

УДК 536.423

Черненко О.С., Тимофієнко К.В., Іванов М.О.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

E-mail: teplophys@onu.edu.ua

Випаровування крапель горючих рідин в електричному розряді

Розглядається випаровування краплі рідин при дії високочастотного електричного розряду. Краплі підвішувалися на термопару і знаходилися в повітрі кімнатної температури. Аналіз проводився в припущенні, що дія розряду є тепловою. Показано, крапля чистого рідкого палива (етанол і дизельне паливо) випаровується згідно закону d^2 . При цьому швидкість випаровування в залежності від відстані до електроду приймає максимальне значення. Аналіз швидкості зменшення маси краплі дозволило оцінити теплову потужність розряду, яка також при віддалені електроду від краплі проходить через максимум.

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, подальшим збільшенням розмірів парових бульбашок до виникнення «мікровибуху» краплі. 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.

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

Ключові слова: електричний розряд, крапля, випаровування, мікровибух, водопаливна емульсія.

Останнім часом ведеться пошук альтернативних палив для економії або заміни традиційних горючих. Основними вимогами до альтернативних палив є наявність достатніх ресурсів та невисока вартість; економія традиційних горючих (мазутів, вугілля, газу), технологічна та енергетична сумісність з транспортними та силовими установками, а також прийнятні економічні та екологічні показники процесів виробництва та застосування палив.

Одним із таких альтернативних палив є емульсії та суспензії на основі води з контрольованим вмістом нафтопродуктів, горючих і легкозаймистих рідин, в тому числі і відпрацьованих палив[1, 2].

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 пожежобезпечною 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 паливо, гас, бензин) не змішуються між собою і при змішуванні відбувається їхнє швидке розшарування.

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 [3-12]. 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 [5]. 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 [11] 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.

Автори вказують умови інтенсивного блискавичного кипіння краплі емульсії та її вибухового розпаду (фрагментації) з утворенням хмари дрібних крапель. Високі радіаційні теплові потоки необхідні в прикордонному шарі краплі для інтенсивного кипіння і вибухового розпаду крапель з подальшим утворенням дрібнодисперсного аерозолі. Описано принципові відмінності між миттєвим кипінням і вибуховим розпадом краплі емульсії при нагріванні на підкладці і в потоці нагрітого повітря. Деталізовано основні перспективи розвитку технології високотемпературного очищення води з урахуванням дослідженого в роботі швидкого розпаду краплі емульсії.

В [9] 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 мікрОВИбух із бурхливим випаровуванням води, яке починається на південному полюсі зразка.

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

Таким чином, вода в водо-мазутній емульсії – це вже не баласт, а своєрідний каталізатор, що покращує та прискорює процес спалювання палива.

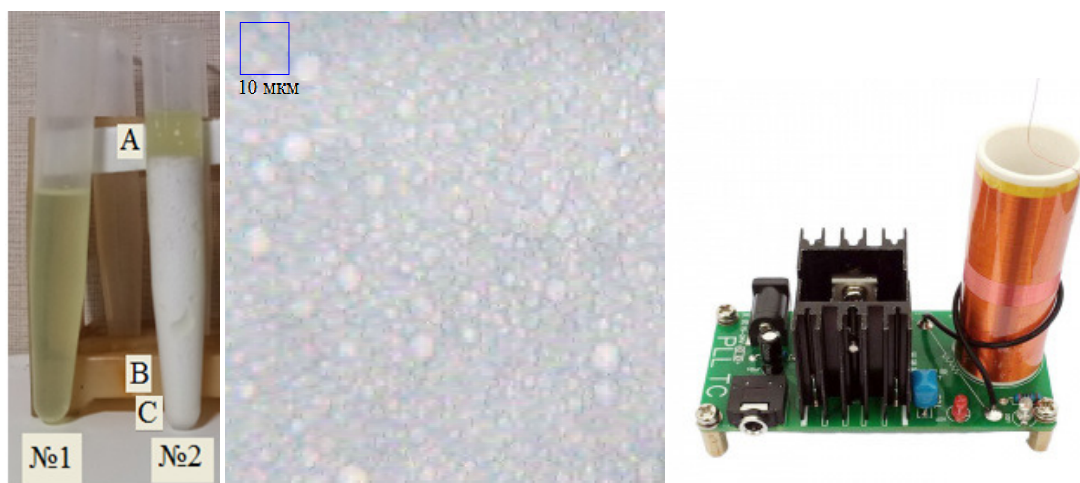


Рис. 1 а) Зовнішній вигляд приготовлених емульсій: №1 – дизельне паливо, №2 – емульсія ДП/вода 50/50 об.% через 10 хв в УЗ диспергаторі: А (ДП), В (емульсія), С (вода)
 б) Структура емульсії під мікроскопом, створеного УЗ диспергатором;
 в) міні генератор Тесла.

Адже при поступовому підвищенні температури (вже при 170°C) можливе дроблення крапель емульсії з подальшим переходом у пароподібний стан (мікрровибух крапель води) [1, 2]. Крім того дроблення крапель рідкого пального можливе внаслідок дії на факел емульсії високочастотного електричного розряду [13]. Зменшення розмірів крапель призводить до підвищення швидкості їх вигорання, а, як наслідок, і повноти згорання палива.

Метою роботи є вивчення особливостей випаровування та горіння крапель водопаливних емульсій важких вуглеводнів з великим вмістом води під дією високочастотного електричного розряду.

Створення та властивості емульсій. В якості емульсії ми використовували суміш дизельного палива і води. Для створення емульсій були використовувалися ультразвуковий диспергатор УЗДН-1. Частота і потужність коливань випромінювача задавалася 22 кГц. При використанні УЗ диспергатора в емульсію не переходить деяка кількість дизельного палива (рис. 1а). Чим більша кількість дизельного палива в початковій суміші, тим більша кількість не переробленого палива. На даному генераторі протягом $3 \div 5$ хв. отримувати біля 50 мл високодисперсної водопаливної емульсії (ВПЕ) ($0.1 \div 5$ мкм).

Після цього брався зразок отриманої емульсії, і поміщався під оптичний мікроскоп. На зображенні (рис. 1б) ми отримали крапельки води, розчинені в дизельному середовищі.

Випаровування горючих рідин. Дія розряду. На першому етапі досліджувався вплив розряду на випаровування індивідуальних рідин. На тонку ХА термопару зі спаєм 0.5 мкм вішалася крапля етанолу або дизельного палива (ДП). Змочування відбувалося таким чином, що спай знаходився всередині краплі. Біля краплі на деякій відстані від неї містився мідний електрод діаметром 150 мкм від міні генератора Тесла (рис. 1с). В певний момент часу включа-

Табл. 1. Кадри з випаровування краплі етанолу при дії розряду. Відстань від електроду до спаю термопари (до початкової поверхні краплі) 1.0 мм (0.65 мм)
0 с до розряду 0 с після розряду 4 с після розряду 8 с після розряду

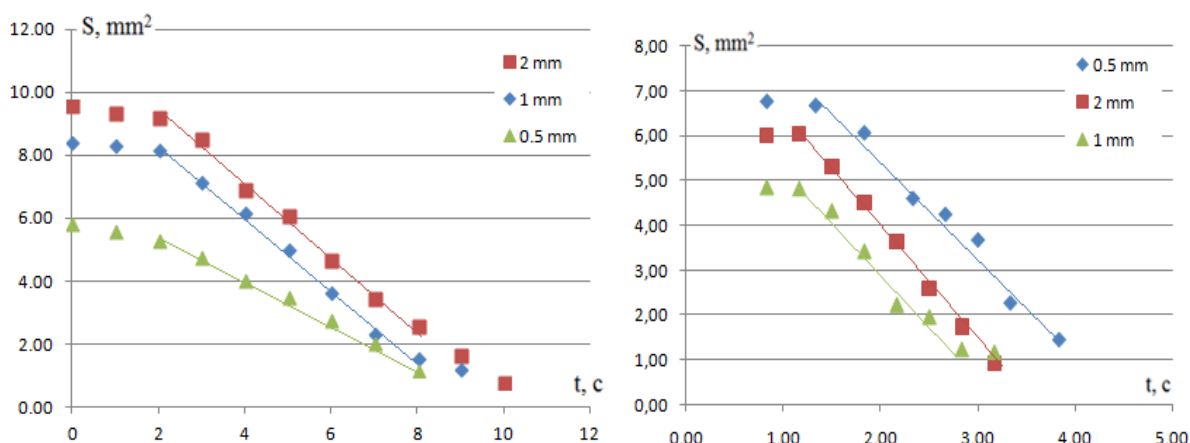
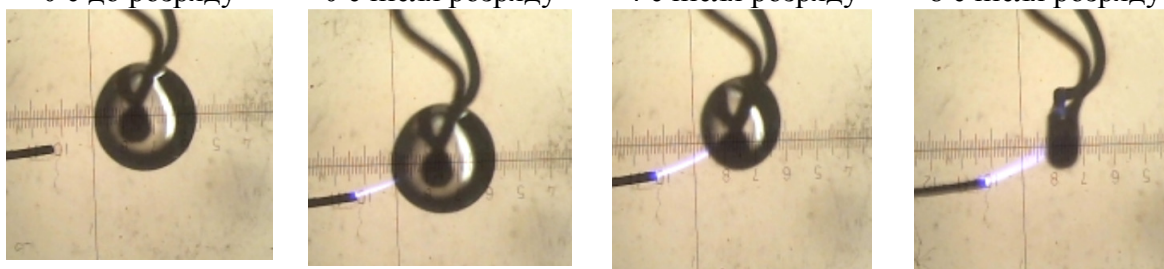


Рис. 2. зміна площі поверхні краплі а) етанолу і б) ДП при різних відстанях до електроду

Табл. 2. 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} , $\text{мм}^2/\text{с}$ (видима)	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} , $\text{мм}^2/\text{с}$ (видима)	0.70	1.05	0.81
Оціночне значення потужності розряду P , Вт	0.13	0.24	0.15

лося живлення котушки і краплю починав бити розряд. В табл. 1 показані вибрані кадри з відеозйомки вебкамери через окуляр мікроскопа для деякого початкового положення електроду і краплі.

Початкова форма краплі близька до сферичної. По мірі випаровування при дії розряду зменшення горизонтального розміру більш суттєве. Тому вимірювалися два розміри проекції: горизонтальний $d_x = d_z$ і вертикальний d_y . Якщо прийняти, що крапля є еліпсоїдом, то площу бічної поверхні можна визначити

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

На рис. 2 представлені залежності площі поверхні краплі в часі. Ці залежності лінійні, що підтверджує закон d^2 :

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

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

$$K_{\text{evap}} = \frac{1}{\pi} \frac{dS_{\text{пов}}}{dt} \Big|_{\text{лин}}.$$

В табл. 2. представлені розрахунки отриманих констант «випаровування». Цікаво, що значення констант горіння крапель в повітрі: $K_{\text{bur}} = 0.8 \text{ мм}^2/\text{с}$ [14] для етанолу і $K_{\text{bur}} = 1.1 \text{ мм}^2/\text{с}$ для ДП. Тобто електричний розряд може замінити нагрів від області горіння.

Якщо припустити, що за цей порівняно невеликий час випаровування все тепло від розряду передається краплі (оцінки показали, що тепловіддача дає менше 10% відносно потужності P), маємо наступне рівняння

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

Виходячи з нього обсяг краплі повинен зменшуватися лінійно з часом. Отримані таким чином значення потужності розряду P представлені в табл. 2. Дані для розрахунку наступні. **Етанол**: теплота пароутворення $L = 836 \text{ кДж/кг}$, густина $\rho = 789 \text{ кг/м}^3$. **ДП**: $L = 240 \text{ кДж/кг}$, $\rho = 830 \text{ кг/м}^3$.

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 протікання струму в такому плазмовому каналі виділяється менше тепла і, відповідно, менше передається тепла на краплю.

Аналогічні залежності були отримані і для крапель емульсії при дії електричного розряду. Відео зйомка краплі емульсії (50%ДП/50% води) проводилася з частотою 400 кадрів/сек за допомогою фотоапарату Nikon 1 (рис.3). На рис. 4 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.

Майже всю першу секунду розміри краплі не змінюються. Це означає, що крапля знаходиться в стані інертного нагрівання. Потім починаються пульсації (рис. 3, 4). З рис.4b можна побачити, що середній період пульсації складає 0,05 сек.

З огляду на отримані дані чітко видно наявність двох стадій: 1) **стадія інертного прогріву та 2) пульсаційний режим**: а) утворення і зростання парових оболонок навколо глобул; б) Досягнення стану максимального наповнення для парових оболонок; в) скид парових оболонок і глобул, що не випарувалися, в навколишній простір (рис. 3, червоне коло).

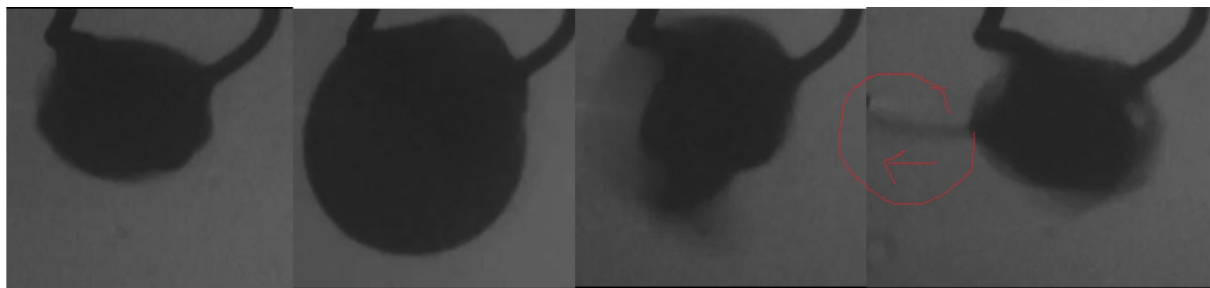


Рис. 3 Кадри з відео випаровування краплі емульсії при дії розряду, що показують пульсацію і викид матеріалу краплі при руйнуванні парового пухиря.

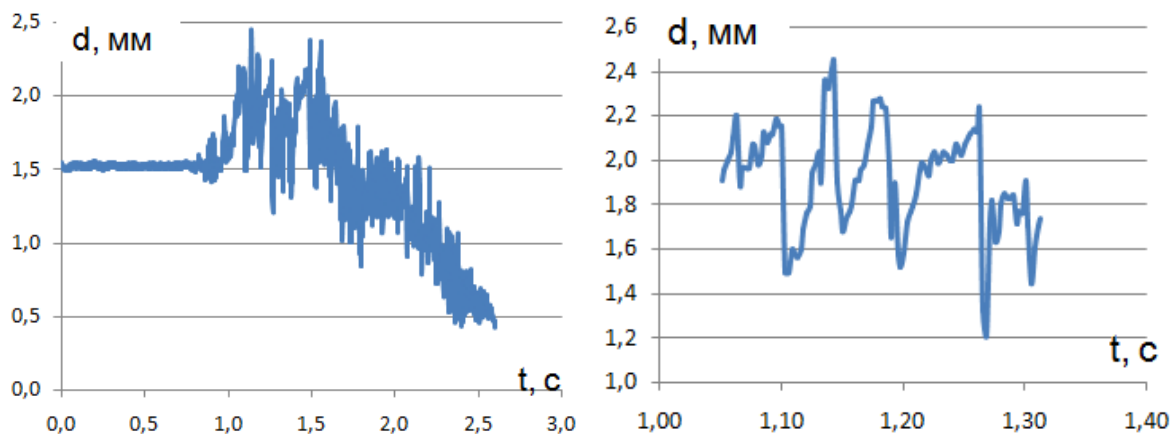


Рис. 4. Залежність зовнішнього діаметру краплі емульсії (50%ДП/50% води) при дії електричного розряду в повітрі кімнатної температури.

Модель передвибухової динаміки розігріву краплі ВПЕ. У звичайному стані ВПЕ є двофазною дисперсною системою: вода-паливо. 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 (рис. 5). Зростання з часом оболонки пари збільшують обсяг краплі ВТЕ. 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 горін-

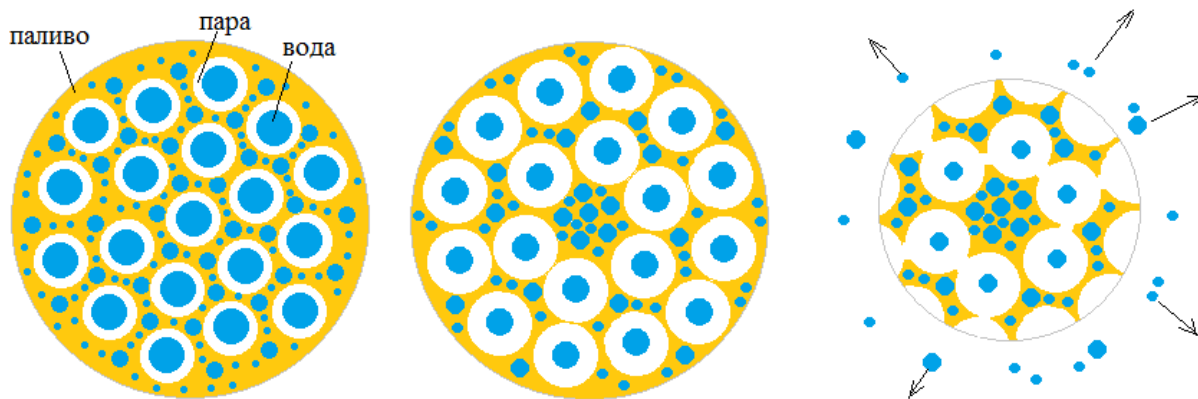


Рис. 5. Водно-паливна емульсія на другому етапі

ня. 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 роботах Кондратьєва і Опятюка [15, 16] крапля водо-масляної емульсії поміщувалася в нагріту піч. Динаміку розігріву краплі ВПЕ розбивалася на три етапи. 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.

В основі нижче приведеної 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 підкоряється монодисперсному закону розподілу;
- Випаровування дизельного палива не відбувається з огляду на те, що температура «кипіння» дизельного палива (170-380 °С) 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 Nu та Шервуда Sh приймаються рівними двом із-за сферичності форми краплі і невеликих швидкостей руху глобул всередині краплі ВПЕ.

В дані моделі буде приймати 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 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 $p_v^{нас} < P_0$. 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

$$N_w = \frac{C_w (\pi / 6 \cdot d_{d0}^3 - \pi / 6 \cdot d_t^3)}{\pi / 6 \cdot d_{w0}^3} = C_w \frac{d_{d0}^3 - d_t^3}{d_{w0}^3}. \quad (1)$$

На цьому етапі тепло від електричного розряду йде на нагрівання краплі. Приймаємо, що від розряду нагрівається паливо, а далі паливо нагріває краплі води (рис. 6). Тому процес описується наступними рівняннями:

1) рівняння розігріву палива:

$$c_f m_f \frac{dT_f}{dt} = P + \frac{\lambda_g}{d_d} Nu_g (T_g - T_f) S_d - N_w \frac{\lambda_w}{d_w} Nu (T_f - T_w) S_w - \dot{Q}_t. \quad (2)$$

$$\dot{Q}_t = 2\pi r_t \lambda_t \sqrt{\frac{\lambda_g}{\lambda_t} Nu_g} (T_d - T_g).$$

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 термопар.

2) рівняння зменшення зовнішнього розміру краплі [17]:

$$\frac{d(d_d)}{dt} = -4 \frac{D_f}{d_d} \frac{Sh_g}{2} \frac{\rho_g}{\rho_f} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (3)$$

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), закон Дальтона та рівняння стану (закон Менделєєва-Клапейрона):

$$p_{fs} = P_0 \exp \left(\frac{L_{fm} \mu_f}{RT_{fboil}} - \frac{L_{fm} \mu_f}{RT} \right), P_0 = p_{fs} + p_{gs}, Y_{fs} = \frac{\mu_f}{\mu_f \frac{p_{fs}}{P_0} + \mu_g \left(1 - \frac{p_{fs}}{P_0} \right)} \frac{p_{fs}}{P_0}.$$

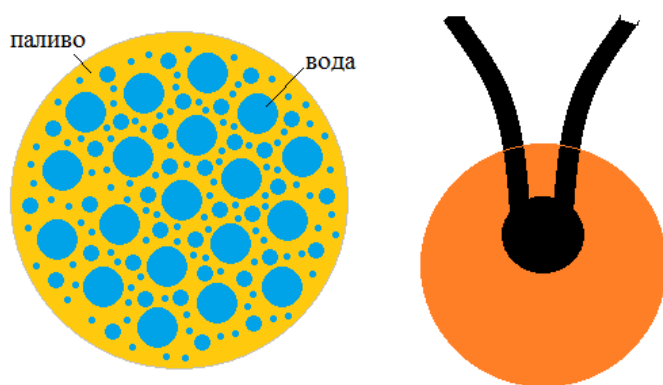


Рис. 6. Водно-паливна емульсія на першому етапі

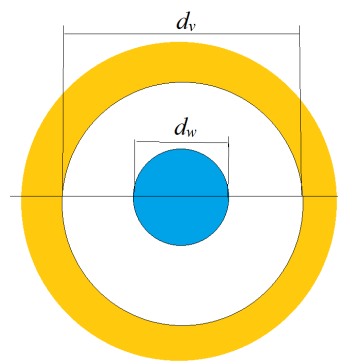


Рис. 7. Глобула води з паровим прошарком

де μ_f , μ_g – молярна маса парів та повітря, кг/моль, L_{fm} – середня питома теплота пароутворення палива в Дж/кг, T_{fboil} – температура кипіння палива в К, P_0 – повний тиск суміші.

3) рівняння розігріву крапель води:

$$c_w \rho_w \frac{\pi}{6} d_w^3 \frac{dT_w}{dt} = \frac{\lambda_w}{d_w} Nu \cdot (T_f - T_w) \cdot \pi d_w^2, \quad (4)$$

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

$$\dot{m}_f = -\frac{dm_f}{dt} = 2d_a D_f \rho_g \frac{Sh_g}{2} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (5)$$

Дане рівняння схоже на (3), але потрібне для визначення концентрації води в емульсії перед другим етапом.

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

$$p_w^{nac} \geq P_0 + \frac{2\sigma_w}{r_w} - \frac{2\sigma_f}{r_v}. \quad (6)$$

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 (6) модель має вигляд системи (2) – (5).

При досягненні необхідної температури для умови (6) на поверхні глобули води з'являється шар пари.

Діаметр парового шару визначаємо з закону збереження маси (рис.7):

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

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

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

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

Система рівнянь наступна:

1) **рівняння розігріву палива:**

$$c_f m_f \frac{dT_f}{dt} = P + \frac{\lambda_g}{d_d} Nu_g (T_g - T_f) S_d - N_w \frac{\lambda_v}{d_v} Nu (T_f - T_w) S_v - \dot{Q}_t. \quad (7)$$

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

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

2) **рівняння розігріву крапель води:**

$$c_w \rho_w \frac{\pi}{6} d_w^3 \frac{dT_w}{dt} = 0, \quad (8)$$

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

3) **рівняння зміни розміру краплі води:**

$$\frac{d(d_d)}{dt} = -2 \frac{\pi d_w^2 \frac{\lambda_v}{d_w} Nu (T_f - T_w)}{L_{mw} \rho_w \pi d_w^2} = -2 \frac{\frac{\lambda_v}{d_w} Nu (T_f - T_w)}{L_{mw} \rho_w}. \quad (9)$$

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

$$\dot{m}_f = -\frac{dm_f}{dt} = 2d_d D_f \rho_g \frac{Sh_g}{2} \ln \left(1 + \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \right). \quad (10)$$

Рівняння для нагрівання пари ми не використовуємо. Закон Ньютона-Ріхмана, що застосовується в рівняннях (7) та (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.

Прийняті дані для розрахунку. **Дизельне паливо** (усереднено): густина $\rho_f = 830 \text{ кг/м}^3$, молярна маса $\mu_f = 160 \text{ г/моль}$, температура кипіння: $T_{fboil} = 553 \text{ К}$, питома теплота пароутворення $L_{fm} = 240 \text{ кДж/кг}$, питома теплоємність $c_f = 2300 \text{ Дж/(кг·К)}$, коефіцієнт дифузії парів $D_f = 10 \cdot 10^{-6} (T/273)^{1.75} \text{ м}^2/\text{с}$. **Вода**: $\rho_w = 1004$ –

$0.207 \cdot (T-273) - 0.002 \cdot (T-273)^2$ кг/м³, $\mu_w = 18$ г/моль, $T_{wboil} = 373$ К, $L_{fm} = 226$ кДж/кг, $\lambda_w = 0.6$ Вт/(м·К), $\sigma_w = 76.8 - 0.181 \cdot (T - 273)$ мН/м, $c_w = 4200$ Дж/(кг·К).
Водяна пара: $\rho_v = 0.59 \cdot (T/373)^{12.3}$ кг/м³, $\mu_v = 18$ г/моль, $D_v = 20 \cdot 10^{-6} (T/273)^{1.75}$ м²/с, $\lambda_v = 39.1 \cdot T/373 - 15.2$ мВт/(м·К), $c_v = 1495 \cdot T/373 + 638$ Дж/(кг·К). **Повітря:** $\rho_g = 1.29 \cdot 273/T_g$ кг/м³, $\lambda_g = 0.024 \cdot (T_g/273)^{0.75}$ Вт/(м·К).

Для розрахунку характеристик **пульсацій** необхідно ввести характеристику 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. 5). При цьому парові кульки з краплями води всередині не почнуть торкатися одна одну, а також зовнішньої поверхні краплі емульсії (5с). Повинно відбутися розрив зовнішньої «плівки» рідини і вихід пару. При цьому можливе викид деякої частини маси краплі емульсії.

Це критичне значення було взяте за $C_0 = 0.70$, 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.

На рис. 8 представлені результати розрахунку системи рівнянь (2)- (5) та (7) - (10). 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.

Пульсації починаються при температурі водяних глобул (наприклад, діаметр в 10 мкм) при 106 °С. 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 мікровибухів.

Тобто електричний розряд приводить до диспергування крапель емульсії з великим вмістом води на відміну від крапель індивідуальних горючих рідин. На відміну від тверджень Опятюка [15, 16] (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. 3 та 4. показані деякі параметри, що отримані при чисельному варіюванні вмісту води в емульсії та потужності електричного розряду.

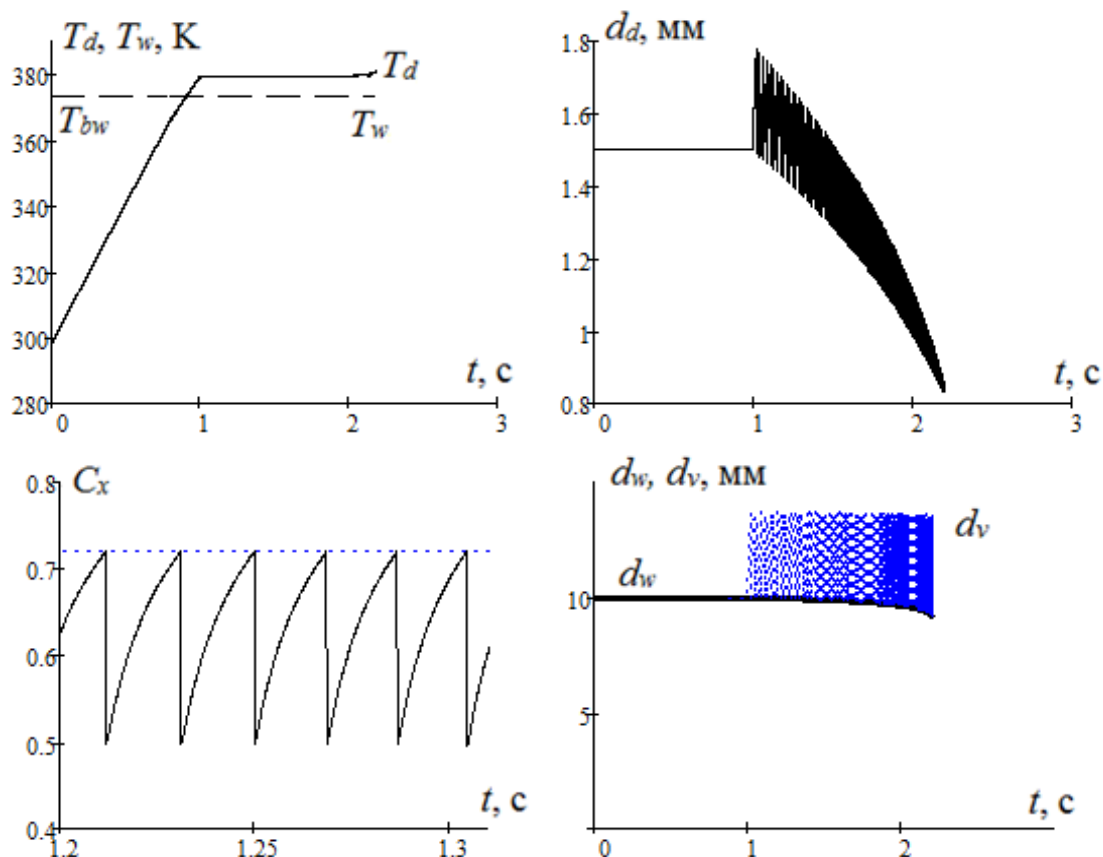


Рис. 8. Часові залежності а) т температури дизельного палива і води; б) діаметра краплі, в) густина упакування парових кульок в емульсії; г) діаметру краплі води і парової бульбашки. Потужність розряду $P = 0.4$ Вт, температура повітря 20°C . Початкова частка води в емульсії 50%.

Табл. 3. 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

$C_w, \%$	$t_{\text{evap}}, \text{с}$	$T_{\text{puls}}, \text{мс}$	$\nu_{\text{puls}}, \text{Гц}$	$d_{wk}, \text{мкм}$
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. 4. 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.

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

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 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.

Висновки. Таким чином в результаті роботи було показано наступне.

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

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.

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

Література:

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. – P. 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. –P. 122520 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122520>
3. *Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* 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>
4. *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>
5. *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>
6. *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>
7. *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>
8. *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>
9. *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>
10. *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>
11. *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>
12. *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, 15, 128578
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128578>
13. *Стари́ков 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.
14. *Хитрин Л.Н.* Физика горения и взрыва. М.: Московский университет, 1957. – 452 с
15. Особливості випаровування та горіння краплин водопаливних емульсій важких вуглеводнів : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 01.04.17 / В. В. Опятюк; Одес. нац. ун-т ім. І.І. Мечникова. – О., 2012. – 20 с. – укр.
16. *Кондратьев Е. Н., Опятюк В. В.* Некоторые особенности испарения капель водотопливных эмульсий при пульсационном режиме // *Фізика аеродисперсних систем.* – 2004. – Т. 41. – С. 190-195.

17. Kopyka O.K., Kalinchak V.V., Chernenko A.S. Evaporation of droplets of binary mixtures of lower monohydric alcohols in heated air // Ukr. J. Phys. – 2023. – T. 68, № 10. – P. 660. <https://doi.org/10.15407/ujpe68.10.660>.

A.S. Chernenko, K.V. Timofienko, M.O. Ivanov

Evaporation of flammable liquids droplets in an electric discharge

SUMMARY

Evaporation of a liquid drop under the action of a high-frequency electric discharge is considered. The drops were suspended on a thermocouple and were in air at room temperature. The analysis was carried out under the assumption that the action of the discharge is thermal. It is shown that pure liquid fuel drop (ethanol and diesel fuel) evaporates according to the d²-law. At the same time, the rate of evaporation takes a maximum value depending on the distance to the electrode. Analysis of the rate of drop mass reduction made it possible to estimate the thermal power of the discharge, which also passes through a maximum when the electrode is moved away from the drop.

When evaporating emulsion droplets (50%/50% fuel/water) after the heating stage, pulsations of geometric size are observed. The drop size periodically changes near some average value with a certain frequency, which decreases with the time of "evaporation".

A physico-mathematical model of droplet heating under the thermal action of a discharge was constructed. The pulsations are explained by the evaporation of water globules inside the emulsion drop, the subsequent increase in the size of the vapor bubbles before the "micro-explosion" of the drop. The loss of emulsion material under the action of an electric discharge occurs mainly due to emissions during microexplosions. That is, the electric discharge leads to the dispersion of emulsions droplets with a high water content, in contrast to individual flammable liquids droplets.

A decrease in the water content and the power of the electric discharge leads to an increase in the period of pulsations.

Key words: electric discharge, drop, evaporation, microexplosion, fuel/water emulsion.