперіоді стиснення. Другий вид - це неінерційна («стабільна») кавітація, що характеризується коливаннями довго існуючих, стабільних газових бульбашок. Ці бульбашки можуть об'єднуватися або зростати до видимих розмірів за рахунок так званої направленої дифузії. Суть цього явища полягає в тому, що за період акустичного коливань газ дифундує в бульбашку під час фази розрідження, а потім виходить з нього під час фази стиснення. Розмір бульбашки в фазі розрідження значно більше, ніж у фазі стиснення, то результуючий потік газу (пари) спрямований усередину бульбашки, через що бульбашка росте. Стабільні бульбашки існують протягом багатьох тисяч або мільйонів циклів ультразвукових коливань, тоді як час життя інерційних

кавітаційних бульбашок зазвичай можна порівняти з тривалістю декількох циклів.

Бульбашки повинні спливати в суміші за законом Стокса (наприклад, швидкість спливання бульбашки радіусом 10 мкм становить 0,2 мм/с), а малі бульбашки повинні розчинитися під дією тиску, обумовленого поверхневим натягом $2\sigma/R$, де σ – коефіцієнт поверхневого натягу на межі газу і рідини, а R – радіус бульбашки. Для прикладу для бульбашки радіусу 1 мкм в воді цей додатковий тиск становить 1.5 атм.

Для пояснення виникнення та стабільного існування в рідинах газових бульбашок були залучені різні механізми, докладно розглянуті в ряді книг та оглядів [14, 15] висунули припущення, що органічні молекули можуть формувати оболонку на поверхні бульбашки, яка перешкоджає дифузії газу з нього.

2.2. Випаровування емульсій в нагрітій печі.

На першому етапі проводилося дослідження випаровування крапель емульсій в нагрітій печі. Крапля емульсії D50W50 помішувалася на хромель-алюмелеву термопару (діаметр електродів 0.2 мм і спаю в 0.55 мм) і за допомогою спеціального механізму вводилася через верхній отвір всередину трубчатої печі. З одного краю трубчатої печі розташовувалося джерело світла, з іншого – веб-камера. Зйомка велася з частотою кадрів 30 кадр/с.

U, mV	Δt , °C	t, °C
6	147	157
7.5	184	204
9,3	228	248
11	271	291

Температура печі встановлювалася на 4-х рівнях, які перевищували температуру кипіння води (температура кипіння дизельного палива варіюється в межах 180-360 °C). Тому в кожному з цих випадків температура емульсії була близька до температури кипіння води. Час між приготуванням і внесенням в піч складав більше 1 хвилини.

Якісно поведінка краплі була різною при різних температурах повітря в печі. На рис. 2.5 показана кінограма однієї з крапель емульсії D50W50 при температурі повітря в $t_0 = 157$ °C.

Тут чітко спостерігався режим «пихтіння» («puffing»). Після періоду прогрівання на поверхні краплі з'являється бульбашка, яка повільно розширюється і через деякий час лопається. Об'єм бульбашки був близьким до об'єму самої краплі. Цей процес збільшення і різкого зменшення краплі в подальшому будемо називати «пульсацією». Якщо перга пульсація тривала трохи менше 2 с (крапля недостатньо прогрілася), то наступні пульсації відбувалися в середньому через однакові проміжки часу. Протягом часу кількість бульбашок, які одночасно могли з'являтися на поверхні первинної краплі зростала до двох, трьох і більше. Але сумарний їх об'єм був порівняним з об'ємом краплі. Однак при подальшому підвищенні температури t_0 кількість бульбашок зростає, але їх розмір стає меншим (рис. 2.5-2.7)

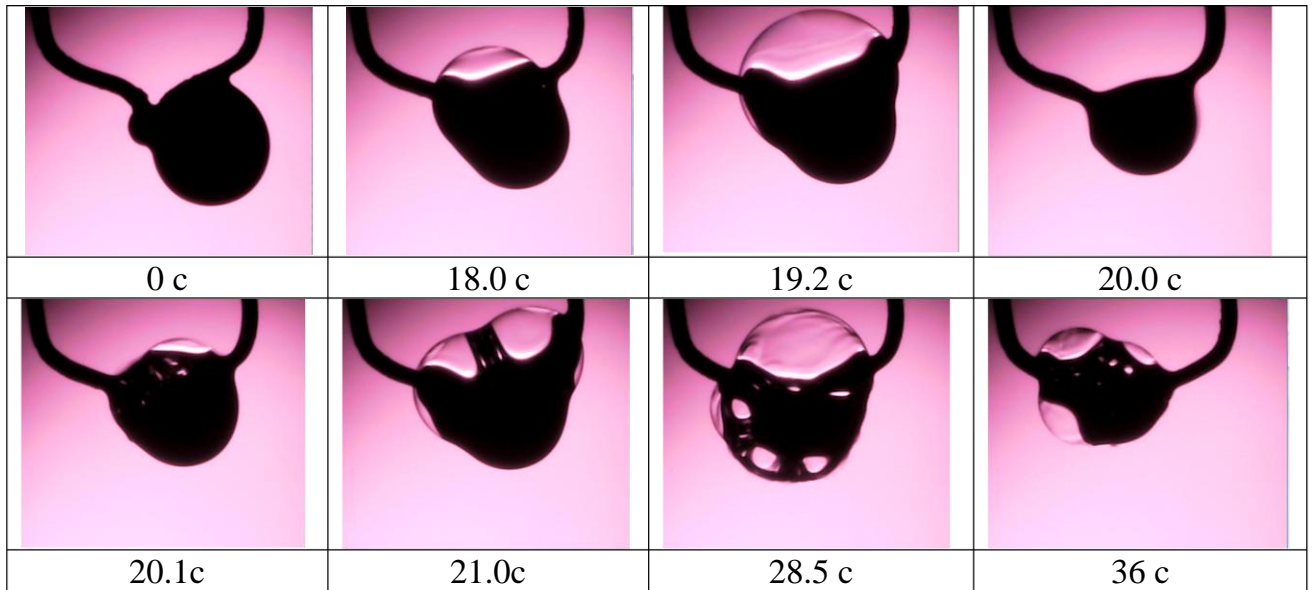
Зі збільшенням температури в печі період пульсацій краплі емульсії зменшується, як і загальний час випаровування (включаючи час прогрівання).

$t_0, ^\circ\text{C}$	157	204	291
$\tau_{\text{випар}}, \text{с}$	42	34	32
$T_{\text{пульс}}, \text{мс}$	≈ 600	≈ 300	≈ 50

Якісне пояснення очевидне: більша температура в печі спричиняє більш інтенсивну теплопередачу на краплю і активне зростання розміру бульбашок за рахунок випаровування в глобулах води.

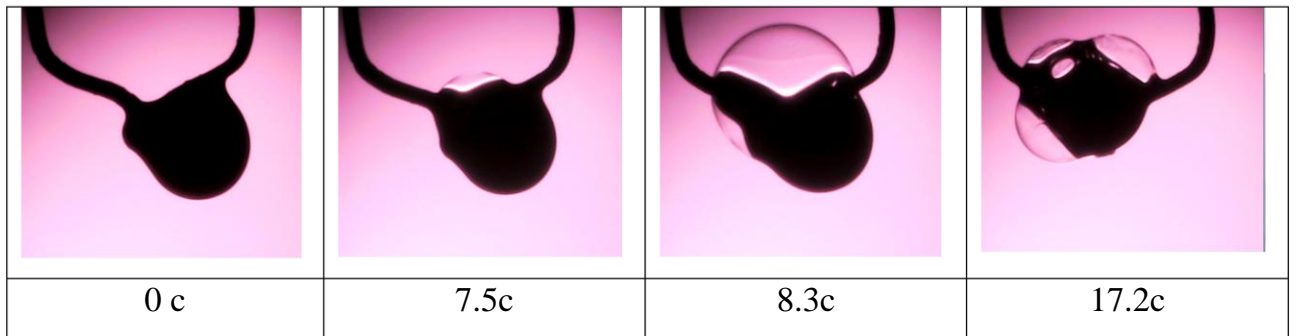
При лусненні бульбашки спостерігалися невеличкі (ледь помітні) викиди матеріалу краплі.

При температурі 290 °С при одній з перших пульсації крапля різко злітає з підвісу. Це пояснюється переходом краплі в режим мікрровибуху, коли при різкому нагріванні розширення бульбашок всередині краплі призводить до її руйнування. В даному випадку більш інтенсивний теплообмін відбувається через термоелектроди і саме пароутворення відбувається поблизу спаю термододів. Саме тому крапля може не втриматися на підвісі.



Номер пульсації	1	2	3	4	5	6	7	8
Час розширення, мс	1787	307	568	674	635	700	700	600

Рис. 2.5. Поведінка краплі емульсії D50W50 з $d_0 = 1.4$ мм в повітрі з $t_0 = 157$ °С.



Номер пульсації	1	2	3	4	5	6	7	8
Час розширення, мс	734	496	669	464	344	298	262	367

Рис. 2.6. Поведінка краплі емульсії D50W50 з $d_0 = 1.4$ мм в повітрі з $t_0 = 204$ °С.

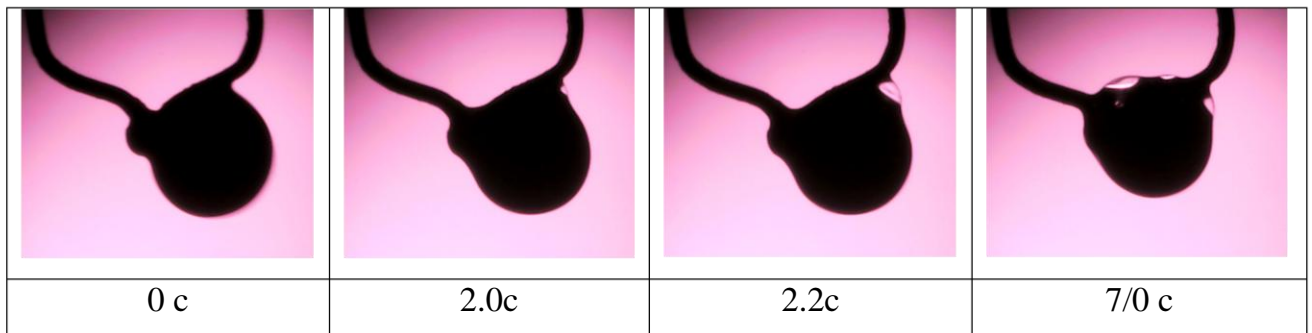


Рис. 2.7. Поведінка краплі емульсії D50W50 з $d_0 = 1.4$ мм в повітрі з $t_0 = 248$ °С.

2.3. Випаровування і горіння крапель емульсій під дією електричного розряду.

На тонку ХА термопару зі спаєм 0.5 мкм підвішувалася крапля емульсії. Змочування відбувалося таким чином, що спай знаходився всередині краплі. Біля краплі на деякій відстані від неї розміщувався мідний електрод діаметром 150 мкм від міні генератора Тесла. В певний момент часу включалося живлення котушки і краплю починав бити високочастотний розряд. Крапля перебувала в повітрі кімнатної температури.

На прикладі індивідуальної краплі можна було оцінити теплову потужність розряду. На прикладі краплі води було помічено, що йде швидке її випаровування. Якщо припустити, що за цей порівняно невеликий час випаровування все тепло від розряду передається краплі (оцінки показали, що тепловіддача дає менше 10% відносно потужності P), маємо наступне рівняння

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

Тут L – питома теплота пароутворення, ρ – густина рідини. Виходячи з нього об'єм краплі повинен зменшуватися лінійно з часом. Отримані таким чином значення потужності розряду P склали від 0.13 до 0.25 Вт в залежності від відстані до краплі.

Чим ближче крапля до розряду, то його потужність падає. Це можна пояснити наступним чином. Розряд представляє собою циліндр деякої довжини (в спокійному стані близько 1.5-2 мм). При віддаленні краплі від розряду спостерігається погіршення теплопередачі від розряду до краплі.

При наближенні краплі до розряду на відстані менші, ніж довжина електричного розряду в спокійному стані, реальна довжина розряду зменшується. Отже, при протіканні струму в такому плазмовому каналі виділяється менше тепла і, відповідно, менше передається тепла на краплю.

Потужність розряду також визначалася через теплову дію на парафін. Брався шматок парафіну при кімнатній температурі. Вимірювали масу

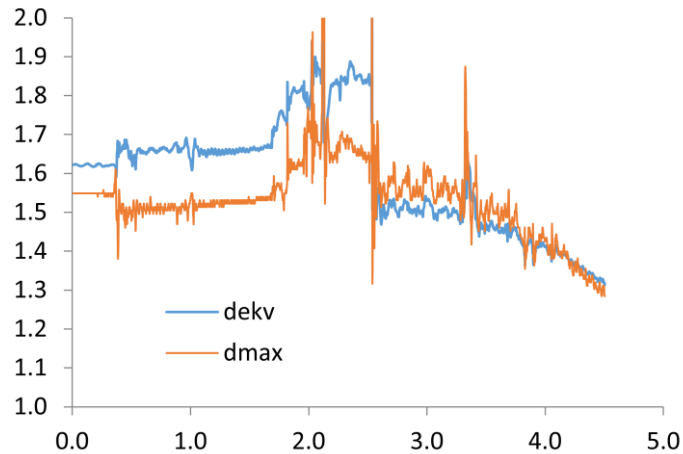


Рис. 2.8. Приклад результату обробки відео для краплі емульсії D10W90.

парафіну до дії розряду і після певного часу, коли рідкий парафін скапував з твердого шматку. По масі парафіну, що розплавився, отримували оцінку потужності електричного розряду. Він склав 0.13 Вт.

Відео зйомка краплі емульсії (50% ДП / 50% води) проводилася з частотою 400 кадрів/сек за допомогою фотоапарату Nikon 1, який розміщувався на оптичну лаву з об'єктивом. На задньому плані розміщується світлодіодне джерело світла, що створює світлий фон на зображенні. На даній частоті зйомки тривалість кожного відео не перевищувала 5 секунд. Загальна кількість кадрів – 2000 на кожне відео.

Обробка відео проводилася в пакеті Matlab 2015 (рис. 2.8). Спрощено процедура була наступна.

1. Завантаження відео. Визначення кількості кадрів, розміру кадру в пікселях.
2. Послідовна обробка зображення на кожному кадрі. Переведення зображення в монохронне (чорно-біле), а потім в бінарне (чорне-біле) по заданому рівню контрастності. Фільтрування зображення від електроду (він на фото темний, як і крапля) і інших мілких об'єктів.
3. Знаходження контуру зображень – визначення границі краплі. На даному етапі визначалися два розміри. Перший – еквівалентний. Тобто знаходилася площа плоскої фігури всередині контуру і діаметр кола, що

має ту ж саму площу і є еквівалентним. Другий – це максимальна відстань серед горизонтальних перерізів зображення краплі.

4. Результати обробки заносилися в масив і будувався графік залежності діаметру від часу.

На рис. 2.8 показана одночасна зміна вказаних двох діаметрів (еквівалентного і максимального в перерізі). Спостерігається кореляція між характером їх зміни. При обробці іноді виникали дуже сильні стрибки значень. В бік дуже завищених значень пов'язано з торканням краплі до електроду і «врахуванням» його в розмірі краплі. Короткочасна різка зміна в область менших значень пов'язана з «прозорістю» бульбашки на поверхні краплі, яка з'являлася при бінаризації зображення.

Для аналізу використовувалися емульсії дизель-вода з об'ємним вмістом води від 10 до 80 %. Аналізуватиметься зміна еквівалентного діаметру краплі.

На рис. 2.9-2.12 представлені часові залежності діаметру краплі емульсії з різним складом води при дії електричного розряду. Як і очікувалося, характер цієї залежності і процеси, які відбувалися при цьому, різні.

Варто відмітити, що краплі чистих рідин (дизельне паливо чи вода) ведуть себе класичним чином. Тобто зміна розміру краплі в часі підкоряється закону d^2 . Тобто лінійно зменшується квадрат діаметру в часі. Особливостей в внутрішній структурі краплі індивідуальної речовини не було помічено.

При змішуванні дизельного палива і води в залежності від складу виходить або пряма, або обернена емульсія.

Прямі емульсії - олія у воді, дисперсійною фазою (те, в чому розчиняється) яких виступає вода. Зворотні емульсії – вода в олії, де дисперсійна фаза, відповідно – олія. Тип емульсій можна визначити також з її електропровідності (**метод електропровідності**). Високе значення електропровідності вказує на те, що дисперсійним середовищем є полярна рідина, а емульсія відноситься до типу м/в. Малі значення електропровідності вказують на освіту зворотної емульсії (типу в/м).

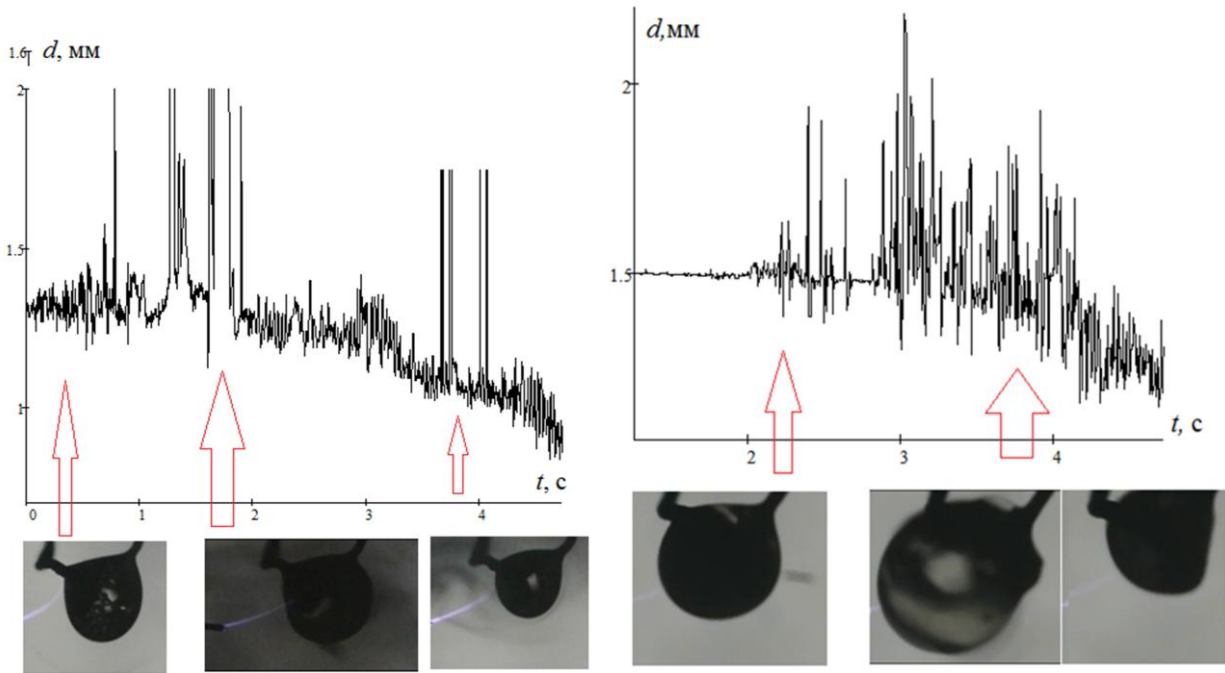


Рис. 2.9. Зміна розміру краплі емульсії а) D80W20 і б) D70W30.

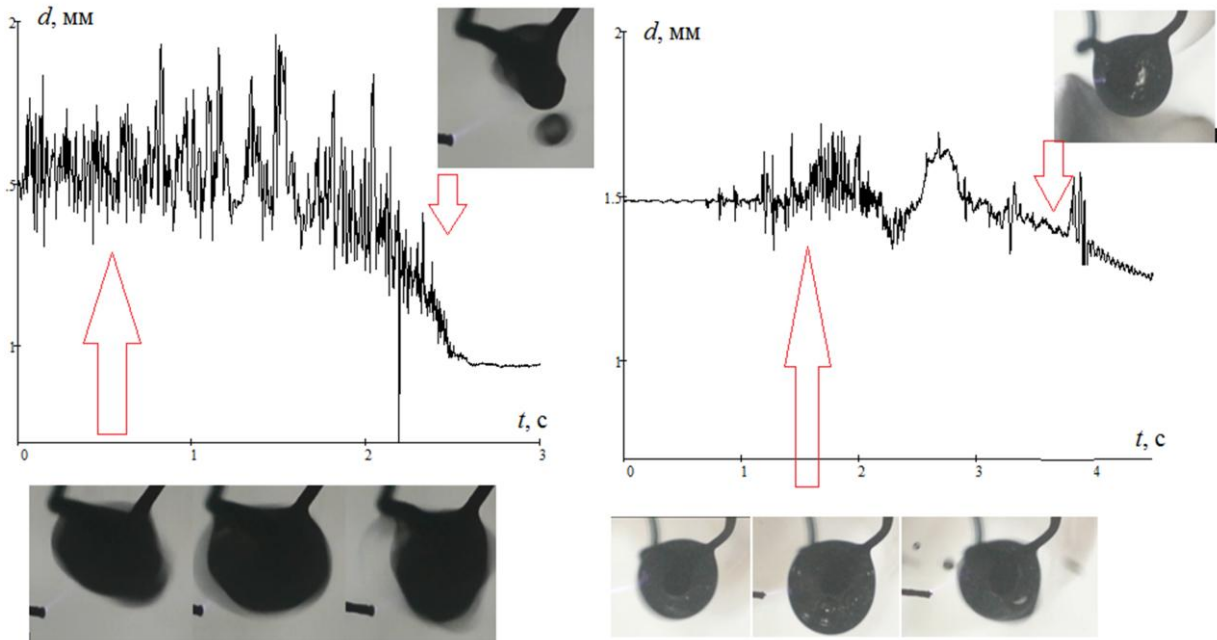


Рис. 2.10. Зміна розміру краплі емульсії а) D60W40 і б) D50W50

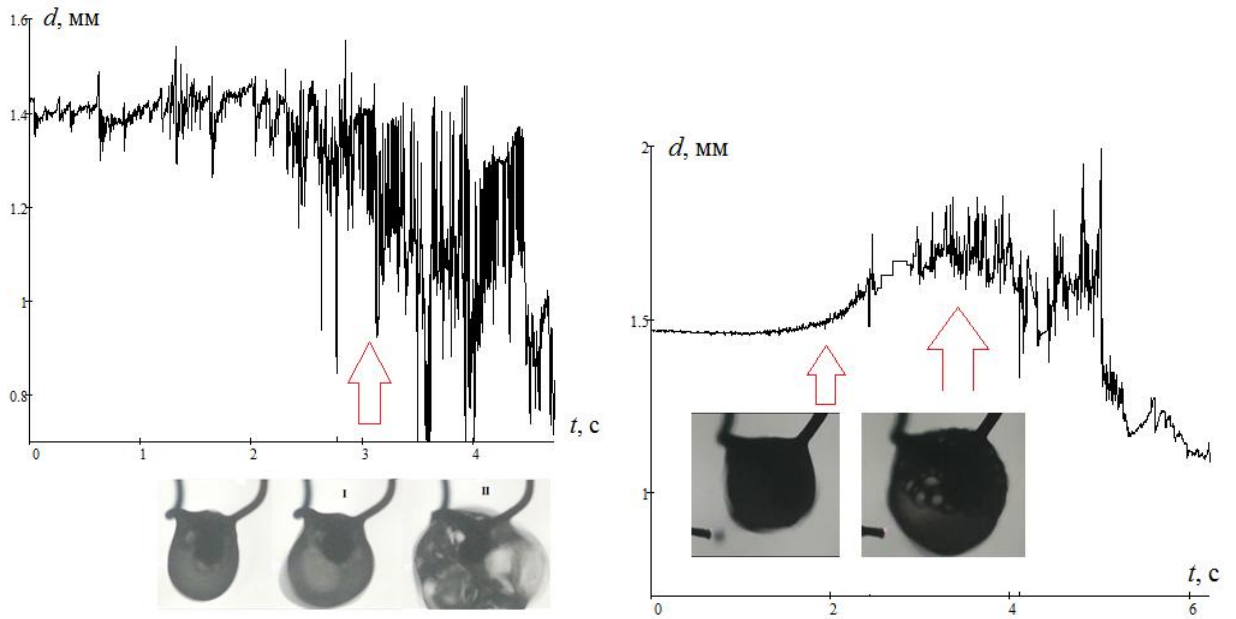


Рис. 2.11. Зміна розміру краплі емульсії а) D40W60 і б) D30W70

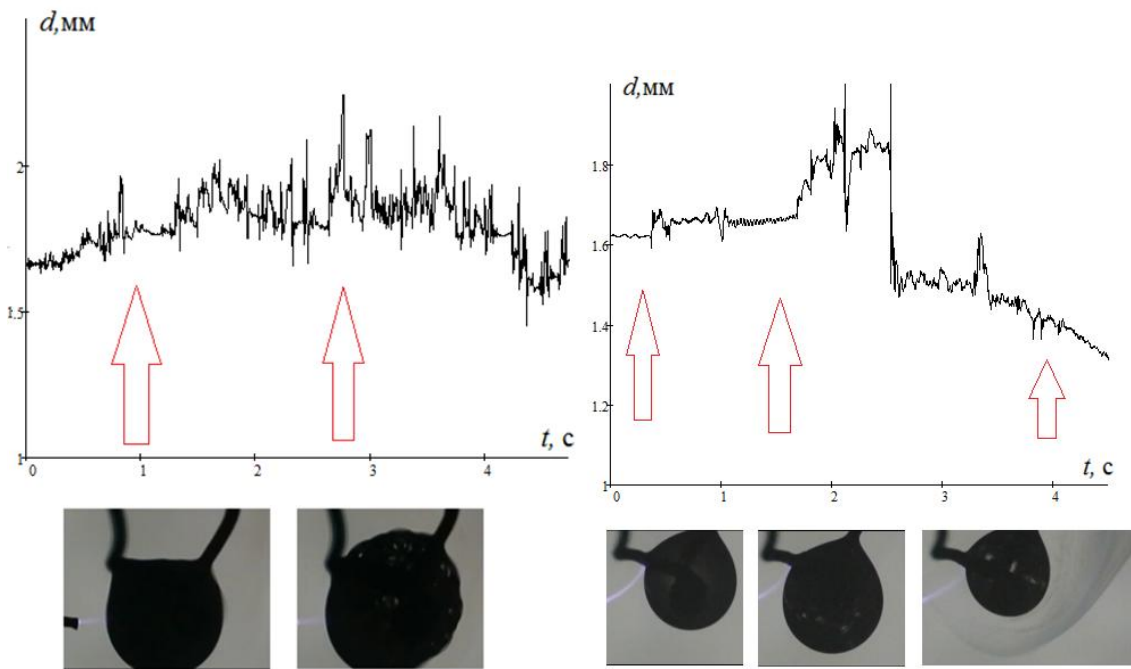


Рис. 2.12. Зміна розміру краплі емульсії а) D20W80 і б) D10W90

Таблиця 2.1. Значення електропровідності емульсій в ррм.

D100	D90W10	D80W20	D60W40	D50W50	D40W60	D20W80	D10W90	W100
0	40	65	100	150	200	370	440	500
Обернена						пряма		

Використовуюючи TDS-метр були отримані значення електропровідності отриманих емульсій (табл. 2.1) одразу після приготування в ppm (кількість іонів на 1 мільйон частинок).

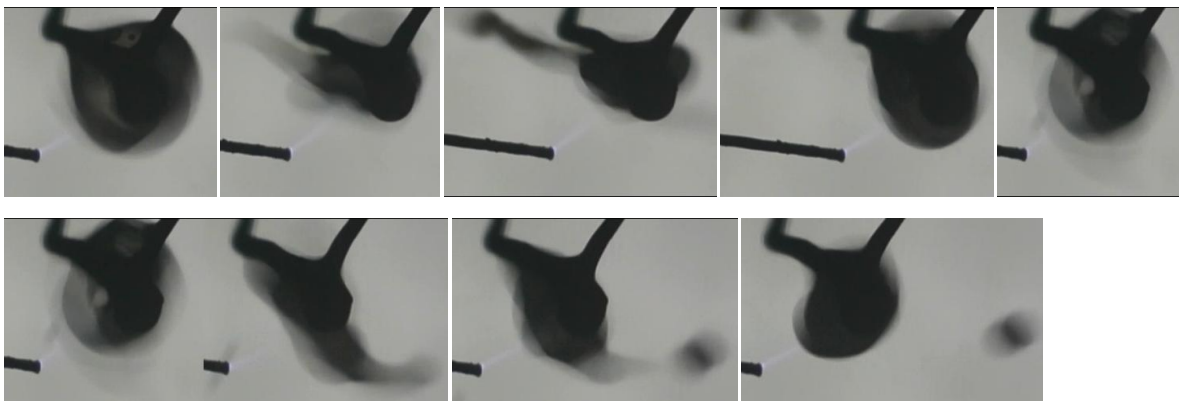
Низька електропровідність при малих частках води вказує на обернену емульсію, висока при великих частках вода – пряму емульсію.

На рис. 2.9 представлено характерну поведінку для обернених емульсій з масовою часткою води в 20 і 30 %.

Так для краплі емульсії **D80W20** характерні викиди дуже маленьких крапель (менше 100 мкм), яка одразу згорають з утворенням диму. На залежності $d(t)$ простежується закон d^2 , який «спотворений» чисельними пульсаціями. Більш крупніші краплі (більше за 100 мкм) вилітають рідко. Тобто пульсації і викиди речовини краплі слабо впливають на випаровуванню краплі в цілому.

Частота пульсацій розміру краплі для краплі **D70W30** по мірі випаровування різна. На початковій стадії після розігріву краплі викидаються малі краплі з періодом близько 20 мс. В другій частині пульсації краплі пов'язані з появою розширюючої бульбашки на поверхні краплі і лусненням. В залежності від діаметру період пульсації зменшувався від 50 до 25-30 мс.

Тепер розглянемо поведінку крапель з близькими частками води і олії. Так для краплі емульсії **D60W40** спостерігаються інтенсивні пульсації з періодом в 13-20 мс, що пов'язані з розширенням парових бульбашок. Діаметр крапель змінюється на 25%. В результаті лопання бульбашок відбувається викид великих крапель діаметром близько 200 мкм.



Починаючи з частки води 50 % і вище при випаровуванні краплі емульсій можна було спостерігати всередині краплі появу парових бульбашок з розмірами до 300 мкм, які постійно рухалися по колам. Заряд бив в верхню частину і ці бульбашки рухалися за годинниковою стрілкою. Поблизу спаю, який нагрівався сильніше, кількість бульбашок була більшою. Біля входу електроду ці бульбашки різко розігрівалися і відбувалися мікроривки крапель. Їх період становить близько 7.5-12.5 мс. В подальшому по мірі зменшення діаметру краплі і віддаленням його від електроду випаровування інтенсивно йшло з поверхні з утворенням густого диму паралельно з мікроривками крапель з розмірами менше 50 мкм (період пульсацій 32-37 мс).

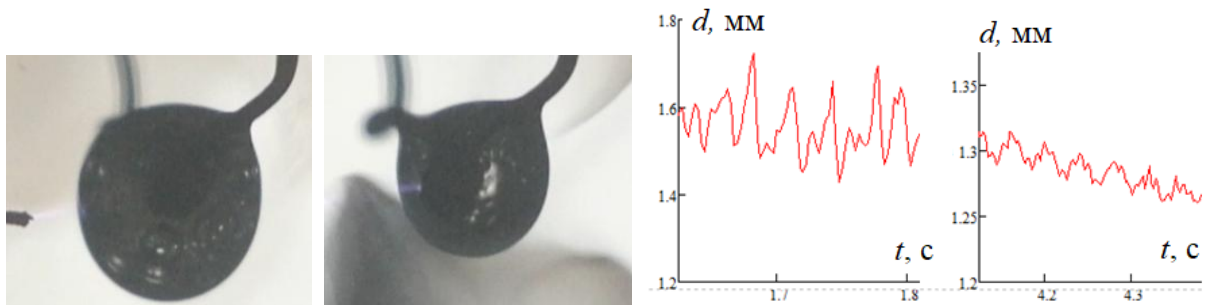


Рис. 2.13. Бульбашки всередині краплі D50W50 і пульсації розміру

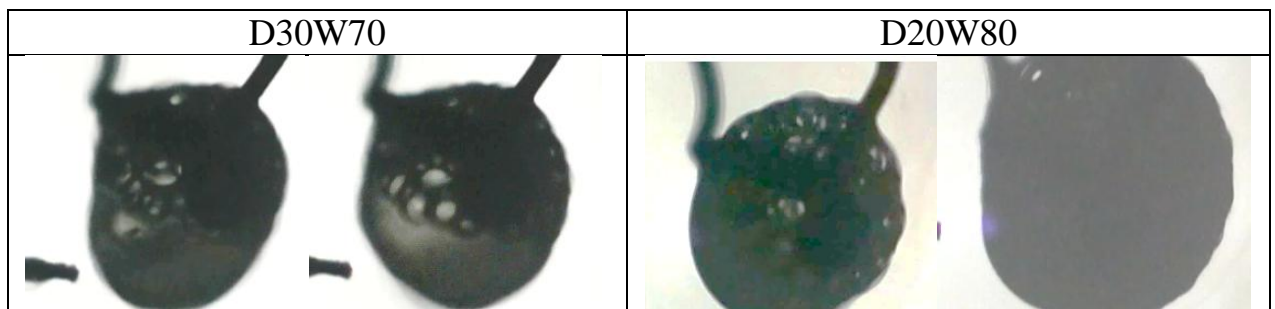
Для краплі емульсії D40W60 характерно розширення бульбашок всередині. Їх зростання починається зі спаю термопари і завершується мікроривом на поверхні (рис. 2.11a). На наступній кінограмі видно як відбувається таке зростання.



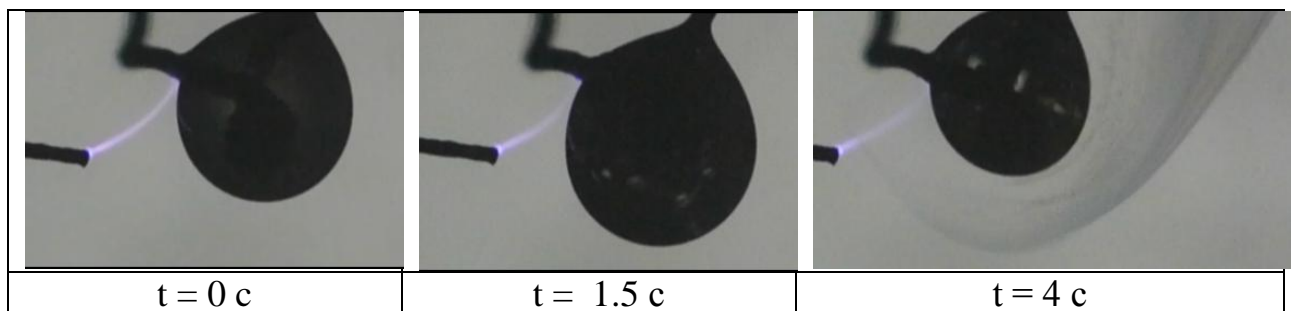
Період пульсацій тут складає 10-17.5 мс. Форма краплі тут вже не є сферичною. Потужність розряду така, що крапля ледь утримується на спаї. Для ряду крапель в такому режимі випаровування спостерігався відрив краплі від спаю і її падіння.

Для емульсій з масовою часткою води 70-90% ми маємо пряму емульсію. Особливістю випаровування таких крапель є утворення «пінної структури». Так в верхній частині краплі (поблизу більш нагрітого спаю) відбувається активне утворення парових бульбашок які протягом деякого часу можуть утримуватися. Розмір краплі при цьому збільшується на 20%.

Для краплі емульсії **D30W70** кількість і розмір бульбашок менші, ніж для емульсії **D20W80**. Період пульсацій, що пов'язані з відривом маленьких крапель (до 100 мкм) складав 10 - 15 мс.



Для емульсії **D10W90** пароутворення йде всередині краплі. На відео чітко видно рух утворених бульбашок по колу всередині краплі. Пульсації розміру тут мінімальні.



Проаналізуємо отримані результати. На рис. 2.13 представлені отримані значення періоду пульсації розміру краплі емульсії в залежності від концентрації води. Період пульсацій лежить переважно в межах від 10 – 20 мс. Для обернених емульсій характерні невеликі за амплітудою пульсації розміру краплі, форма якої залишається близькою до сферичної. Для них характерні послідовні мікрОВикиди крапель з діаметром до 100 мкм.

Для крапель прямих емульсій також характерні мікрОВикиди крапель. Крім того відбувається утворення піни з парових бульбашок поблизу

поверхні краплі, що призводить до збільшення середнього розміру на 25 % і їх поступовим лусненням. Це пояснюється значним зменшенням при нагріванні поверхневого натягу у дизельного палива і води (при 20 °С у ДП 29 мН/м, води 73 мН/м, а при 100°С 20 мН/м і 59 мН/м, відповідно). І для ДП поверхневий натяг менше, ніж для води. Тому можна припустити, що пароутворення в середині краплі йде на поверхні глобул дизельного палива, як зародків.

Для емульсій близького складу характерні інтенсивні пульсації зі суттєвою хаотичною зміною форми краплі в результаті зростання однієї чи декількох бульбашок всередині краплі, появи парового наросту і лусканням бульбашки.



Рис. 2.14. Характерні періоди пульсацій розміру крапель емульсій в залежності від частки води.

3. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАРОВУВАННЯ КРАПЕЛЬ ЕМУЛЬСІЇ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ РОЗРЯДІ

3.1. Модель передвибухової динаміки розігріву краплі ВПЕ

У звичайному стані ВПЕ являє собою двофазну дисперсну систему. Однак, при достатньо інтенсивному нагріванні, коли енергія, яка надходить з довкілля, достатня для закипання води, з'являється третя складова – водяна пара. Разом з цим, за рахунок тиску Лапласа, маленькі частинки води мають більшу температуру кипіння, ніж великі об'єми. Отже спочатку закипають саме великі включення води. Внаслідок збільшення з часом обсягу водяної пари, збільшується об'єм краплі емульсії. Обсяг дисперсійного середовища, в даному випадку - палива, через високу температуру кипіння майже не змінюється. Тому збільшення парових оболонки призводить до структурної розбудови краплі. У підсумку об'ємна частка пари неперервно зростає, а частка палива зменшується. Звичайно такий процес може тривати лише до певного моменту. Обов'язково настане такий час, коли буде досягнуто стан максимального заповнення паровими оболонками обсягу краплі емульсії. Подальше зростання об'єму краплі без порушення її суцільності стає неможливим і крапля руйнується. Момент руйнування супроводжується швидким викидом у навколишнє середовище водяної пари, частини палива і деякої частки глобул води, які не встигли випаруватися. При невеликій швидкості нагрівання матеріалу, який залишився, крапля під дією сил поверхневого натягу відновлює форму сфери і процес повторюється. Процес такого пульсаційного випаровування краплі емульсії протікає або до повного руйнування краплі, або до того моменту, поки паливо не нагріється до температури займання, що призведе до горіння краплі. В результаті, спостерігаються коливання поверхні краплі емульсії, які мають явно виражений релаксаційний характер.

Картина випаровування та горіння краплі водо-паливної емульсії видається складною та заплутаною. Це обумовлено впливом різних факторів:

вмістом води у складі емульсії, дисперсністю частинок води, розміром самих крапель. Для визначення ролі цих чинників пропонується найпростіша модель нагрівання краплі водопаливної емульсії (ВПЕ).

У фундаменті моделі лежать тепло-дифузійні уявлення про процеси випаровування та кипіння складових емульсії.

Для спрощення моделі вважатимемо:

- Крапля емульсії представляє собою трьохкомпонентну систему (паливо – пара – вода), що складається з рідкого палива (дизель) як дисперсійного середовища та глобул води, що оточені паровими прошарками.
- Глобули води в краплі ВПЕ підкоряються монодисперсному закону розподілу;
- Випаровування дизеля в об'єм парової оболонки не відбувається з огляду на те, що температура «кипіння» дизельного палива (170-380°C) набагато більша за температуру кипіння частинок води;
- Рівняння стану водяної пари підкоряється законам ідеального газу, оскільки вона знаходиться далеко від критичних умов.
- Числа подібності Нуссельта та Шервуда вважаються рівними двом через сферичність форми краплі та невеликі швидкості руху частинок води всередині краплі емульсії.

3.2. Перший етап випаровування краплі емульсії під дією електричного розряду

В даній моделі приймаються наступні індекси:

f (*fuel*) – дизельне паливо,

w (*water*) – вода, v (*vapor*) – пара, d (*drop*) – крапля, g (*gas*) – газ (повітря),

t (*thermocouple*) – термопара.

На першому етапі відбувається нагрівання краплі емульсії від початкової температури до температури кипіння води. Пари на поверхні розділу паливо-вода не утворюються, оскільки тиск насиченої пари менший за

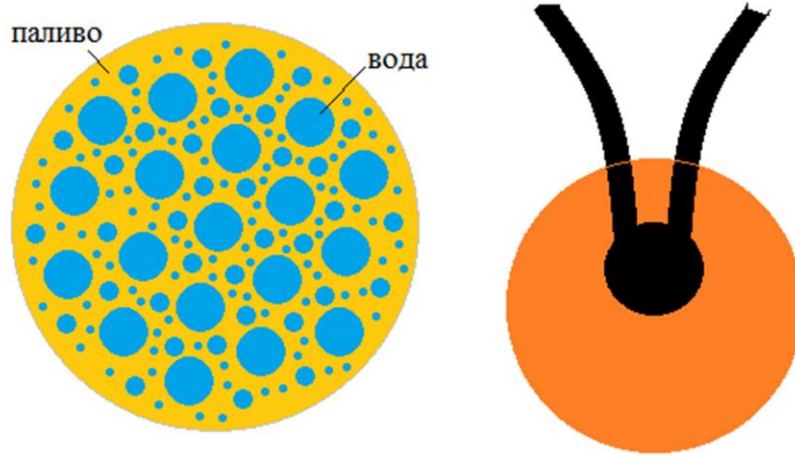


Рис. 3.1. Водно-паливна емульсія на першому етапі

атмосферний тиск $p_v^{nac} < P_0$. Отже немає необхідності визначати температуру пари.

Крапля ВПЕ висить на термопарі з діаметром спаю d_t . Нехай об'ємна частка води в емульсії є C_w . Після створення емульсії початковий діаметр глобул води позначимо за d_{w0} . Розмір краплі емульсії d_{d0} . Тоді кількість крапель води в емульсії дорівнює

$$N_w = \frac{C_w \pi / 6 \cdot d_{d0}^3 - \pi / 6 \cdot d_t^3}{\pi / 6 \cdot d_{w0}^3} = C_w \frac{d_{d0}^3 - d_t^3}{d_{w0}^3}. \quad (3.1)$$

На цьому етапі енергія від електричного розряду йде на розігрів краплі емульсії. Вважаємо, що від розряду нагрівається паливо, після чого паливо розігріває глобули води. Тому процес описується наступною системою рівнянь:

1) *рівняння розігріву палива:*

$$c_f m_f \frac{dT_f}{dt} = P + \frac{\lambda_g}{d_d} Nu_g (T_g - T_f) S_d - N_w \frac{\lambda_w}{d_w} Nu (T_f - T_w) S_w - \dot{Q}_t. \quad (3.2)$$

$$\dot{Q}_t = \pi r_t \lambda_t \sqrt{\frac{\lambda_g}{\lambda_t} Nu_g} (T_d - T_g).$$

Тут *перший* доданок правої частини є теплова потужність розряду, *другий* – теплова потужність втрат в доквілля при температурі T_g , *третій* – теплова потужність, яка йде на розігрів глобул води, *четвертий* – потужність теплових втрат через спаї термопар.

2) рівняння зміни зовнішнього розміру краплі:

$$\frac{d d_d}{dt} = -4 \frac{D_f}{d_d} \frac{Sh_g}{2} \frac{\rho_g}{\rho_f} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (3.3)$$

Тут вважається, що зовнішня поверхня краплі покрита паливом, що і випаровується з поверхні в довкілля.

Залежність масової частки насичених парів рідини в повітрі від температури поверхні краплі $Y_{fs}(T_s)$ можна отримати, використавши залежність тиску насичених парів від температури (закон Клаузіуса-Клапейрона) та рівняння стану (закон Менделєєва-Клапейрона):

$$Y_{fs} = \frac{\mu_f}{\mu} \exp \left(\frac{L_{fm} \mu_f}{RT_{fboil}} - \frac{L_{fm} \mu_f}{RT} \right), \quad \mu = \mu_g \left(1 + \left(\frac{\mu_f}{\mu_g} - 1 \right) \exp \left(\frac{L_{fm} \mu_f}{RT_{fboil}} - \frac{L_{fm} \mu_f}{RT} \right) \right).$$

де μ_f , μ_g – молярна маса парів та повітря, кг/моль, μ – молярна маса суміші парів і повітря поблизу поверхні краплі, L_{fm} – питома теплота пароутворення палива в Дж/кг, T_{fboil} – температура кипіння палива в К.

3) рівняння розігріву крапель води:

$$c_w \rho_w \frac{\pi}{6} d_w^3 \frac{dT_w}{dt} = \frac{\lambda_w}{d_w} Nu \cdot (T_f - T_w) \cdot S_w, \quad (3.4)$$

4) рівняння зміни маси палива при його випаровуванні на етапі нагрівання:

$$\dot{m}_f = -\frac{dm_f}{dt} = 2d_d D_f \rho_g \frac{Sh_g}{2} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (3.5)$$

Дане рівняння схоже на (3.3), але необхідне для розрахунку вмісту води в краплі емульсії перед другим етапом.

На рис. 3.2 зображені результати розрахунку системи рівнянь (3.2)-(3.5). Час нагрівання краплі ВПЕ до температури кипіння води приблизно дорівнює 1 с, що відповідає часу до початку пульсацій. За цей час розмір краплі емульсії і маса палива майже не змінюється. Температура води і палива практично однакові.

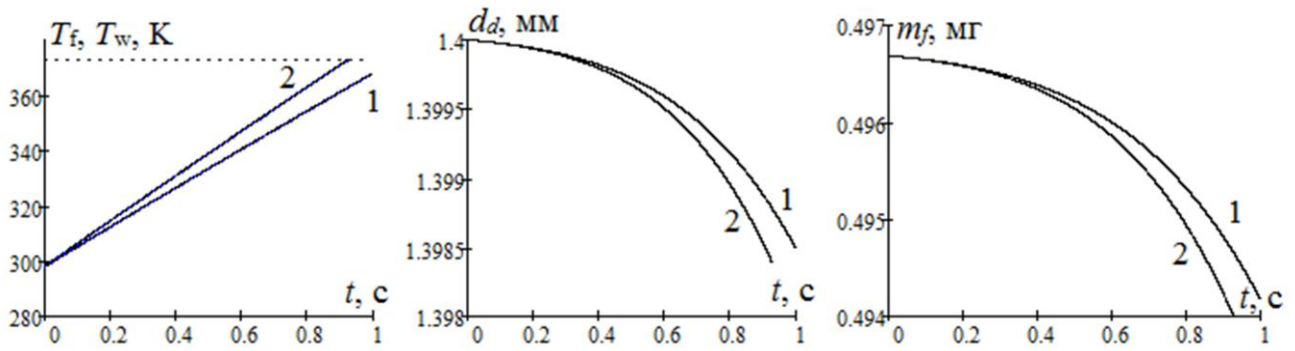


Рис. 3.2. Часові залежності а) температури палива і води в емульсії, б) діаметру краплі, в) маси палива в краплі, що висить на термопарі з діаметром спаю 0.8 мм. Потужність електричного розряду 1) 0.26 Вт, 2) 0.30 Вт.

3.3. Другий етап випаровування краплі емульсії під дією електричного розряду

На другому етапі навколо кожної краплі води з'являється оболонка пару. Для того, щоб вона була стабільною і мала змогу розширюватися необхідна виконання умови: тиск насиченої пари повинен бути більшим, або дорівнювати атмосферному тиску. Також необхідно враховувати вплив кривизни поверхні. Тому умова стабільності парового прошарку є

$$p_w^{nac} \geq P_0 - \frac{2\sigma_w}{r_w} + \frac{2\sigma_f}{r_v}. \quad (3.6)$$

Тут другий доданок правої частини є тиском Лапласа над поверхнею розділу пар-вода, а третій – тиском Лапласа над поверхнею паливо-пар.

Саме за рахунок тиску Лапласа рівність буде виконуватися не при температурі кипіння води T_{wboil} (це величина над плоскою поверхнею), а при дещо більшій.

Тому в даній моделі на другому етапі після досягнення краплі емульсії температури кипіння T_{wboil} до моменту виконання умови (3.6) модель має вигляд системи (3.2) –

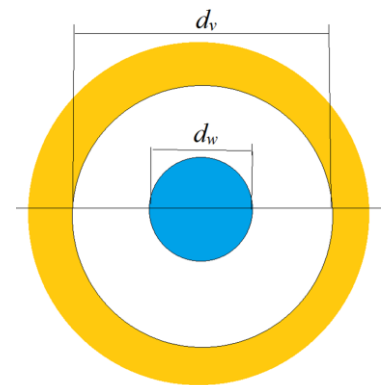


Рис. 3.3. Глобула води з паровим прошарком

При досягненні необхідної температури для умови (3.6) на поверхні краплі води виникає прошарок пари.

Діаметр парової оболонки розраховуємо з закону збереження маси:

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{\rho_w}{\rho_v} d_{w0}^3 - d_w^3 + d_w^3}.$$

Розмір краплі ВПЕ при цьому повинен зростати. Видимий об'єм краплі емульсії містить в собі об'єм палива, пари, води та спая термопари:

$$V_d = V_f + V_v + V_w + V_t$$

$$\text{або } V_d = \frac{m_f}{\rho_f} + N_w \cdot \frac{\pi}{6} d_v^3 + V_t.$$

$$\text{Діаметр краплі емульсії } d_d = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V_d}.$$

Система рівнянь наступна:

1) рівняння розігріву палива:

$$c_f m_f \frac{dT_f}{dt} = P + \frac{\lambda_g}{d_d} Nu_g (T_g - T_f) S_d - N_w \frac{\lambda_v}{d_v} Nu (T_f - T_w) S_v - \dot{Q}_t. \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_t = \pi r_i \lambda_t \sqrt{\frac{\lambda_g}{\lambda_t} Nu_g} (T_d - T_g).$$

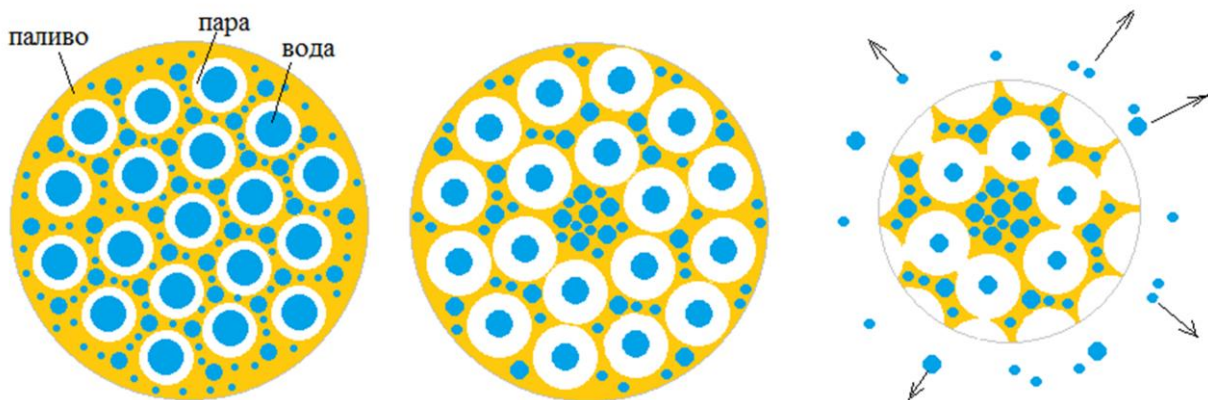


Рис. 3.4. Водно-паливна емульсія на другому етапі

Передача енергії глобулам води відбувається через парову оболонку, теплопровідність якої значно менша за теплопровідність води та рідкого палива.

2) *рівняння розігріву крапель води:*

$$c_w \rho_w \frac{\pi}{6} d_w^3 \frac{dT_w}{dt} = 0, \quad (3.8)$$

Вся енергія, яка надійшла йде на випаровування води. Отже використовуючи аналог формули для випаровування $Q = mL$, отримаємо

1) *рівняння зміни розміру краплі води:*

$$\frac{d d_d}{dt} = -2 \frac{\pi d_w^2 \frac{\lambda_v}{d_w} Nu T_f - T_w}{L_{mw} \rho_w \pi d_w^2} = -2 \frac{\frac{\lambda_v}{d_w} Nu T_f - T_w}{L_{mw} \rho_w}. \quad (3.9)$$

4) *рівняння зміни маси палива* при його випаровуванні на етапі нагрівання:

$$\dot{m}_f = -\frac{dm_f}{dt} = 2d_d D_f \rho_g \frac{Sh_g}{2} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (3.10)$$

Рівняння для розігріву водяної пари ми не застосовуємо. Закон Ньютона-Ріхмана, який використовується в рівняннях (3.7) та (3.9) описує теплопередачу всередині парового прошарку, що знаходиться всередині між двома рідкими поверхнями з температурами T_f та T_w .

Ця система доповнюється температурними залежностями теплофізичних характеристик складових системи, що апроксимувалися в температурному інтервалі 20-130 °С.

Дизельне паливо. густина $\rho_f = 820-845$ кг/м³. Прийнято 830 кг/м³

Молярна маса $\mu_f = 110-230$ г/моль. Прийнято 160 г/моль.

Температура кипіння: $T_{fboil} = 553 - 733$ К (280-360 °С). Прийнято 553 К.

Питома теплота пароутворення: $L_{fm} = 230-250$ кДж/кг. Прийнято 240 кДж/кг.

Питома теплоємність $c_f = 2300$ Дж/(кг·К).

Коефіцієнт дифузії парів: прийнято $D_f = 10 \cdot 10^{-6} (T/273)^{1.75}$ м²/с.

Вода: густина $\rho_w = 1004 - 0.207 \cdot (T - 273) - 0.002 \cdot (T - 273)^2$ кг/м³

Молярна маса $\mu_f = 18$ г/моль.

Температура кипіння: $T_{wboil} = 373$ К (100 °С).

Питома теплота пароутворення: $L_{fm} = 226$ кДж/кг.

Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_w = 0.6$ Вт/(м·К).

Коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma_w = 76.8 - 0.181 \cdot (T - 273)$ мН/м.

Питома теплоємність $c_w = 4200$ Дж/(кг·К).

Водяна пара.

густина $\rho_v = 0.59 \cdot (T/373)^{12.3}$ кг/м³

Молярна маса $\mu_f = 18$ г/моль.

Коефіцієнт дифузії парів: прийнято $D_v = 20 \cdot 10^{-6} (T/273)^{1.75}$ м²/с.

Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_v = 39.1 \cdot T/373 - 15.2$ мВт/(м·К).

Питома теплоємність $c_v = 1495 \cdot T/373 + 638$ Дж/(кг·К).

Повітря:

густина: $\rho_g = 1.29 \cdot 273/T_g$, кг/м³.

коефіцієнт теплопровідності $\lambda_g = 0.024 \cdot (T_g/273)^{0.75}$, Вт/(м·К).

Для визначення характеристик пульсацій потрібно ввести густину упакування глобул води в краплі емульсії:

$$C_x = \frac{V_v}{V_v + V_f} = 1 - \frac{V_f}{V_d - V_t}.$$

Це є відношення сумарного об'єму водяних глобул з паровими оболонками до об'єму краплі емульсії. На початковому етапі величина упаковки дорівнює об'ємній концентрації води в ВПЕ. Дизельне паливо і вода не розчиняються одна в одній, отже при виникненні парових оболонок розширення краплі відбувається до досягнення деякого критичного значення упаковки (рис. 3.4). При цьому парові кульки з глобулами води всередині не почнуть торкатися одна одну, а також зовнішньої поверхні краплі емульсії (2.4с). Повинно відбутися розрив зовнішньої «плівки» рідини і вихід пари. При цьому можливе викид деякої частини маси краплі ВПЕ.

Це критичне значення було взяте за $C_0 = 0.74$, що відповідає щільній упаковці твердих кульок в 3-х вимірному просторі.

Тому в при чисельних розрахунках при досягненні значення $C_x \rightarrow C_0$ (одна пульсація) вважалось, що відбувається викид деякої частини матеріалу емульсії (наприклад, 2%), миттєве з'єднання іншої частини емульсії в нову краплю і повторення процесу розширення.

3.4. Вплив параметрів на характеристики випаровування

На рис. 3.5. показано чисельний розв'язок системи рівнянь (3.2)-(3.5) та (3.7)-(3.10). З аналізу результатів видно, що пульсації починаються при температурі крапель води в 101°C . Період однієї пульсації вийшов приблизно 10 мс, що відповідає частоті пульсацій в 100 Гц. Хоча розрахунок якісно описує процес, можна побачити, що середній діаметр краплі води

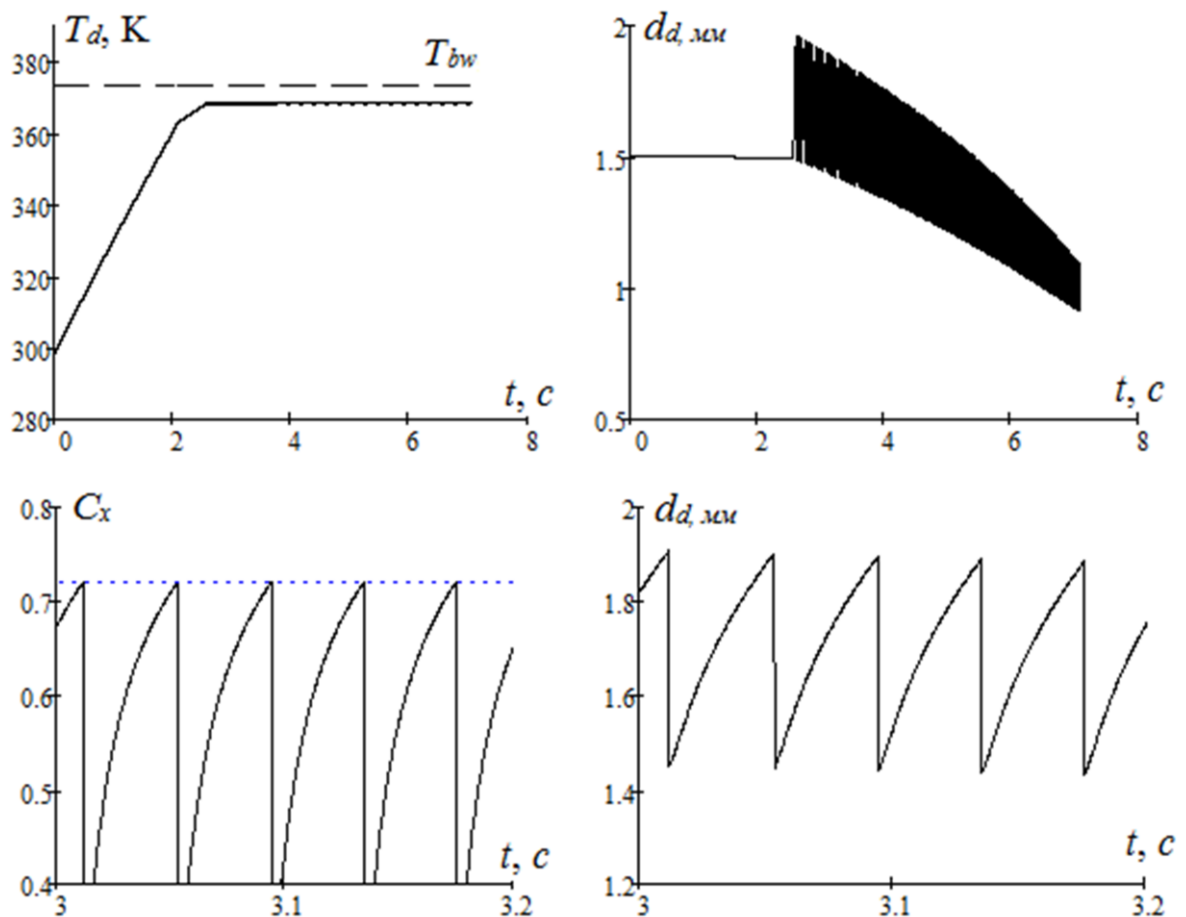


Рис. 3.5. Часові залежності а) температури дизельного палива і води; б) діаметра краплі, в) густина упаковки парових кульок в емульсії; г) діаметру краплі води і парової бульбашки. Потужність розряду $P = 0.4$ Вт, температура повітря 20°C . Початкова частка води в емульсії 50%.

зменшується доволі слабо. Тому можна говорити про те, що втрата матеріалу емульсії відбувається в основному за рахунок викидів під час мікробибухів.

Тобто електричний розряд призводить до диспергування крапель емульсії з великою концентрацією води на відміну від крапель індивідуальних горючих рідин.

Табл. 2.1. Вплив об'ємного вмісту води C_w емульсії ДП/вода на час повного випаровування t_{evap} , період T_{puls} і частоту ν_{puls} пульсацій та краплі глобули води d_{wk} в кінці випаровування. Потужність розряду 0.4 Вт

C_w	t_{evap} , с	T_{puls} , мс	ν_{puls} , Гц	d_{wk} , мкм
0.5	2.2	19	52	9.04
0.4	2.9	31	32	7.5
0.3	3.9	48	21	5.4
0.2	5.5	71	14	1.2
0.1	7	113	9	0

Табл. 2.2. Вплив теплової потужності електричного розряду на час повного випаровування t_{evap} емульсії 50%ДП/50%вода, період T_{puls} і частоту ν_{puls} пульсацій та краплі глобули води d_{wk} в кінці випаровування.

P , Вт	t_{evap} , с	T_{puls} , мс	ν_{puls} , Гц	d_{wk} , мкм
0.4	2.2	19	52	9.04
0.35	2.7	30	33	9.2
0.3	3.7	44	14	9.16

На відміну від тверджень Опятюка[12] (при потраплянні краплі емульсії в нагріту піч відбувається поступове повне випаровування найбільших глобул води і все менших, у зв'язку з чим помічені полочки на часовій залежності температури краплі) в роботі дійшли висновку, що краплі води можуть не встигати повністю випаровуватися до моменту досягнення критичного значення густини пакування.

В табл. 2.1 та 2.2. показані деякі параметри, які отримані при чисельному варіюванні концентрації води в емульсії та потужності електричного розряду.

Зростання концентрації води призводить до зростання періоду пульсацій. Тепер кількість глобул менша і вони можуть розширюватися до більших розмірів до моменту досягнення критичної густини упакування. Отже і повнота випаровування крапель води підвищується. Вже при об'ємній концентрації води в 10% води майже повністю випаровуються. І можна розглядати третій етап – випаровування каплі палива.

При зменшенні теплової потужності електричного розряду період пульсацій зростає, що пояснюється тим, що для випаровування деякої кількості води з глобул потрібна певна енергія. Менша потужність розряду призводить до збільшення часу розігріву. Кінцевий розмір глобул води майже не змінюється.

Підсумки. Аналіз часу підігріву краплі до початку пульсацій показав, що в ряді дослідів для різних емульсій вони були різними від 1 до 11 с. Причини наступні:

1. Різний розмір краплі. Краплі мали розмір від 1.4 до 2.6 мм. Зміна розміру від 1.5 с до 1.9 с призводить до збільшення часу прогріву з 2.5 до 6 с.
2. Різний склад емульсії. Вода має питому теплоємність в два рази більшу за теплоємність дизельного палива. Тому найшвидше розігріваються емульсії з меншою часткою води.
3. Вплив початкової температури спаю термопари. Серії дослідів проводилися з метою дослідження саме пульсацій, бо час зйомки одного відео був обмежений 5 секундами. Тому для даної емульсії проводилася послідовна зйомка декількох крапель. І тому спай термопари для кожної, окрім першої, був нагрітим.

На рис. 3.5 представлена залежність показів термопари, на якій нагрівалася від електричного розряду крапля емульсії D50W50 діаметром 2.0 мм. Червоною точкою відмічено момент появи мікробибухів на поверхні краплі. Температура краплі при цьому є нижчою за температуру кипіння

води. Якщо використати рівність тисків в бульбашці, то отримаємо рівноважний розмір парової бульбашки при 75 °С складає 2 мкм.

З огляду на отримані результати по часу прогрівання крапель складається наступна картина:

1) Електричний розряд б'є через краплю емульсії в спай термопари.

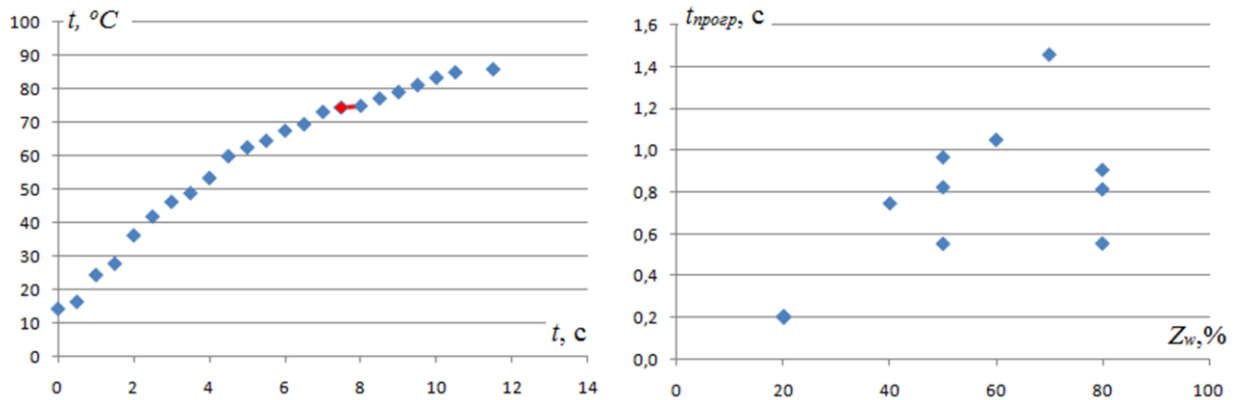


Рис. 3.6. Залежність температури краплі емульсії D50W50 діаметром 2.0 мм на б) часу прогріву деяких крапель від масової частки води

- 2) Електричний стример не встигає нагріти одночасно всю краплю. Найбільше розігрівають області краплі емульсії поблизу проходження стримеру і спай термопари.
- 3) Спай термопари нагрівається сильніше за краплю і тому саме на поверхні спаю виникають парові бульбашки через більш інтенсивніше випаровування. Вони розширюються на початковому етапі пульсацій від спаю до зовнішньої поверхні краплі поблизу електричного стримеру. Це пояснює те, що експериментальні значення часу прогріву менші за значення чисельного розрахунку. А також період пульсацій (експериментальні значення) менші за чисельні значення в два рази.
- 4) На пізніх етапах пульсаційного випаровування (коли прогрів каплі відбувається по всьому об'єму) парові бульбашки утворюються і всередині краплі.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Емульсії з близьким складом дизельного палива і води ($Z_w = 40-60\%$) є порівняно стабільними: час їх помітного розшарування більше 1 години.
2. При дії електричного розряду на краплю емульсії чітко простежується два часові етапи. Перший – інертний розігрів. Другий – пульсаційний режим, в якому розмір краплі з певною частотою періодично змінюється поблизу деякого середнього значення, яке з часом випаровування зменшується.
3. Втрата матеріалу емульсії при дії електричного розряду відбувається в основному за рахунок викидів під час мікрровибухів. Тобто електричний розряд приводить до диспергування крапель емульсій з великим вмістом води на відміну від крапель індивідуальних горючих рідин.
4. Експериментально показано, що в залежності від вмісту води поведінка крапель водо-паливних емульсій (на прикладі вода-дизельне паливо) при дії високочастотного розряду якісно відрізняється. Для прямих емульсій (частка води більша за 70%) характерно поява «піни» з парових бульбашок з поверхнею з молекул дизельного палива і одночасний їх зростання. Для обернених емульсій (частка води менша за 30 %) характерні мікрровикиди матеріалу в результаті поверхневих мікрровибухів.
5. Для крапель емульсії з близьким складом ($Z_w = 40-60\%$) характерно розширення однієї чи декількох парових бульбашок до розмірів, порівняних з розміром краплі. При лусненні бульбашки відбувається викид матеріалу краплі у вигляді крапель до 100 мкм.
6. Час пульсацій розміру крапель емульсій при дії електричного розряду склав від 10 до 25 мс.
7. Створена фізичну модель пульсаційної поведінки краплі емульсій під дією електричного розряду дає якісне пояснення поведінки краплі. Зменшення вмісту води та потужності електричного розряду призводить до збільшення періоду пульсацій.
8. Результати експерименту і чисельних розрахунків мають кількісні розбіжності, що пояснюються впливом спаю термопари. Парові бульбашки утворюються не по всьому об'єму, а поблизу поверхні спаю. Також період пульсацій виявився меншим за розрахунковий, що пов'язано з неоднорідністю нагрівання краплі електричним розрядом.

_____ Тимофієнко К.В.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pei X., Guida P., AlAhmadi K.M., Al Ghamdi I. A., Saxena S., Roberts W. L. Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame. // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – Vol.216. – 106800. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>
2. Jinkyu Park, Jungmo Oh. 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*. – 2022. – Vol.311 – 122520. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122520>
3. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits. // *Energies*. – 2022. – Vol.15. – 7670. <https://doi.org/10.3390/en15207670>
4. Pavel A. Strizhak, Maxim V. Piskunov, Roman S. Volkov, Jean C. Legros. Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating. // *Chemical engineering research and design*. – 2017. – Vol. 127. – P. 72-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.09.008>
5. Kuznetsov G.V., Vershinina K.Yu., Valiullin T.R., Strizhak P.A. Differences in ignition and combustion characteristics of waste-derived oil-water emulsions and coal-water slurries containing petrochemicals. // *Fuel Processing Technology*. – 2018. – Vol.179. – P. 407–421. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.07.033>
6. Jonghan Won, Seung Wook Baek, Hyemin Kim. Autoignition and combustion behavior of emulsion droplet under elevated temperature and pressure conditions. // *Energy*. – 2018. – Vol.163. – P. 800-810. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.185>
7. Avulapati M. M., Megaritis T., Xia J., Ganippa L. Experimental understanding on the dynamics of micro-explosion and puffing in ternary emulsion droplets. // *Fuel*. – 2019. – Vol.239. – P. 1284–1292. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.112>.
8. Gabera C., Wachter P., Demuth M., Hochenau C. 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*. – 2020. – Vol.282. – 118692. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118692>
9. 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*. – 2019. – Vol. 160. – P. 258-269.

<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.048>

10. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Ivanov M. Effect of ultrasonic emulsification on the combustion of foamed emulsions. // *Fuel Processing Technology*. – 2018. – Vol.169. – P.178–190.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.001>
11. Черненко О. С., Тимофієнко К. В., Іванов М. О. Випаровування крапель горючих рідин в електричному розряді. // *Фізика аеродисперсних систем*. – 2023. – №.61. – С. 212-226.
12. Кондратьев Е. Н., Опятюк В. В. Некоторые особенности испарения капель водотопливных эмульсий при пульсационном режиме. // *Фізика аеродисперсних систем*. – 2004. – Т. 41. – С. 190-195.
13. Ithnin A. M., Yahya W. J., Ahmad M. A., Ramlan N. A., Abdul Kadir H., Sidik N. A. S., Koga T. Emulsifier-free Water-in-Diesel emulsion fuel: Its stability behaviour, engine performance and exhaust emission. // *Fuel*. – 2018. – Vol.215. – P. 454–462. doi:10.1016/j.fuel.2017.11.061.
14. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация. // М.: Наука. – 2008. – С. 272.
15. Fox F.E., Herzfield K.F. Gas bubbles with organic skin as cavitation nuclei. // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1954. – Vol. 26. – P. 984-989.
16. Yiguang Ju. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2015. – Vol. 48. – P. 21-83.
17. Li M., Wang Z., Xu R., Zhang X., Chen Z., Wang Q. Advances in plasma-assisted ignition and combustion for combustors of aerospace engines // *Aerospace Science and Technology*. – 2021. – Vol.117. – 106952.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106952>
18. Bityurin V. A., Klimov A. I., Korshunov O. V., Chinnov V. F. Kinetic model of aluminum oxidation by water vapor in heterogeneous plasma: Gas-phase kinetics // *High Temp*. – 2014. – Vol. 52. – P. 621.
19. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Характеристики сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара // *Фізика горення и взрыва*. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37-44.
20. Решетников А.В., Бусов К.А., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П. Переходные режимы вскипания струй перегретой воды // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2012. – Т.19, №3. – С. 359-367.
21. Kichatov B., Korshunov A., Gubernov V., Kiverin A., Yakovenko I. Combustion of heptane-in-water emulsion foamed with hydrogen-oxygen

- mixture // Fuel Processing Technology. – 2020. – Vol.198. – 106230. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106230>
22. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Medvetskaya N. Combustion of foamed emulsion prepared via bubbling of oxygen-nitrogen gaseous mixture through the oil-in-water emulsion. // Fuel Processing Technology. – 2019. – Vol. 186. – P. 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.12.019>
23. Alessandro Stagni, Raffaela Calabria, Alessio Frassoldati, Alberto Cuoci, Tiziano Faravelli, Fabio Chiariello, and Patrizio Massoli. Kinetic Modeling of the Ignition of Droplets of Fast Pyrolysis Bio-oil: Effect of Initial Diameter and Fuel Composition. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2021. – Vol. 60. – P. 6719-6729. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05981>
24. Weiwei Shang, Shouyin Yang, Tiemin Xuan, Zhixia He, and Jiawei Cao. Experimental Studies on Combustion and Microexplosion Characteristics of NAlkane Droplets. // Energy Fuels. – 2020. – Vol. 34, 12. – P. 16613-16623. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02904>
25. 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. – 2019. – Vol. 205. – P. 397-406. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.04.017>
26. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, A.G. Nigay, O.S. Yashutina. Heat and mass transfer induced by the ignition of single gel propellant droplets. // Journal of the Energy Institute. – 2019. – Vol. 92, Issue 6. – P. 1944-1955. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.10.017>
27. E. Mura, R. Calabria, V. Califano, P. Massoli, J. Bellettre. Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches. // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2014. – Vol. 56. – P. 69-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.11.020>
28. A. Hoxie, R. Schoo, J. Braden. Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets. // Fuel. – 2014. – Vol. 120. – P. 22-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.11.036>
29. Shuhn-Shyurng Hou, Fakhrur M. Rizal, Ta-Hui Linb, Tzu-Yueh Yang, Hou-Peng Wan. Microexplosion and ignition of droplets of fuel oil/bio-oil (derived from lauan wood) blends. // Fuel. – 2013. – Vol. 113. – P. 31-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.066>
30. Daniil S. Romanov, Ksenia Yu. Vershinina, Pavel A. Strizhak. Ignition and combustion of a group of waste-derived fuel slurry droplets: Mutual influence upon low-temperature convective heating. // Fuel. – 2023. – Vol.348. – 128578. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128578>

31. Стариков М. А., Хлебникова М. Е., Буланин Ф. К., Сидоров А. Е., Полетаев Н. И. Шевчук В. Г. Горение диспергированного жидкого и твердого топлива в присутствии электрических разрядов. // Фізика аеродисперсних систем. – 2018. – № 55. – С. 59-70.
32. Черненко А.С., Шевчук В.Г., Шингарёв Г.Л., Калинин В.В. Определение скорости выгорания жидкого горючего методом "пористого шарика". // Фізика аеродисперсних систем. – 2022. – Т. 60. – С. 105-119.
33. Опятюк В. В. Особливості випаровування та горіння краплин водопаливних емульсій важких вуглеводнів: Автореф. дис... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.17 /; Одес. нац. ун-т ім. І.І. Мечникова. – Одеса, 2012. – 20 с.