

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 «бакалавр»

«Випаровування та горіння крапель в електричному розряді»

«Evaporation and burning of droplets in electric discharge»

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

_____ Ваксман Юрій

(підпис)

(прізвище, ім'я)

Одеса 2023

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Експериментальні дослідження випаровування і горіння крапель емульсій	6
1.1. Мікровибух крапель емульсій	6
1.2. Горіння факелу водо-масляної емульсії при дії розряду	7
1.3. Приготування емульсії та вивчення її властивостей	9
1.4. Горіння рідин та їх емульсій. Дія розряду	12
1.5. Випаровування горючих рідин. Дія розряду	13
1.6. Аналіз зміни температури та розміру краплі емульсії в часі	16
2. Фізико-математичне моделювання випаровування крапель емульсій в електричному розряді	20
2.1. Модель передвибухової динаміки розігріву краплі ВПЕ	20
2.2. Підхід Кондратьєва і Опятюка	21
2.3. Перший етап випаровування краплі емульсії під дією електричного розряду	24
2.4. Другий етап випаровування краплі емульсії під дією електричного розряду	26
2.5. Вплив параметрів на характеристики випаровування	30
Результати роботи та висновки	33
Результати роботи	33
Висновки	35
Список використаних джерел	36

ВСТУП

В останні роки в світовій науці про горіння сформувався і активно розвивається перспективний науково-технічний напрямок - Plasma Assisted Ignition and Combustion (PAI/PAC), в рамках якого були отримані важливі для енергетики результати щодо покращення запалювання та горіння газових сумішей в газових турбінах, двигунах внутрішнього згорання, гіперзвукових реактивних двигунах [1, 2]. Але можливості ефективного застосування цієї технології для спалювання диспергованого в повітрі твердого або рідкого палива, вивчені набагато менше.

В [4] показано, що електричний розряд в газозависі частинок алюмінію в водяному парі в 100-1000 разів збільшує швидкість реакції порівняно з швидкістю без плазми, а енергія, яка необхідна для генерації однієї молекули водню (1-3 eV на молекулу), практично на два порядки менше енергії необхідної для отримання молекули водню за допомогою електролізу.

В останні десятиліття в пристроях для спалювання органічного палива почали застосовувати перегрітий пар для забезпечення диспергування важких палив і створення водо-паливних емульсій, наприклад при спалюванні рідкого вуглеводневого палива [1-5] в потоці перегрітого водяної пари. При цьому відбувається газифікація вуглецевмісних частинок неповного згорання рідких вуглеводнів. Зазначений спосіб спалювання забезпечує стійке займання, високу повноту згорання палива і низький вміст токсичних компонентів в продуктах згорання, в тому числі зниження концентрації NO_x в відхідних топкових газах. Цей підхід є перспективним для екологічно безпечної утилізації низькоякісних рідких вуглеводневих палив і горючих виробничих відходів з отриманням теплової і (в подальшому) електричної енергії, зокрема, для утилізації озер нафтошламів (Канада, Україна, Сирія) – рідких відходів процесу нафтопереробки.

Останнім часом ведеться пошук альтернативних палив для економії або заміни традиційних горючих.

Вимоги до альтернативних палив:

- наявність достатніх ресурсів та невисока вартість;
- економія традиційних горючих: мазутів, вугілля, газу.
- технологічна та енергетична сумісність з транспортними та силовими установками;
- прийнятні економічні та екологічні показники процесів виробництва та застосування палив.

Останнім часом активно почала приділятися увага до використання альтернативних палив емульсій та суспензій на основі води з контрольованим вмістом нафтопродуктів, горючих і легкозаймистих рідин, в тому числі і відпрацьованих палив [6, 7].

Перевагами використання водопаливних емульсій є:

- 1) зниження викидів окислів азоту та СО за рахунок зниження температури горіння;
- 2) збільшення тепловіддачі в котіл (теплопровідність водяного пару більша за повітря);
- 3) можливість використання “брудної” води (вода + органіка, залишки палива);
- 4) при збільшенні вмісту води емульсія стає пожежнобезпечною для зберігання та транспортування.

Таким чином, спалювання водопаливних емульсій вирішує одночасно три проблеми – утилізація відходів, отримання дешевого та повноцінного пального та забезпечення екологічних нормативів.

Складністю використання водопаливних емульсій є той факт, що вода та легкі палива (дизельне, гас, бензин) не змішуються між собою і при змішуванні відбувається їхнє швидке розшарування.

Одним із перспективних видів вуглеводневого палива на водній основі є спінена емульсія. Спінена емульсія являє собою багатофазну систему, що складається з газових бульбашок, наповнених окислювачем і диспергованих у масляно-водній емульсії [8]. Таку спінену емульсію отримують шляхом

барботування газоподібного окислювача через емульсію [9], механічним перемішуванням або ультразвуковим емульгуванням [10].

Вода в водо-мазутній емульсії - це вже не баласт, а своєрідний каталізатор, що покращує та прискорює процес спалювання палива. Адже при поступовому підвищенні температури (вже при 170°C) можливе дроблення крапель емульсії з подальшим переходом у пароподібний стан (мікрровибух крапель води) [6, 7]. 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 важких вуглеводнів з великим вмістом води під дією високочастотного електричного розряду.

Завдання роботи:

1. дослідити вплив методу утворення емульсії на її реологічні, теплофізичні властивості;
2. дослідити вплив розряду на випаровування чистих рідин;
3. дослідити вплив електричного розряду на горіння чистих рідин та водних емульсій;
4. дослідити і побудувати фізико-математичну теорію процесів тепломасообміну, яка пояснює пульсаційну поведінку поверхні краплі таких емульсій при випаровуванні та горінні.

Об'єкт дослідження – краплі індивідуальних горючих рідин та їх водні емульсії.

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

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПАРОВУВАННЯ І ГОРІННЯ КРАПЕЛЬ ЕМУЛЬСІЇ

1.1. МікрОВИбух крапель емульсії

Останнім часом активна увага приділяється експериментальним дослідженням займання і горіння бінарних та багатокомпонентним сумішам, емульсіям та суспензіям. В якості компонентів таким систем були дизельне паливо, різні олії, вуглеводні, спирти та вода [11-20]. Автори цих робіт звертають увагу на появу мікрОВИбуху, що виникає при нагріванні краплі такої суміші. Сильний мікрОВИбух і флуктуація діаметра краплі спостерігалися, коли термічні властивості багатокомпонентного досить відрізняються [13]. Причина полягає в тому, що бульбашки безперервно зароджуються, ростуть і розриваються завдяки нагріванню компонентів з нижчою температурою кипіння та високою летючістю в багатокомпонентних краплинах.

В роботі [19] наведено експериментальне дослідження умов та основних характеристик високотемпературного (понад 700 К) випаровування крапель олія-вода. Нагрівання крапель здійснюється за двома типовими схемами: на масивній підкладці (умови нагріву аналогічні тим, що досягаються в нагрівальній камері) і в потоці нагрітого повітря. Проілюстровано час і швидкість випаровування як функції температури нагрівання та умов для підведення теплової енергії до краплі емульсії..

Вказано умови інтенсивного блискавичного кипіння краплі емульсії та її вибухового розпаду (фрагментації) з утворенням хмари дрібних крапель (рис. 1.1). Високі радіаційні теплові потоки необхідні в прикордонному шарі краплі для інтенсивного кипіння і вибухового розпаду крапель з подальшим утворенням дрібнодисперсного аерозолю. Описано принципові відмінності між миттєвим кипінням і вибуховим розпадом краплі емульсії при нагріванні на підкладці і в потоці нагрітого повітря. Деталізовано основні

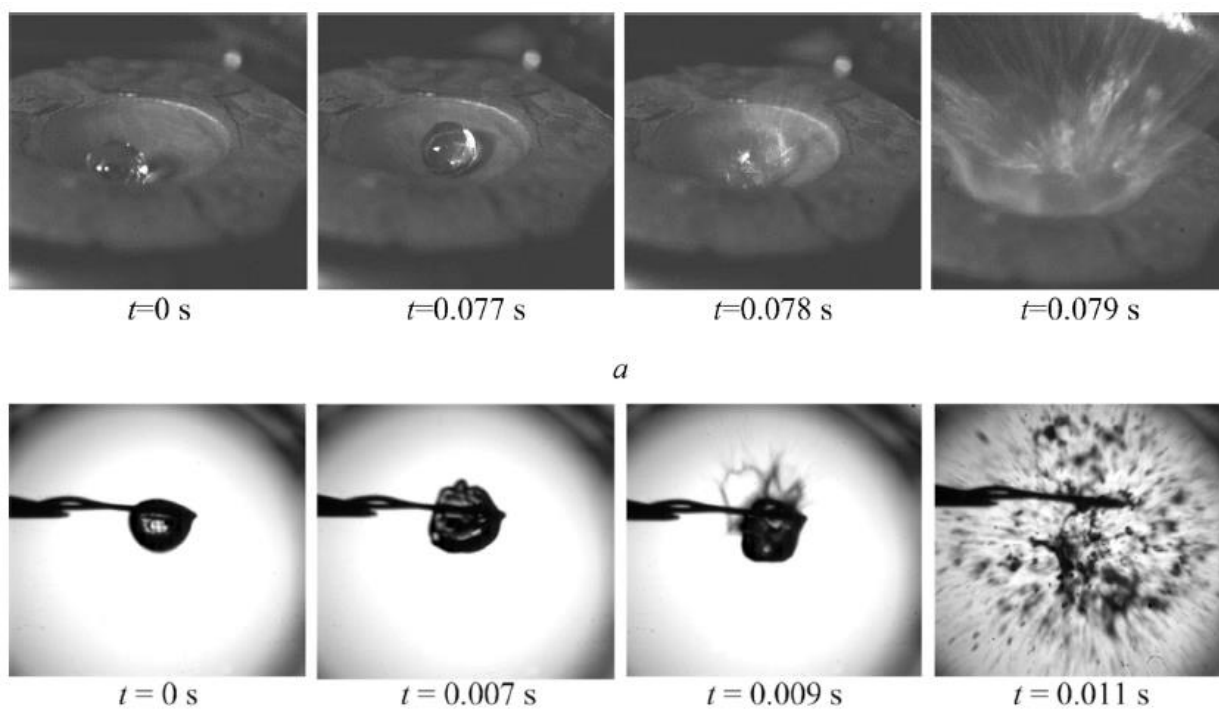


Рис. 1.1. Зображення вибухового розпаду краплі емульсії при нагріванні: (а) на підкладці; б – у потоці гарячого повітря ($T_g \approx 773$ К); відео нагрівання, кипіння та вибухового розпаду краплі емульсії

перспективи розвитку технології високотемпературного очищення води з урахуванням дослідженого в роботі швидкого розпаду краплі емульсії...

В [17] в емульсію додавали невелику кількість ПАР (до 10%). Показано, що у випадку емульсії з вмістом ПАР 2,5% дисперсна сполука піддається процесу коалесценції. Таким чином, кількість крапель води зменшується, поступово збільшуючи масу. Через різницю в густині дисперговані краплі води збираються в нижній частині зразка. В цих умовах відбувається мікробибух із бурхливим випаровуванням води, яке починається на південному полюсі зразка.

Цікаву поведінку має емульсія з поверхнево-активною речовиною 5%. У цьому випадку, флуктуації, спричинені вибуханням, випереджають або навіть гасять мікробибух, фрагментуючи явище розпиленням.

1.2. Горіння факелу водо-масляної емульсії при дії розряду

Для іонізації полум'я в дослідженнях [21] застосовувався генератор Тесла з наступними характеристиками: частота генерації стримерів $f \sim (0.1$

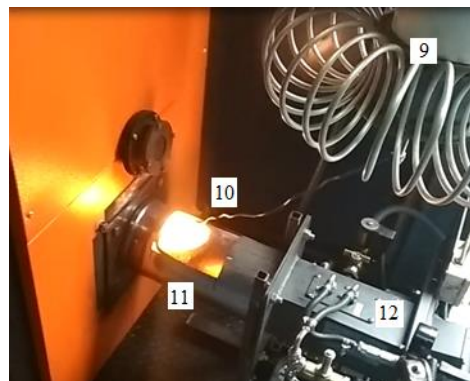


Рис. 1.2. Розігріта фор-камера з електродом від високочастотного генератора $\div 0.3$) МГц, амплітуда імпульсів $U \leq 300$ кВ. Зовнішній вигляд генератора та стримерів в реакторі наведено на рис. 1.2а.

Для організації ефективного спалювання ВПЕ з великим вмістом води (до 70%) необхідно забезпечити достатній розігрів емульсії у трубопроводах. По-перше, при цьому знижується її в'язкість, що полегшує прокачування емульсії через системи подачі пристрою спалювання. По-друге, необхідно подавати під тиском, щоб вода за високої температури (вище 100 °С) залишалася рідкою. При виході з форсунки під час падіння тиску вода «скипає», що додатково розпорошує паливо.

До стандартного пальника для спалювання рідких палив приєднується форкамера, в яку через спеціальний отвір в вогнетривкому кварці вводиться електрод від генератора високочастотних коливань.

При попаданні в котел краплі емульсії (при додатковій дії розряду стримеру) прогріваються і перетворюються на парові бульбашки, які вибухають. Таким чином, в полум'ї миттєво дробляться крапельки палива на дрібні частинки, внаслідок чого питома поверхня випаровування палива багаторазово, приблизно в 200 разів, збільшується, а сама реакція горіння прискорюється до 5 разів. Крім того, молекула води при зіткненні з молекулою вуглецю частково дисоціюється на кисень та водень, а кисень повітря на озон та активний кисень. Атом водню, що утворився при дисоціації, швидко дифундує в область з надлишком озону, внаслідок чого температура горіння збільшується, і паливо згоряє повністю. Участь у реакції горіння додаткової кількості водню та озону призводить до



Рис. 1.3. Якісна зміна зовнішнього вигляду факела всередині сопла при горінні емульсії М45В55 зі збільшенням масової витрати емульсії

збільшення кількості продуктів згорання та підвищення теплотворності палива.

На рис. 1.3. показано вигляд факела горіння емульсії (45% мастила – 55% води) при збільшенні масової витрати емульсії. Зйомка проводилася камерою з частотою 300 кадрів/с.

1.3. Приготування емульсії та вивчення її властивостей

В якості емульсії ми використовували суміш дизельного палива і води. Для приготування емульсій були використані два способи:

1. за допомогою ультразвукового диспергатора;
2. за допомогою ротаційного змішувача.

Ультразвуковий генератор є ємністю до 200 мл, в яку занурений випромінювач. На нього подається змінна напруга від блоку УЗДН 1. Частота і потужність коливань випромінювача задавалася 22 кГц і 0,5 Вт, відповідно. На даному генераторі протягом 3 ÷ 5 хв. отримувати біля 50 мл високодисперсної ВПЕ (0.1 ÷ 3 мкм). Час напіврозшарування ВПЕ, отриманої цьому генераторі виявилася досить значної і становила величину

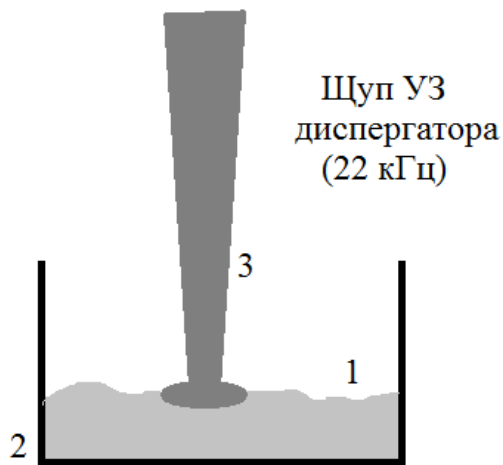


Рис. 1.4.а Схематичне зображення ультразвукового диспергатора для приготування емульсій:
1 – емульсія, 2 – ємність для емульгування, 3 – щуп УЗ диспергатора

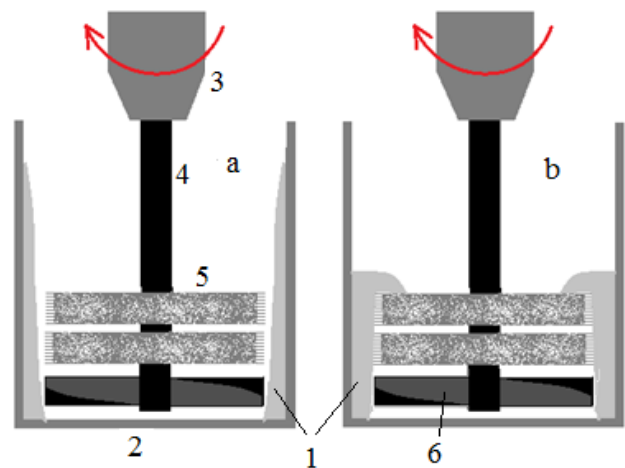


Рис. 1.4.б. Схематичне зображення ротаційного змішувача для приготування емульсій: 1 – емульсія, 2 – ємність для емульгування, 3 – обойма дреля, 4 – металевий вал, 5 – металеві щітки, 6 – пластикові лопаті.

близько 1 тижня. Однак, цей генератор має велику енерговитратність (для створення 200 мл ВПЕ потрібно 400 Вт•год) і металомісткість (габарити 700 x 500 x 500 мм).

Ротаційний змішувач представляє собою циліндричну металеву щітку, яка обертається з великою швидкістю на вісі електричного дреля. На даному генераторі можлива організація безперервного процесу одержання ВПЕ. Він має досить низьку енерго- та металомісткість порівняно з ультразвуковим генератором (для створення 1 тонни ВПЕ потрібно близько 15 кВт год). Дані генератори ефективно працюють лише у вузькому проміжку продуктивності (10 відсотків від номінальної). ВПЕ, отримані на такому генераторі, мають великий розкид функції розподілу частинок за розмірами: 0.1 – 20 мкм. До того ж час напіврозшарування міг досягати 1 дня.

Після цього брався зразок отриманої емульсії, і поміщався під оптичний мікроскоп. На зображенні (рис. 1.5) ми отримали крапельки води, розчинені в дизельному середовищі. На самих зображеннях видно, що середній розмір крапельки води в другому випадку більше, ніж в першому.

Емульсія готувалась 10 хвилин, після чого аналізувалась їх стійкість.

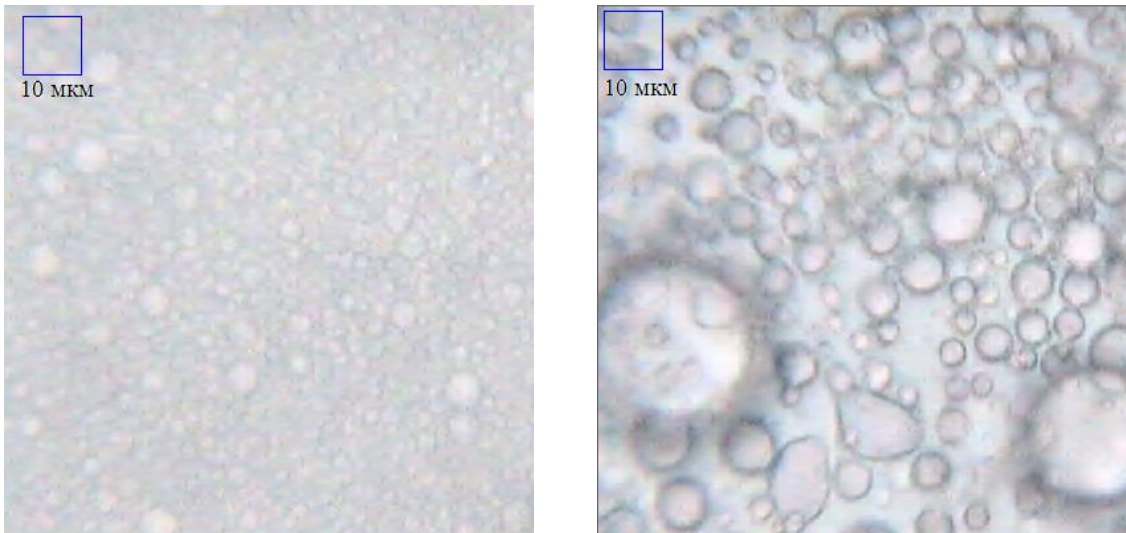


Рис. 1.5. Структура емульсії під мікроскопом. а) УЗ диспергатор, б) ротаційний диспергатор.

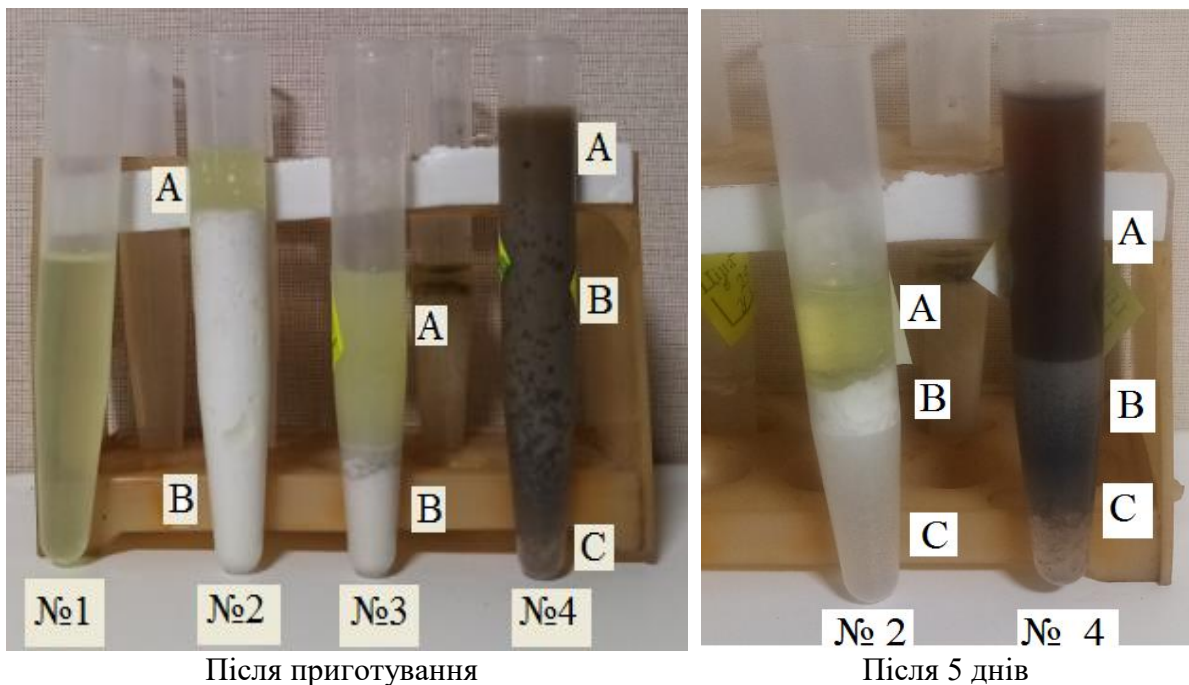


Рис. 1.6. Зовнішній вигляд приготовлених емульсій: №1 – дизельне паливо, №2 – емульсія ДП/вода 50/50 об.% через 10 хв в УЗ диспергаторі, №3 – емульсія ДП/вода 75/25 об.% через 10 хв в УЗ диспергаторі, №4 – емульсія ДП/вода 50/50 об.% через 10 хв в ротаційному диспергаторі

При використанні УЗ диспергатора в емульсію не переходить деяка кількість дизельного палива. Чим більша кількість дизельного палива в початковій суміші, тим більша кількість не переробленого палива;

Розшарування емульсії (ротаційний диспергатор) відбувається протягом декількох годин на три частини: А (ДП), В (емульсія), С (вода). Це пояснюється значно більшою дисперсністю водяних глобул.

1.4. Горіння рідин та їх емульсій. Дія розряду

В роботі [22] розроблено оригінальний експрес-метод експериментального визначення масової швидкості вигорання рідких горючих речовин. Він полягає в визначенні швидкості зменшення маси зі змоченої горючою рідиною з термостійкого пористого матеріалу у вигляді сфер або плоских циліндричних «таблеток» різних діаметрів. Перевагою методу є наявність в залежності маси тіла від часу тривалої часової ділянки з характерною лінійністю зменшення маси. При цьому поверхня випаровування палива зі зразка залишається практично постійною. Для проведення дослідів потрібна невелика кількість рідини.

В даній роботі на такій же керамічній частинці визначалася швидкість вигорання індивідуальних рідин та водних емульсій в електричному розряді

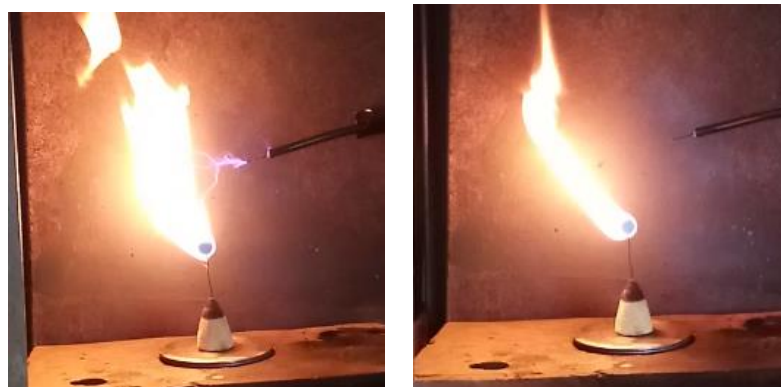


Рис. 1.7. Вигляд факела гептану при дії розряду і без нього.

Таблиця 1.1. Середня масова швидкість вигорання (мг/с):

Паливо	з розрядом постійно	без розряду (підпал від газового пальника)
Гептан	18.6	15.8
Дизельне паливо	12.1	10.4
Емульсія ДП/Вода 50/50% УЗ диспергатор	10.9	не горить самостійно
Емульсія ДП/Вода 50/50% ротаційний диспергатор	15.0	не горить самостійно

і без нього. Для цього ми порувату кульку змочували в рідині, і вивчали час повного згорання.

В результаті ми зробили наступні висновки:

1) Горіння емульсій з великим вмістом води на змоченій поверхні твердого тіла можливе при постійній дії високочастотного електричного розряду без додаткових джерел тепла. Емульсія від короткочасної дії джерела запалювання самостійно не горить. Згідно пожежних норм вона є пожежнобезпечною для зберігання;

2) Розряд збільшує швидкість горіння на 10-15% незалежно від індивідуальної речовини;

3) Так як емульсії не горять при дії розряду, а відношення швидкостей горіння різних рідин (наприклад, гептану і дизельного палива) зберігається при дії чи відсутності розряду, то це дозволяє відносно порівнювати горіння різних індивідуальних рідин і емульсій з різним вмістом води. Відношення швидкостей горіння різних величин зберігається при дії чи відсутності розряду, що можна застосовувати для відносного порівняння горіння різних речовин (і емульсій).

1.5. Випаровування горючих рідин. Дія розряду

Також ми досліджували вплив розряду на випаровування індивідуальних рідин. На тонку ХА термопару зі спаєм 0.5 мкм вішалася крапля етанолу або ДП. Змочування відбувалося таким чином, що спай знаходився всередині краплі. Біля краплі на деякій відстані від неї містився мідний електрод діаметром 150 мкм. Електрод відходив від міні-катушки тесла. У певний момент часу включалося харчування катушки і краплю починав бити розряд. На рис. 1.8 показані вибрані кадри з відеозйомки за різних початкових положень електрода і краплі.

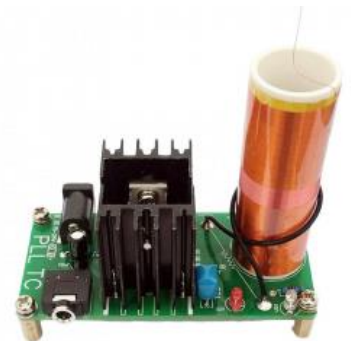


Табл. 1.2. Кадри з випаровування краплі етанолу при дії розряду

Відстань від електроду до спаю термопар (до початкової поверхні краплі)	0с до розряду	0с після розряду	4с після розряду	8с після розряду
0.5 мм (0.2 мм)				
1.0 мм (0.65 мм)				
2.1 мм (1.7 мм)				

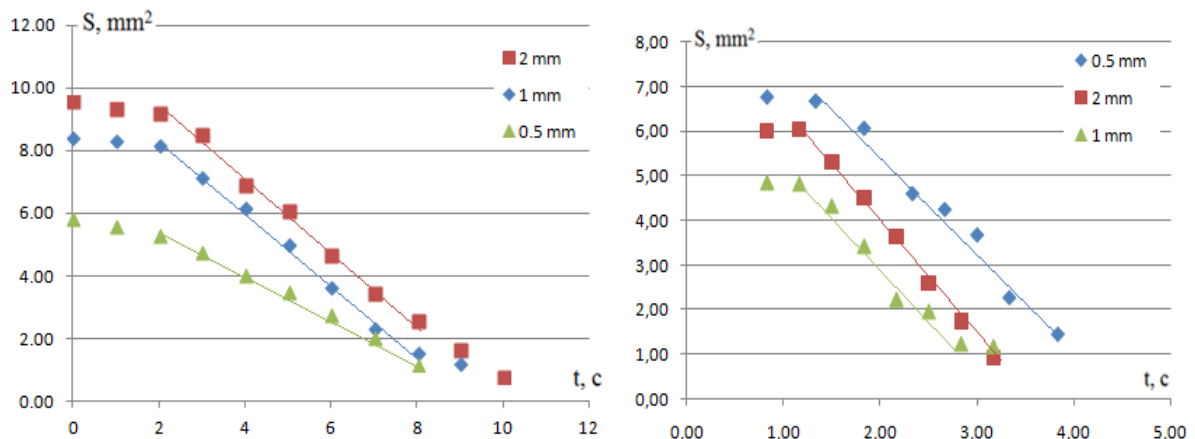


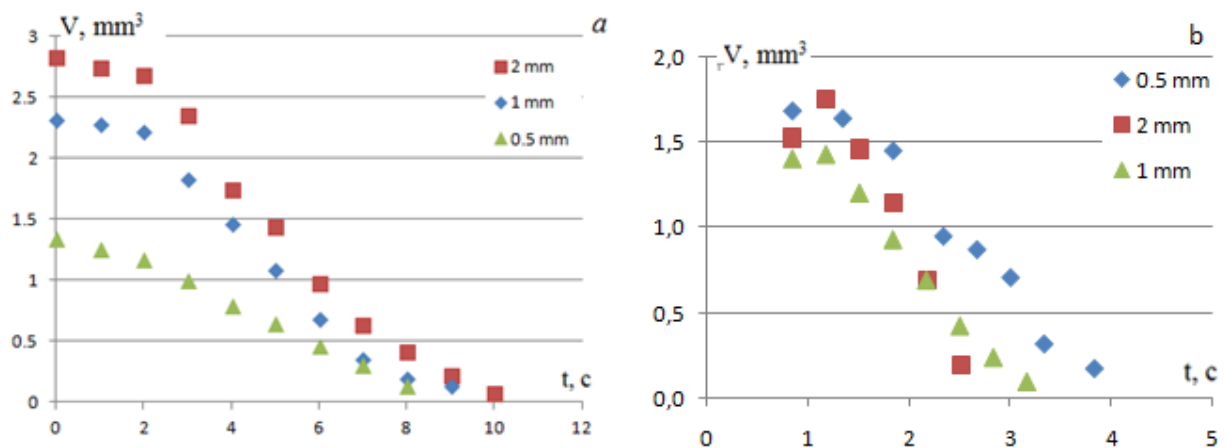
Рис. 1.8. Зміна площі поверхні краплі а) етанолу і б) ДП при різних відстанях до електроду

З появою розряду крапля зміщується від розряду (як електронний удар). Початкова форма краплі близька до сферичної. По мірі випаровування при дії розряду зменшення горизонтального розміру більш суттєве. Тому вироблялося зняття двох розмірів проекції горизонтального $d_x = d_z$ і вертикального d_y . Якщо прийняти, що крапля є еліпсоїдом, то площу бічної поверхні можна визначити як $S_{нов} = \frac{\pi}{2}(d_y + d_x)d_x$.

$$\text{Об'єм краплі (еліпсоїда)} V = \frac{\pi}{6}d_y d_x^2.$$

Табл. 1.3. Видимі константи випаровування і теплової потужності розряду.

Відстань від електроду до спаю термопари	0.5 мм	1.0 мм	2.1 мм
Етанол ($K_{гор} = 0.8 \text{ мм}^2/\text{с}$ в повітрі)			
K_{evap} , $\text{мм}^2/\text{с}$	0.21	0.36	0.34
Оціночне значення потужності розряду P , Вт	0.12	0.25	0.28
Дизельне пальне ($K_{гор} = 1.1 \text{ мм}^2/\text{с}$ в повітрі)			
K_{evap} , $\text{мм}^2/\text{с}$	0.70	1.05	0.81
Оціночне значення потужності розряду P , Вт	0.13	0.24	0.15

**Рис. 1.9.** Зміна видимого об'єму і температури краплі з часом

На рис. 1.8а представлені залежності площі поверхні краплі в часі. Ці залежності лінійні, що підтверджує закон Срезневського:

$$d^2 = d_0^2 - K_{evap} t.$$

Видима константа «випаровування» розраховувалася на даному лінійній ділянці згідно формули:

$$K_{evap} = \frac{1}{\pi} \left. \frac{dS_{нов}}{dt} \right|_{лин}.$$

В табл. 1.3. представлені розрахунки отриманих констант «випаровування». Цікаво, що значення констант горіння крапель в повітрі:

$K_{bur} = 0.8 \text{ мм}^2/\text{с}$ [Хитрин] для етанолу і $K_{bur} = 1.1 \text{ мм}^2/\text{с}$ для ДП. Тобто електричний розряд може замінити нагрів від області горіння.

Якщо припустити, що за цей порівняно невеликий час випаровування все тепло краплі передається від розряду, маємо наступне рівняння

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

Виходячи з нього обсяг краплі повинен зменшуватися лінійно з часом (рис. 1.9а). Якщо прийняти це, отримаємо такі значення потужності розряду P (табл.). Етанол: теплота пароутворення $L = 836 \text{ кДж/кг}$, густина $\rho = 789 \text{ кг/м}^3$. ДП: теплота пароутворення $L = 240 \text{ кДж/кг}$, густина $\rho = 830 \text{ кг/м}^3$.

Оцінка тепловіддачі за Ньютоном-Ріхманом дає менше 10% щодо потужності P .

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.

1.6. Аналіз зміни температури та розміру краплі емульсії в часі

На рис. 1.10а зображена типова осцилограма ЕРС термопари з краплею ВПЕ (олія-вода) (крива 1), поміщеної в піч та ЕРС фотодіода, що реєструє спалахи диспергованої олії при скиданні оболонки краплі (крива 2) [23-24]. На ділянці до першої сходинки кривої 1 відбувається інертний прогрів краплі ВПЕ до температури кипіння води від навколишнього середовища (повітря). Від 1 до 7 секунд простежується пульсаційна динаміка розігріву краплі, без горіння. Можна помітити ступінчастий характер зміни температури краплі ВПЕ, з періодичністю 0.7-0.8 сек і різницею температур

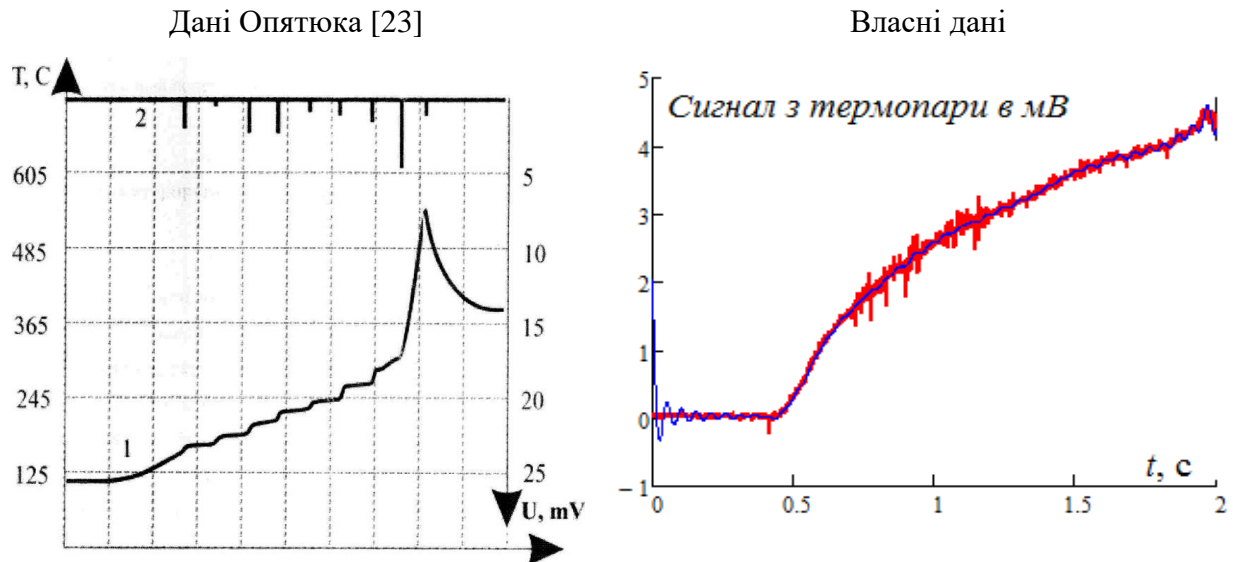


Рис. 1.10. Залежності показів термопарі, на якій знаходиться краплі емульсії:

- а) масло-вода в нагрітій печі [23]
- б) дизельне пальне-вода при дії електричного розряду

в 20°C . У момент стрибка температури в околиці гарячої стінки печі фотодіодом зафіксовані (крива 2) спалахи масляно-парової оболонки, що скидається. Видимо різке збільшення температури в районі 9 секунд обумовлено займанням олії, що представляє окреме питання досліджень. Наявність сходинок автори пояснювали тим, що температура кипіння рідини залежить від кривизни поверхні водяних глобул: чим більше розмір глобул, тим менша температура кипіння:

$$T_{\text{кип}} = \frac{2\sigma V}{r_{\text{г0}} R} \ln \left(1 + \frac{2\sigma}{r_{\text{г0}} P_{\text{атм}}} \right).$$

З огляду на ці дослідження, ми спробували отримати подібні результати, тільки для випадку дії розряду на краплю емульсії. Був використаний мультиметр Picotesrt M3510A, що дозволив записувати 330 показів в секунду. Однак, отримані часові залежності температури краплі (рис. 1.10b) явних полук не містили (червона лінія). Однак, через деякий час на сигналі термопарі з'являються високочастотні пульсації. Після проведення Фур'є аналізу даної залежності та використання високочастотного фільтру на фільтрованому сигналі (синя лінія, рис. 1.10b)

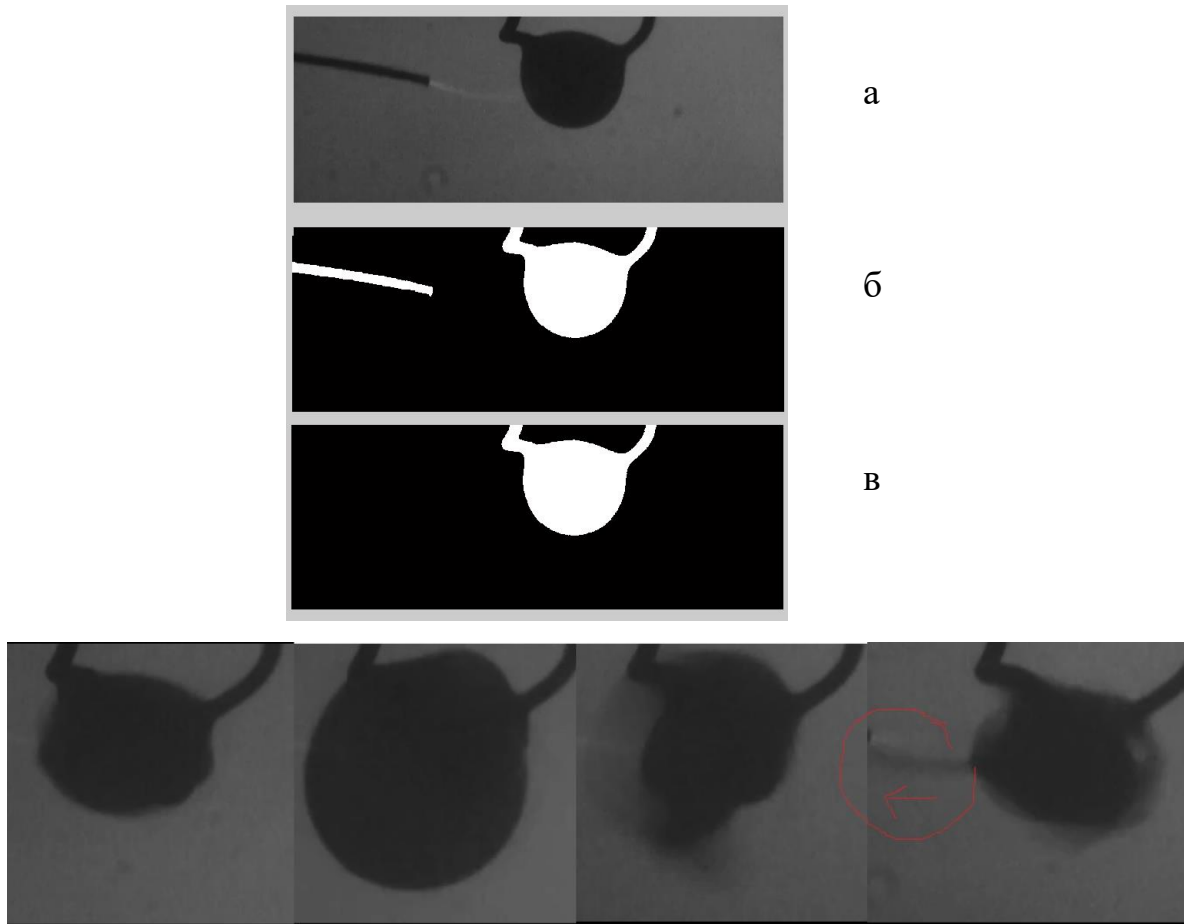


Рис. 1.11. Результати обробки відео файлу:

А) кадр з відео.

Б) бінарне зображення

В) оброблене бінарне зображення

Г) деякі кадри з відео, що показують пульсацію і викид матеріалу краплі при руйнуванні парового пухиря:

були помічені невеликі полочки. Та, з огляду на отримані результати в другому розділі, було прийнято, що це особливості фільтрування сигналу.

Також проводилася відео зйомка краплі емульсії (50%ДП/50% води) з частотою 400 кадрів/сек за допомогою фотоапарату Nikon 1.

Обробка відеозображень проводилася в пакеті Matlab 2014 і складалася з наступних кроків:

- 1) Читання кадру;
- 2) Перехід зображення в сіре і бінаризація його по заданому порозу контрастності;
- 3) Видалення непотрібних об'єктів за розташуванням і розміром (видалялися досить малі об'єкти і ті, що знаходилися біля країв кадру);

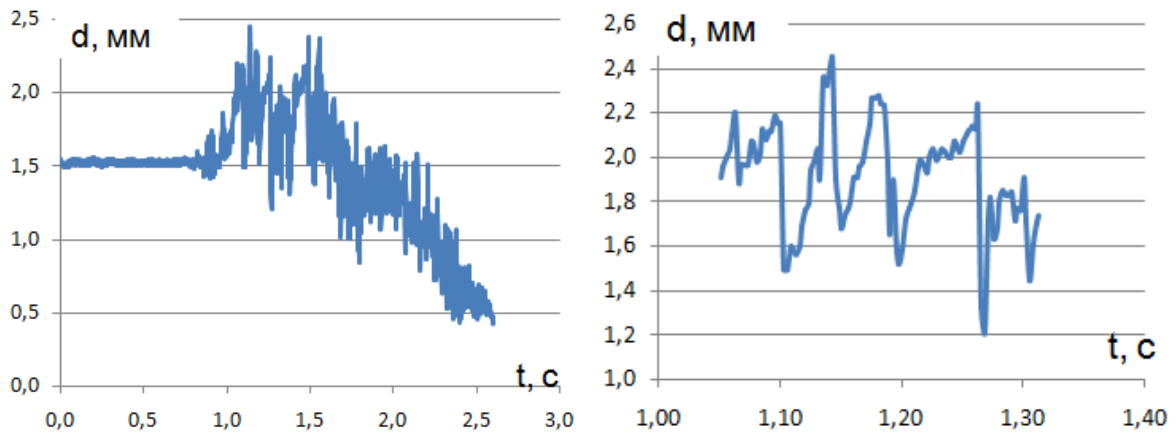


Рис. 1.12. Залежність зовнішнього діаметру краплі емульсії при дії електричного розряду

4) Знаходження розміру краплі (горизонтального) на певному рівні.

На рис. 1.12 представлено результати обробки одного з таких відео для емульсії 50%ДП/50%вода і отримання залежності діаметру краплі від часу. В даному випадку було оброблено одразу 1500 кадрів.

По-перше, майже всю першу секунду розміри краплі не змінюються. Це означає, що крапля знаходиться в стані інертного нагрівання. Потім починаються пульсації. З графіків можна побачити, що середній період пульсації складає 0,05 сек.

З огляду на отримані дані чітко видно наявність двох стадій:

1. стадія інертного прогріву

2. пульсаційний режим:

- а) Утворення і зростання парових оболонок навколо глобул;
- б) Досягнення стану максимального наповнення для парових оболонок;
- в) Скидування парових оболонок і глобул, що не випарувалися, в навколишній простір.

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

2.1. Модель передвибухової динаміки розігріву краплі ВПЕ

У звичайному стані ВПЕ є двофазною дисперсною системою. Однак, при досить інтенсивному розігріванні, коли тепла, що надходить з навколишнього середовища, достатньо для закипання води, з'являється третій компонент - пара води. При цьому внаслідок лапласівського тиску більші включення води мають меншу температуру кипіння, ніж дрібні глобули. Тому спочатку закипають саме вони. Зростання з часом оболонки пари збільшують обсяг краплі ВПЕ. Дисперсійне середовище, в даному випадку - паливо, через високу температуру кипіння практично не змінює свого об'єму. Тому зростання парових оболонок призводить до структурної розбудови краплі. В результаті об'ємна частка пари безперервно збільшується, а частка палива падає. Зрозуміло, що такий процес може тривати лише до певної межі. Неминуче настане такий момент, коли буде досягнуто стан максимального наповнення паровими оболонками об'єму краплі. Подальше збільшення обсягу краплі без порушення її суцільності стає неможливим і крапля руйнується. Сам момент руйнування супроводжується швидким викидом у довкілля парів води, частини палива та деякої частки глобул води, що не встигли випаруватися. При не дуже високих темпах нагрівання матеріал, що залишився, краплі під дією сил поверхневого натягу відновлює сферичну форму і процес повторюється. Процес такого пульсаційного випаровування краплі ВПЕ йде або до повного руйнування краплі, або до того моменту, поки паливо не розігріється до температури займання, що призводить до горіння. Таким чином, спостерігаються коливання поверхні краплі, що мають явно виражений релаксаційний характер.

Картина випаровування і горіння водо-паливної емульсії видається складною та заплутаною. Це обумовлено впливом різних чинників: вмістом

води у складі емульсії, дисперсністю глобул, розміром самих крапель. Для з'ясування ролі цих факторів пропонується найпростіша модель розігріву краплі водопаливної емульсії (ВПЕ).

В основі моделі лежать тепло-дифузійні уявлення про процеси випаровування та кипіння компонентів емульсії.

Для спрощення моделі вважатимемо:

- Крапля представляє собою трьохкомпонентну систему (паливо – пара – вода), яка складається з рідкого палива (дизельного палива) як дисперсійного середовища і частинок води, які оточені паровою оболонкою.
- Частинки води в краплі емульсії підкоряються монодисперсному закону розподілу;
- Випаровування дизельного палива в об'єм парового прошарку не відбувається з огляду на те, що температура «кипіння» дизельного палива (170-380°C) суттєво більше за температуру кипіння глобул води;
- Рівняння стану пари води підкоряється законам ідеального газу, так як вона знаходиться далеко від критичних умов.
- Числа подібності Нуссельта та Шервуда приймаються рівними двом із-за сферичності форми краплі і невеликих швидкостей руху глобул всередині краплі ВПЕ.

2.2. Підхід Кондратьєва і Опятюка

В роботах Кондратьєва і Опятюка [23] крапля водо-масляної емульсії поміщувалася в нагріту піч. Динаміку розігріву краплі ВПЕ розбивалася на три етапи.

На першому етапі розігріву краплі від початкової температури до температури кипіння немає необхідності розраховувати температуру пари, і тому процес описується наступними рівняннями:

рівняння розігріву палива:

$$c_m m_m \frac{dT_m}{dt} = (Q - L) \dot{m}_m + \frac{\lambda_g}{r_k} (T_g - T_m) S_k - N \frac{\lambda_{II}}{r_{II}} (T_m - T_{II}) S_{II},$$

рівняння розігріву води

$$c_g m_g \frac{dT_g}{dt} = \frac{\lambda_g}{r_g} (T_M - T_g) S_g,$$

рівняння кінетики випаровування палива:

$$\dot{m}_M = -\frac{D}{P_{ат} r_k} (P_M - P_M^{нас}) S_k \rho_{п.м.}$$

(індекси: м - олія, г - газ, к - крапля, п - пара, в - вода, п.м - пари олії).

Тут Q - тепловий ефект реакції горіння на одиницю маси палива, Дж/кг, L - питома теплота пароутворення масла в Дж/кг, c - питома теплоємність в Дж/(кг·К), m - маса в кг, T - температура в К, λ - коефіцієнт теплопровідності в Вт/(м·К), N - кількість глобул води в краплі, S - площа в м², D - коефіцієнт дифузії парів в м²/с, \dot{m} - масова швидкість випаровування в кг/с, r - радіус в м, $P_{ат}$ - атмосферний тиск, $P^{нас}$ - тиск насиченого пару в Па.

На другому етапі розігріву краплі від температури кипіння води до її повного випаровування система рівнянь, що описують цей процес, має вигляд:

рівняння розігріву олії

$$c_M m_M \frac{dT_M}{dt} = (Q - L) \dot{m}_M + \frac{\lambda_g}{r_k} (T_g - T_M) S_k - N \frac{\lambda_{п}}{r_{п}} (T_M - T_{п}) S_{п},$$

рівняння розігріву пари

$$c_n m_n \frac{dT_n}{dt} = \frac{\lambda_n}{r_n} (T_M - T_{п}) S_n - \frac{\lambda_n}{r_g} (T_n - T_B^{кип}) S_B,$$

рівняння кінетики випаровування масла:

$$\dot{m}_M = -\frac{D}{P_{ат} r_k} (P_M - P_M^{нас}) S_k \rho_{п.м.}$$

рівняння кінетики випаровування води:

$$\frac{dr_g^2}{dt} = -\frac{2\lambda}{L_g \rho_g} (T_M - T_g^{кип}),$$

де $T_g^{кип}$ визначається умовою:

$$P_{нас} = P_{ат} + P_{л}, \quad P_{л} = \frac{2\sigma}{r_e} - \text{лапласовий тиск.}$$

Тому пропонується наступна формула для температури кипіння глобул води, яка залежить від її діаметру:

$$T_{кин} = \frac{2\sigma V_m}{r_{но} R} \ln \left(1 + \frac{2\sigma}{r_{но} P_{атм}} \right),$$

де R – універсальна газова стала в Дж/(моль·К), σ – поверхневий натяг води в Н/м, V_m – молярний об'єм води в м³/моль.

На третьому етапі, який завершується інтенсивним кипінням олії, розраховуються температури олії, пари та кінетика випаровування олії:

рівняння розігріву олії

$$c_M m_M \frac{dT_M}{dt} = (Q - L) \dot{m}_M + \frac{\lambda_g}{r_k} (T_g - T_M) S_k - N \frac{\lambda_n}{r_n} (T_M - T_n) S_n,$$

рівняння розігріву пари

$$c_n m_n \frac{dT_n}{dt} = \frac{\lambda_n}{r_n} (T_M - T_n) S_n,$$

рівняння кінетики випаровування масла:

$$\dot{m}_M = - \frac{D}{P_{ат} r_k} (P_M - P_M^{нас}) S_k \rho_{п.м}.$$

Система рівнянь замикалася виразом для об'єму краплі і густини пари

$$V_k = V_M + V_n + V_e, \quad \rho_n = \frac{\mu P_{атм}}{RT_M}.$$

Недоліками цієї задачі є:

1) не описується яким чином враховуються пульсації зовнішнього розміру краплі емульсії протягом другого етапу; Автори визначали час настання першого мікровибуху.

2) не вказується наскільки зменшується розмір глобули води за один період пульсації. Якщо автори вважають, що різні пульсації в часі відповідають утворенню парової оболонки біля крапель різного розміру (спочатку на великих глобулах), то мірі зменшення розміру великих глобул

збільшується кількість середніх за розміром глобул. Тоді період пульсацій повинен збільшуватися.

2.3. 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.

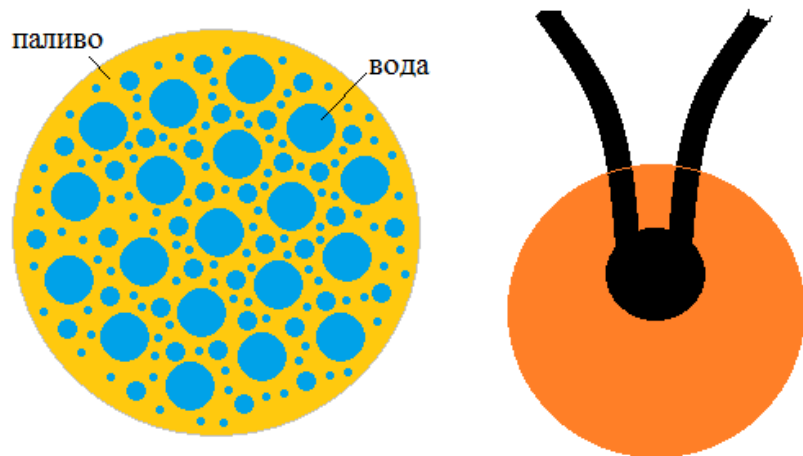


Рис. 2.1. Водно-паливна емульсія на першому етапі

На першому етапі відбувається розігрів краплі від початкової температури до температури кипіння води. Пари на поверхні розділу паливо-вода не утворюється, адже тиск насиченої пари менше за атмосферний тиск $p_v^{nac} < P_0$. Тому немає необхідності розраховувати температуру пари.

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

$$N_w = \frac{C_w (\pi / 6 \cdot d_{d0}^3 - \pi / 6 \cdot d_t^3)}{\pi / 6 \cdot d_{w0}^3} = C_w \frac{d_{d0}^3 - d_t^3}{d_{w0}^3}. \quad (2.1)$$

На цьому етапі тепло від електричного розряду йде на нагрівання краплі. Приймаємо, що від розряду нагрівається паливо, а далі паливо нагріває краплі води. Тому процес описується наступними рівняннями:

1) рівняння розігріву палива:

$$c_f m_f \frac{dT_f}{dt} = P + \frac{\lambda_g}{d_d} Nu_g (T_g - T_f) S_d - N_w \frac{\lambda_w}{d_w} Nu (T_f - T_w) S_w - \dot{Q}_t. \quad (2.2)$$

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

Тут *перший* доданок правої частини є теплова потужність розряду, *другий* – теплова потужність втрат в навколишнє газове середовище при температурі T_g , *третій* – теплова потужність, що йде на нагрівання крапель води, *четвертий* – тепловтрати через спаї термопари.

2) рівняння зміни зовнішнього розміру краплі:

$$\frac{d(d_d)}{dt} = -4 \frac{D_f}{d_d} \frac{Sh_g}{2} \frac{\rho_g}{\rho_f} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (2.3)$$

Тут приймається, що зовнішня поверхня краплі покрита паливом, яке і випаровується з поверхні в навколишнє середовище.

Залежність масової частки насичених парів рідини в повітрі від температури поверхні краплі $Y_{fs}(T_s)$ отримують, 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:

$$c_w \rho_w \frac{\pi}{6} d_w^3 \frac{dT_w}{dt} = \frac{\lambda_w}{d_w} Nu \cdot (T_f - T_w) \cdot S_w, \quad (2.4)$$

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

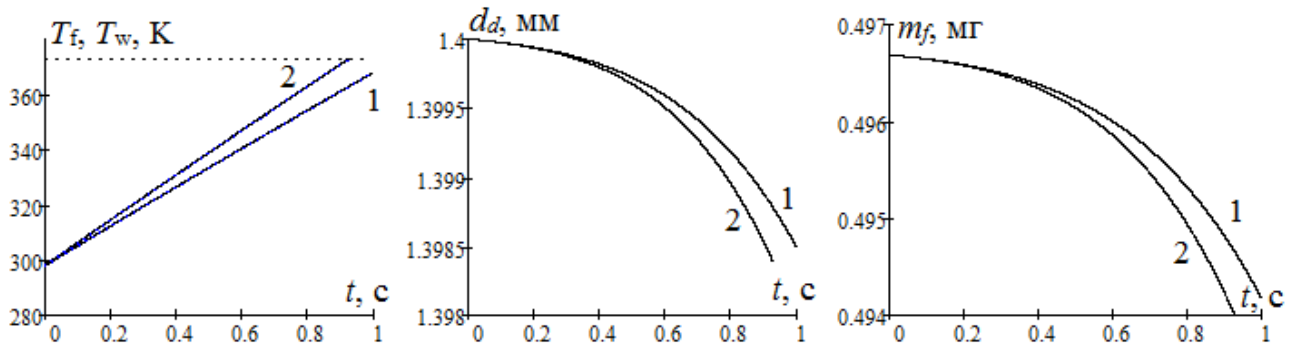


Рис. 2.2. Часові залежності а) температури палива і води в емульсії, б) діаметру краплі, в) маси палива в краплі, що висить на терморарі з діаметром спаю 0.8 мм. Потужність електричного розряду 1) 0.26 Вт, 2) 0.30 Вт.

$$\dot{m}_f = -\frac{dm_f}{dt} = 2d_d D_f \rho_g \frac{Sh_g}{2} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (2.5)$$

Дане рівняння схоже на (2.3), але потрібне для визначення концентрації води в емульсії перед другим етапом.

На рис. 2.2 представлені результати розрахунку системи рівнянь (2.2)-(2.5). Час розігріву краплі емульсії до температури кипіння води приблизно становить 1 с, що відповідає часу до початку пульсацій. За цей час діаметр краплі і маса палива практично не змінюється. Температура палива і води практично однакові.

2.4. Другий етап випаровування краплі емульсії під дією електричного розряду

На другому етапі поблизу кожної водяної глобули з'являється прошарок пару. Для того, щоб він був стабільним і мав змогу розширюватися повинно виконання умови: тиск насиченої пари повинен бути більшим, або рівним атмосферному тиску. Також треба враховувати вплив кривизни поверхні. Тому умова стабільності парового шару є

$$p_w^{nac} \geq P_0 + \frac{2\sigma_w}{r_w} - \frac{2\sigma_f}{r_v}. \quad (2.6)$$

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

Саме за рахунок лапласового тиску 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 температури кипіння T_{wboil} до моменту виконання умови (2.6) модель має вигляд системи (2.2) – (2.5).

При досягненні необхідної температури для умови (2.6) на поверхні глобули води з'являється шар пари.

Діаметр парового прошарку визначаємо з закону збереження маси:

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

Діаметр краплі емульсії при цьому повинен збільшуватися. Видимий об'єм краплі включає об'єм палива, пару, води та спая термопар:

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

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

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

Система рівнянь наступна:

1) рівняння розігріву палива:

$$c_f m_f \frac{dT_f}{dt} = P + \frac{\lambda_g}{d_d} Nu_g (T_g - T_f) S_d - N_w \frac{\lambda_v}{d_v} Nu (T_f - T_w) S_v - \dot{Q}_t. \quad (2.7)$$

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

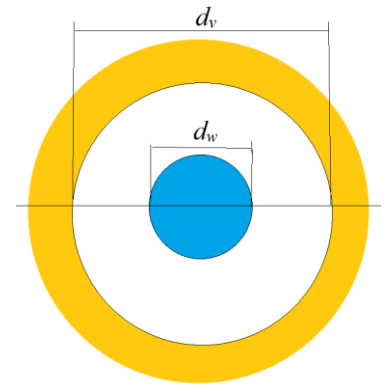


Рис. 2.3. Глобула води з паровим прошарком

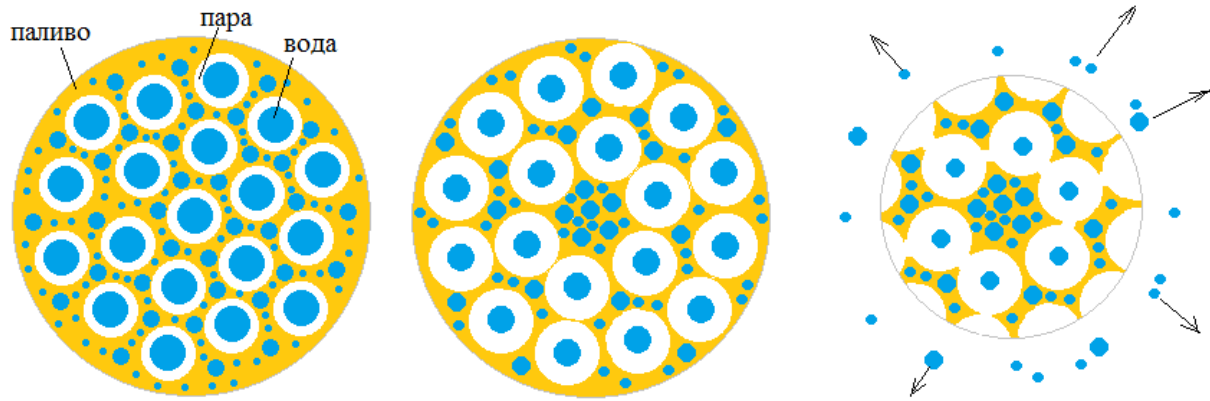


Рис. 2.4. Водно-паливна емульсія на другому етапі

Передача тепла краплям води відбувається через прошарок пару, теплопровідність якого значно менша за теплопровідність води та рідкого палива.

2) *рівняння розігріву крапель води:*

$$c_w \rho_w \frac{\pi}{6} d_w^3 \frac{dT_w}{dt} = 0, \quad (2.8)$$

Все тепло, що надійшло йде на випаровування води. Тому використовуючи аналог формули для випаровування $Q = mL$, отримаємо

3) *рівняння зміни розміру краплі води:*

$$\frac{d(d_d)}{dt} = -2 \frac{\pi d_w^2 \frac{\lambda_v}{d_w} Nu (T_f - T_w)}{L_{mw} \rho_w \pi d_w^2} = -2 \frac{\frac{\lambda_v}{d_w} Nu (T_f - T_w)}{L_{mw} \rho_w}. \quad (2.9)$$

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

$$\dot{m}_f = -\frac{dm_f}{dt} = 2d_d D_f \rho_g \frac{Sh_g}{2} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (2.10)$$

Рівняння для нагрівання пари ми не використовуємо. Закон Ньютона-Ріхмана, що застосовується в рівняннях (2.7) та (2.9) описують теплопередачу всередині парового шару, який знаходиться всередині між двом рідкими поверхнями з температурами T_f та T_w .

Дана система доповнюється температурними залежностями теплофізичних характеристик компонентів системи, які апроксимувалися в температурному інтервалі 20-130 °С.

Дизельне паливо. густина $\rho_f = 820-845 \text{ кг/м}^3$. Прийнято 830 кг/м^3

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

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

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

Питома теплоємність $c_f = 2300 \text{ Дж/(кг·К)}$.

Коефіцієнт дифузії парів: прийнято $D_f = 10 \cdot 10^{-6} (T/273)^{1.75} \text{ м}^2/\text{с}$.

Вода: густина $\rho_w = 1004 - 0.207 \cdot (T - 273) - 0.002 \cdot (T - 273)^2 \text{ кг/м}^3$

Молярна маса $\mu_f = 18 \text{ г/моль}$.

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

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

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

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

Питома теплоємність $c_w = 4200 \text{ Дж/(кг·К)}$.

Водяна пара.

густина $\rho_v = 0.59 \cdot (T/373)^{12.3} \text{ кг/м}^3$

Молярна маса $\mu_f = 18 \text{ г/моль}$.

Коефіцієнт дифузії парів: прийнято $D_v = 20 \cdot 10^{-6} (T/273)^{1.75} \text{ м}^2/\text{с}$.

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

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

Повітря:

густина: $\rho_g = 1.29 \cdot 273/T_g, \text{ кг/м}^3$.

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

Для розрахунку характеристик пульсацій необхідно 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 крапель з паровими прошарками до об'єму емульсії. На початковому етапі величина упаковки дорівнює об'ємній концентрації води в емульсії. Вода і дизельне паливо не розчиняються одна в одній, тому при появі парових прошарків розширення краплі відбувається до досягнення деякого критичного значення упаковки (рис. 2.4). При цьому парові кульки з краплями води всередині не почнуть торкатися одна одну, а також зовнішньої поверхні краплі емульсії (2.4с). Повинно відбутися розрив зовнішньої «плівки» рідини і вихід пару. При цьому можливе викид деякої частини маси краплі емульсії.

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) приймалося, що відбувається викид деякої частини матеріалу емульсії (наприклад, 2%), миттєве з'єднання іншої частини емульсії в нову краплю і повторення процесу розширення.

2.5. Вплив параметрів на характеристики випаровування

На рис.2.5. показано чисельний розв'язок системи рівнянь (2.2)-(2.5) та (2.7)-(2.10). З аналізу результатів видно, що пульсації починаються при температурі водяних глобул 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 розмір глобули води зменшується доволі слабо. Тому можна говорити про те, що втрата матеріалу емульсії відбувається в основному за рахунок викидів під час мікробухів.

Тобто електричний розряд приводить до диспергування крапель емульсій з великим вмістом води на відміну від крапель індивідуальних горючих рідин.

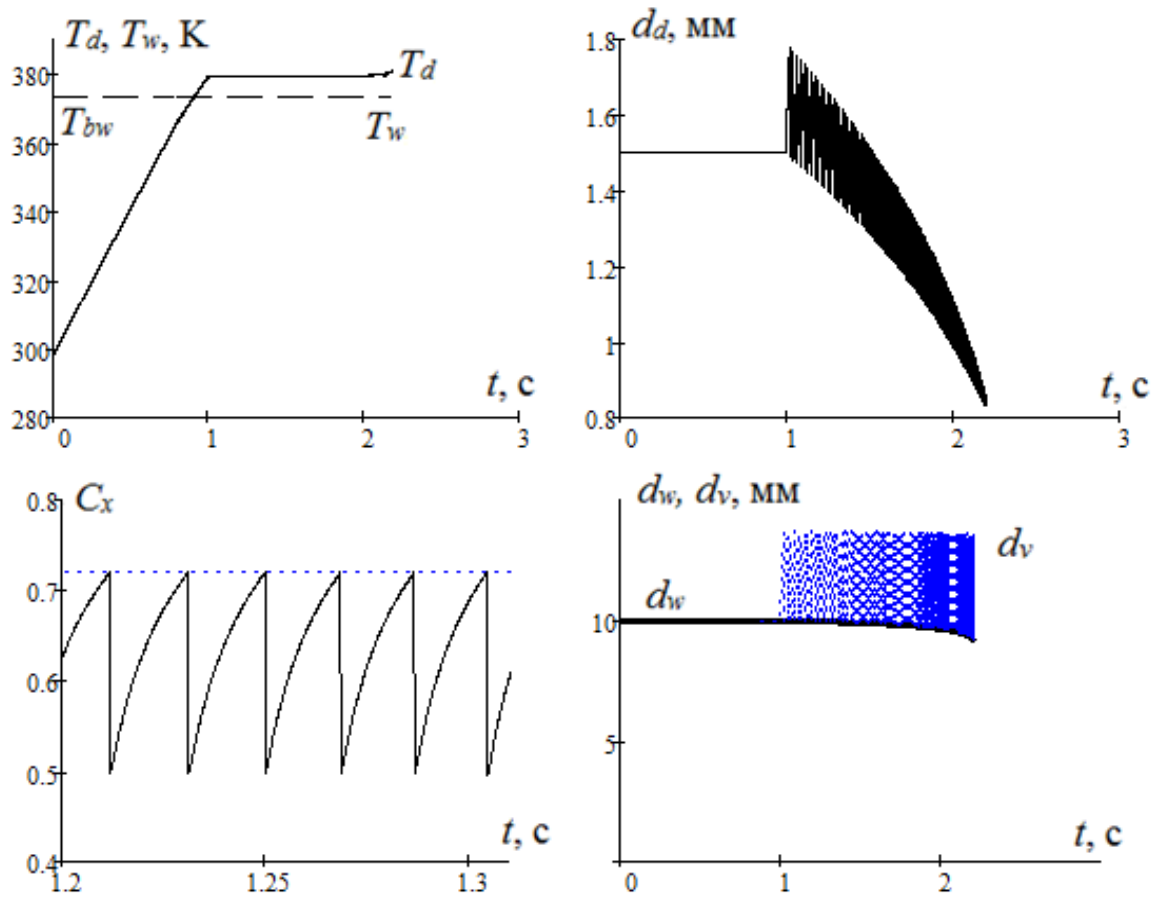


Рис. 2.5. Часові залежності а) температури дизельного палива і води; б) діаметра краплі, в) густина упакування парових кульок в емульсії; г) діаметру краплі води і парової бульбашки. Потужність розряду $P = 0.4$ Вт, температура повітря 20°C . Початкова частка води в емульсії 50%.

На відміну від тверджень Опятюка (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 глобули води можуть не встигати повністю випаровуватися до моменту досягнення критичного значення густини пакування.

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

Зменшення вмісту води призводить до збільшення періоду пульсацій. Тепер кількість глобул менша і вони можуть розширюватися до більшого об'єму до моменту досягнення критичної густини упакування. Тому і

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

повнота випаровування глобул води підвищується. Вже при об'ємному вмісті води в 10% води практично повністю випаровуються. І можна розглядати третій етап – випаровування краплі палива.

При зменшенні теплової потужності електричного розряду період пульсацій збільшується, що пояснюється тим, що для випаровування деякої кількості води з глобул необхідна певна кількість тепла. Менша потужність розряду призводить до збільшення часу нагрівання. Кінцевий діаметр крапель води практично не змінюється.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Результати роботи

Результати роботи слід оцінювати з точки зору виконання поставлених завдань.

Завдання 1. Дослідити вплив методу утворення емульсії на її реологічні, теплофізичні властивості.

Подано опис методів приготування емульсій. Проаналізовано їх реологічні властивості (стор.9-11). Досліджено теплофізичні властивості: горіння рідин та їх емульсій, дію електричного розряду на цей процес стор.12-13.

Отримано результати:

1. При використанні УЗ диспергатора в емульсію не переходить деяка кількість дизельного палива. Чим більша кількість дизельного палива в початковій суміші, тим більша кількість непереробленого палива;

2. За 5 днів розшарування відбувається в емульсіях обох типів але в різному ступені. Розшарування емульсії (ротаційний диспергатор) відбувається протягом декількох годин на три частини: А (ДП), В (емульсія), С (вода). Це пояснюється значно більшою дисперсністю водяних глобул.

Завдання 2. Дослідити вплив розряду на випаровування чистих рідин.

Досліджувалось випаровування крапель етанолу трьох різних розмірів під дією розряду.

Встановлено:

В кожному випадку спостерігається лінійна залежність площі поверхні краплі від часу, що підтверджує виконання закону Срезневського. Тангенс кута нахилу є константа випаровування K_{evap} . Видно, що константа випаровування при віддаленні від електроду проходить через максимум. Якщо прийняти, що вся потужність йде на випаровування краплі, то по

швидкості зменшення об'єму можна оцінити потужність розряду $L\rho \frac{dV}{dt} = P$. Проведено такі оцінки, представлено у вигляді таблиці.

Завдання 3. Дослідити вплив електричного розряду на горіння чистих рідин та водних емульсій.

Вивчено швидкість горіння рідин та емульсій в електричному розряді і без нього.

Встановлено наступне:

1. Емульсія від короткочасної дії джерела запалювання самостійно не горить. Згідно пожежних норм вона є пожежнобезпечною для зберігання;
2. Розряд збільшує швидкість горіння на 10-15 % незалежно від індивідуальної речовини;
3. Оскільки емульсії не горять без дії розряду, а відношення швидкостей горіння різних рідин (наприклад, гептану і дизельного палива) зберігається при дії чи відсутності розряду, то це дозволяє відносно порівнювати горіння різних індивідуальних рідин і емульсій з різним вмістом води. Відношення швидкостей горіння різних величин зберігається при дії чи відсутності розряду, що можна застосовувати для відносного порівняння горіння різних речовин (і емульсій).

Завдання 4. Дослідити і побудувати фізико-математичну теорію процесів тепломасообміну, яка пояснює пульсаційну поведінку поверхні краплі таких емульсій при випаровуванні та горінні.

1. Створено фізичну модель пульсаційної поведінки краплі емульсій, що постійно одержує протягом часу теплову енергію від електричного розряду.
2. Описано поведінку кожної з компонент: паливо, глобули (мікрокраплі) води, парові оболонки глобул.
3. Показано, що пульсації температури та параметрів, що від неї залежать, обумовлено розвитком «навкологлобульної» парової атмосфери: виникнення, розширення (розмір краплі емульсії при цьому збільшується), вихлопу в навколишнє середовище – втрата маси і зменшення розмірів краплі емульсії.

4. Запропоновано математичну модель пульсаційної поведінки краплі емульсії.

5. Числове розв'язання відповідних рівнянь описує пульсації діаметрів краплі емульсії в процесі випаровування під дією електричного розряду.

Висновки

1. Горіння емульсій з великим вмістом води на змоченій поверхні твердого тіла можливе при постійній дії високочастотного електричного розряду. Без дії розряду рідина самостійно не горить. Дія розряду при горінні індивідуальних рідин збільшує швидкість вигорання на 10-15%.

2. Швидкість випаровування індивідуальних рідин залежить від відстані між електродам і термопарою та досягає максимуму приблизно при 1 мм. При дії розряду спостерігається лінійне зменшення квадрату розміру краплі (закон d^2).

3. 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.

4. Втрата матеріалу емульсії при дії електричного розряду відбувається в основному за рахунок викидів під час мікровибухів. Тобто електричний розряд приводить до диспергування крапель емульсій з великим вмістом води на відміну від крапель індивідуальних горючих рідин.

5. Зменшення вмісту води та потужності електричного розряду призводить до збільшення періоду пульсацій.

_____ Тимофієнко К.В.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yiguang Ju. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // Progress in Energy and Combustion Science. – 2015. – Vol. 48. – P. 21-83.
2. 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>
3. 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.
4. 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 // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37-44.
5. 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.
6. 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>
7. 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>
8. 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>

9. 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>
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. 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>
12. Alessandro Stagni, Raffaella 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>
13. Weiwei Shang, Shouyin Yang, Tiemin Xuan, Zhixia He, and Jiawei Cao. Experimental Studies on Combustion and Microexplosion Characteristics of N-Alkane Droplets. // *Energy Fuels*. – 2020. – Vol. 34, 12. – P. 16613-16623. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02904>
14. 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>
15. 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>

16. 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>
17. 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>
18. Shuhn-Shyurng Hou, Fakhrrur 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>
19. 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>
20. 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>
21. 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.
22. 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.
23. 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.

24. Кондратьев Е. Н., Опятюк В. В. Некоторые особенности испарения капель водотопливных эмульсий при пульсационном режиме. // Фізика аеродисперсних систем. – 2004. – Т. 41. – С. 190-195.