

УДК 662.61

doi: 10.32620/aktt.2019.8.06

С. Г. ОРЛОВСЬКА, М. С. ШКОРОПАДО, О. М. ЗУЙ

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна

ГОРІННЯ ПАЛИВА НА ОСНОВІ АЛКАНІВ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Актуальність досліджень процесів горіння палив на основі алканів обумовлена пошуком нових ефективних, екологічно чистих палив для енергетики та аерокосмічної галузі. Парафін (суміш алканів) є легкоплавким матеріалом, який може використовуватись в якості екологічно чистого і високоенергетичного палива. Важливим завданням є інтенсифікація процесів горіння палива в реакційному об'ємі. Одним із чинників інтенсифікації може бути електричне поле. Метою даної роботи є дослідження закономірностей впливу електричного поля на процеси високотемпературного тепломасообміну, плавлення і горіння крапель рідкого палива на основі алканів.

В роботі розроблена методика досліджень кінетики плавлення і горіння крапель рідкого палива з використанням цифрової зйомки об'єкта дослідження та комп'ютерної обробки отриманих зображень.

Проведено дослідження впливу однорідного електричного поля на горіння частинок алканів в повітрі. Визначена стадійність процесів тепломасообміну в процесі горіння. Показано, що плавлення частинки являється основною складовою частиною періоду індукції, часу за який частинка спалахує. Виявлено, що швидкість плавлення суттєво зменшується, якщо напруженість електричного поля перевищує деяке критичне значення. Встановлено, що вплив електричного поля на плавлення більш виражений при підвищених температурах газу. Доведено, що при плавленні частинки октадекана в електричному полі відбувається обертання нерозплавленої залишкової твердої фази в розплаві, що є проявом ефекту Квінке.

Вивчена кінетика горіння крапель октадекана різних початкових діаметрів. Доведено, що на певній ділянці горіння виконується лінійний закон зміни квадрату діаметра краплі з часом (закон Срезневського). Проведено дослідження щодо впливу електричного поля на швидкість горіння частинок різного початкового діаметру. Встановлено, що під впливом електричного поля відбувається зростання швидкості горіння крапель алканів. Зокрема, для крапель октадекану, швидкість горіння в постійному електричному полі зростає на $10 \div 23\%$ в залежності від початкового діаметру краплі. Знайдено сталі горіння крапель октадекану.

Вивчено вплив електричного поля на геометричні розміри полум'я. Встановлено, що під впливом поля полум'я стає асиметричним та зміщується в бік негативно зарядженої пластини конденсатора. При цьому зменшується висота полум'я і збільшується його ширина. Ці явища пов'язані з дією "іонного вітру" в полум'ї і перетворенням енергії електричного поля в теплову, внаслідок чого фронт горіння наближається до поверхні краплі, збільшуючи швидкість її випару.

Ключові слова: горіння; плавлення; паливо; двигуни; алкани; октадекан; швидкість горіння; електричне поле; полум'я.

Вступ

Випаровування крапель і горіння рідкого палива є предметом широких експериментальних і теоретичних досліджень [1 - 4]. Отримано багато експериментальних даних щодо механізмів випаровування, горіння і констант швидкості випаровування різноманітних рідких палив. Розроблено детальні фізико-математичні моделі тепломасообміну випаровування крапель, які дають можливість розрахувати температуру займання і горіння краплі, період індукції і час горіння. Ці дослідження мають велике значення для розрахунку і проектування двигунів внутрішнього згорання. За останні роки дослідження горіння крапель набули нового імпульсу в зв'язку з розвитком космічної техніки і пошуком нових

ефективних і екологічно чистих ракетних палив, так як традиційні ракетні палива є дуже токсичними і вибухонебезпечними. Найбільш безпечними, з точки зору транспортування і експлуатації є гібридні палива [5, 6]. Гібридні заряди на основі полімерів (гума, поліетилен, поліметилметакрилат і ін.) здатні швидко випаровуватися з поверхні і забезпечувати, таким чином, більшу повноту згорання і велику витрату палива, забезпечуючи при цьому достатню тягу.

Експерименти [7, 8] показали, що паливо на основі парафіну може забезпечити в 3 рази більші поверхневі витрати (випаровування палива і винесення його в зону горіння) в порівнянні з існуючими паливами. Висока ефективність такого палива пов'язана з особливостями тепло- і масообміну в камері згорання. Завдяки потоку тепла з зони горіння до

паливного заряду, на його поверхні утворюється шар розплаву. Високошвидкісним потоком газоподібного окислювача (кисень, закис азоту) окремі краплі розплавленого палива виносяться в газовий потік, де швидко згорають, в результаті чого горіння палива різко інтенсифікується.

Таким чином, для моделювання процесів в камері згорання гібридного ракетного двигуна і вибору оптимальних паливних композицій, необхідні надійні дані не тільки по горінню, але й плавленню і випаровуванню окремих частинок і крапель парафінів, тому що ці процеси є початковою стадією горіння. В [9 - 11] вивчені закономірності випаровування і горіння поодиноких крапель і системи крапель парафінів, визначені швидкості горіння і часові характеристики. Можливість плазмового запалювання парафінів вивчена в роботах [12 - 13]. Ці дослідження становлять інтерес для вдосконалення технологій виробництва гібридних двигунів.

Важливим практичним завданням є оптимізація процесів горіння палива в реакційному об'ємі. Факторами, що впливають на процес горіння, можуть бути зовнішні поля (магнітне, електричне). У роботах [14-17] показано, що електричне поле приводить до збільшення швидкості горіння вуглеводневих палив, деформації полум'я. Однак при горінні палива на основі парафінів (суміш алканів) це питання не вивчалось.

Метою даної роботи є вивчення закономірностей впливу електричного поля на процеси плавлення і горіння палива на основі алканів в повітрі.

1. Методика проведення експерименту. Послідовність стадій високотемпературного тепломасообміну

Для експериментальних досліджень використовувався октадекан ($C_{18}H_{38}$) чистотою 99 %.

Для дослідження високотемпературного тепломасообміну і кінетики горіння крапель парафіну був створений експериментальний стенд, схема якого зображена на рис. 1.

Частинка парафіну (1) розміщувалася на петлевому підвісі (або термопарі) (2) на відстані 8 мм від джерела нагрівання - розжареної спіралі (3). Стан частинки (краплі) і зміну її діаметра фіксувалися за допомогою Web-камери (4), яка була встановлена на мікроскопі (5). Згодом крапля спалахувала і її полум'я фіксувалося за допомогою Web-камери (6). Сигнали від двох Web-камер надходили на персональні комп'ютери (7, 8), де відбувалася обробка цифрових зображень. Частинка парафіну розміщувалася між обкладинками плоского конденсатора (9). За допомогою конденсатора створювалось однорідне електричне поле, напруженість якого дорівнювала $E=82$ кВ/м.

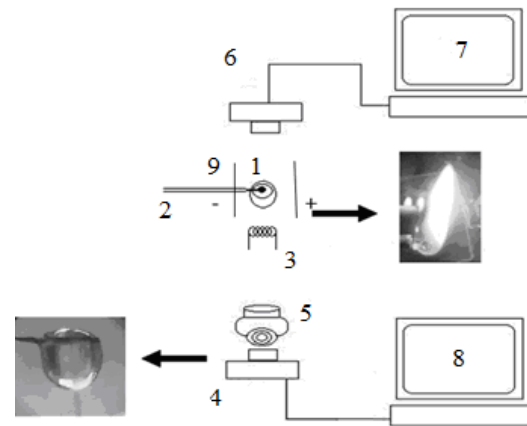


Рис. 1. Блок-схема експериментального стенду: 1 – частинка парафіну; 2 – підвісок (або термопара); 3 – підпал; 4, 6 – Web-камери; 5 – мікроскоп; 7, 8 – персональні комп'ютери, 9 – плоский конденсатор

Розглянемо результати експериментальних досліджень процесу горіння частинки октадекана. На рис. 2 представлена залежність ефективного діаметра частинки, а потім краплі октадекана від часу в процесі її нагрівання та горіння в повітрі без накладання електричного поля. Вивчення цифрових зображень парафінового зразка дав змогу виділити на залежності $d(t)$ чотири стадії високотемпературного тепломасообміну з газоподібним середовищем: 1 стадія – нагрівання октадекана в твердому стані, 2 стадія – плавлення зразка, 3 стадія – прогрів рідкої фази (краплі), 4 стадія – горіння краплі. Стадії, що передують процесу горіння, складають період індукції (або час затримки спалахування). Їх тривалість визначається інтенсивністю фізичних процесів, що протікають на поверхні і в об'ємі твердої і рідкої фази, а на стадії горіння - інтенсивністю процесів тепломасообміну та хімічної кінетики.

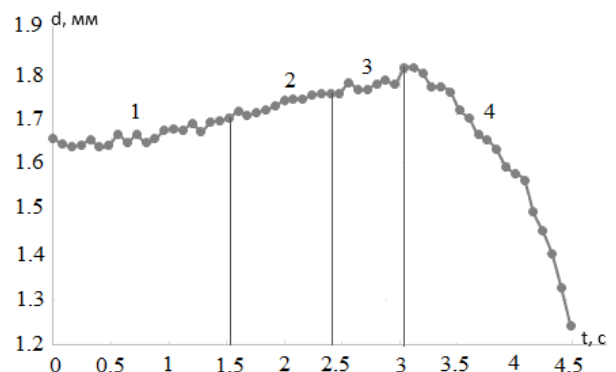


Рис. 2. Залежність $d(t)$ для частинки октадекана з початковим діаметром $d_b=1,64$ мкм, $T_g=450^\circ\text{C}$, без електричного поля:

1 – прогрів твердої фази, 2 – плавлення, 3 – прогрів рідкої фази, 4 – горіння

Із залежності $d(t)$ видно, що діаметр розплавленої краплі більше діаметра твердої частинки внаслідок збільшення відстані між молекулами рідкої фази.

На стадії 3 відбувається випаровування рідкого палива з поверхні краплі та прогрівання пари до критичної температури, при якій крапля спалахує.

Стадія горіння (4) характеризується інтенсивним випаровуванням краплі і різким зменшенням її діаметру (рис. 2). Обробка даних на стадії горіння в координатах $d^2=f(t)$ (рис. 3) призводить до лінійної залежності і вказує на дифузійний режим горіння краплі (закон Срезневського).

По тангенсу кута нахилу цієї залежності отримуємо сталу швидкості горіння, яка становить у даному випадку $k_{\text{гор}} = 1,43 \text{ мм}^2/\text{с}$.

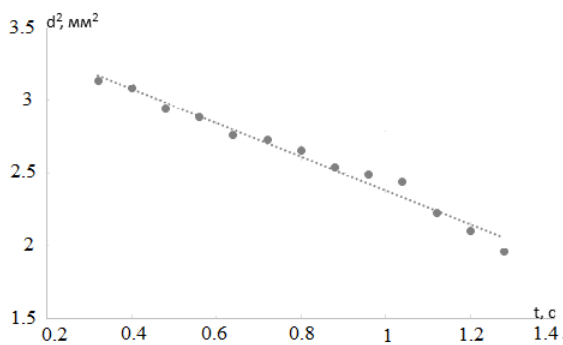


Рис. 3. Часова залежність квадрата діаметра краплі октадекана на стадії горіння, $d_0 = 1,64 \text{ мкм}$, $T_g = 450 \text{ °C}$, без електричного поля

2. Вплив електричного поля на кінетику плавлення частинки октадекана

Розглянемо особливості високотемпературного тепломасообміну частинок октадекана з повітрям в електричному полі ($E \neq 0$) і без поля ($E = 0$). Температура повітря поблизу краплі варіювалася в залежності від поставленої задачі. Для вивчення суто процесів плавлення парафіну задавалася температура $60\text{--}65 \text{ °C}$; для дослідження кінетики плавлення при горінні частинок парафіну температура нагрітого повітря становила 450 °C .

Температура частинок і крапель октадекана вимірювалася мідь – константовою термопарою, вільні кінці якої були термостатовані при 0 °C . На рис. 4 представлені результати експерименту по плавленню частинки октадекана в нагрітому повітрі ($t_g=65 \text{ °C}$) без накладання електричного поля.

Стадії плавлення передують стадії прогріву частинки до температури плавлення ($t_{\text{пл}} = 28,2 \text{ °C}$) (рис. 4, а і 4, б). На стадії прогріву відбувається розм'якшення частинки, що призводить до деяких змін її форми та незначного коливання ефективного діаметра (рис. 4, б). Частинка стає більш округлою. На рис. 4, в і 4, г представлені часові залежності об'єму розплаву і відносної частки розплаву в процесі плавлення частинки октадекана ($V_{\text{лік}}$ – об'єм рідкої фази, $V_{\text{сол}}$ – об'єм частинки перед плавленням). З представлених залежностей видно, що швидкість плавлення підпорядковується лінійному закону.

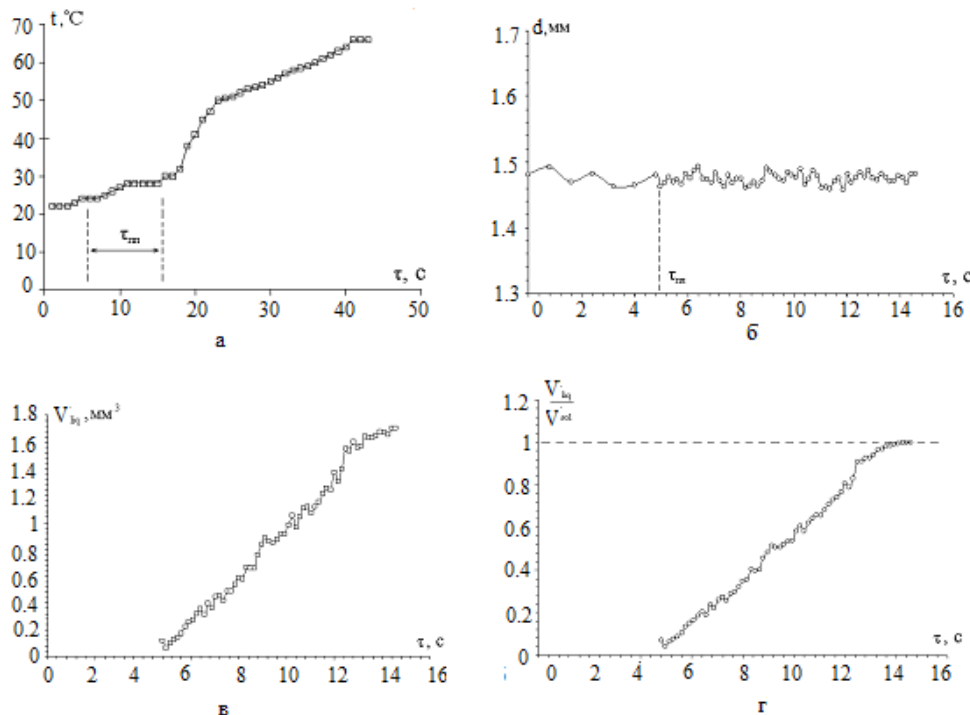


Рис. 4. Часові залежності температури (а), діаметра (б), розплаву (в), відносної частки розплаву (г) частинки алкану в процесі плавлення, $d=1,48 \text{ мм}$, $t_g=63 \text{ °C}$. Електричне поле відсутнє ($E = 0$)

Спільний аналіз цифрових зображень і залежностей $t(\tau)$ дозволив визначити час і температуру частинки на стадії плавлення (рис. 4, а).

Проведемо аналіз наших результатів щодо впливу електричного поля на характеристики плавлення частинок октадекана які розміщувалися на терморпарі у нагрітому до невисокої температури (56°C) повітрі (рис. 5).

Видно, що в електричному полі процес плавлення протікає довше, швидкість появи розплаву менша (рис. 5, б). Про це свідчить також порівняння зображень крапель в один і той же момент часу, при плавленні у відсутності електричного поля (д) і в полі (е). Окрім того, крапля, яка плавиться в електричному полі, відхиляється в напрямку поля.

Помічено, що відбувається зменшення діаметра частинки до мінімального значення перед плавленням або на початку плавлення. Час плавлення краплі $\tau_{\text{пл}}$ в електричному полі більше, ніж у відсутності поля. Розплав у відсутності електричного поля з'являється швидше. Отримані відео дозволяють зробити висновок, що в електричному полі залишкова тверда фаза при плавленні обертається і має більш компактний вид, ніж у відсутності поля.

Розглянемо процес плавлення частинки октадекана при високій температурі нагрітого повітря, достатній для займання краплі і подальшого її горіння.

На рис. 6 представлена отримана нами часова залежність діаметра частинки і краплі (після плавлення) октадекана в електричному полі. При накладанні поля простежуємо аналогічну стадійність про-

цесів тепломасообміну, як і без поля: прогрів твердої фази (1), її плавлення (2), прогрів рідкої фази (3), горіння краплі (4).

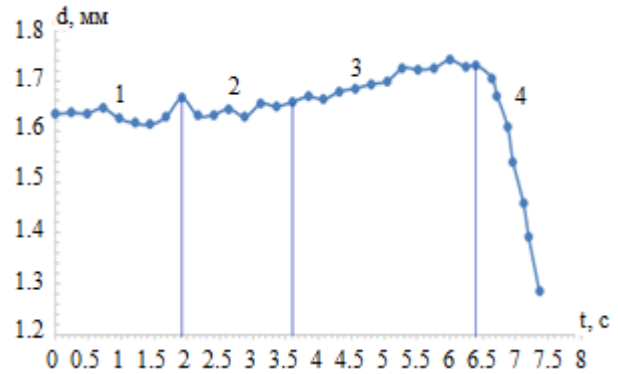


Рис. 6. Залежність діаметра зразка октадекана $d_b = 1,64$ мм від часу при $T_g = 450^\circ\text{C}$ в електричному полі, $E = 82\text{кВ/м}$,

з представлених рисунків (див. рис. 2 і рис. 6) випливає, що загальна тривалість всіх стадій, що передують горінню (стадії 1, 2, 3), тобто період індукції, у разі наявності електричного поля, для даного випадку, практично в 2 рази більший.

Дослідження зображень частинок в процесі плавлення дозволили зробити наступні висновки. У разі відсутності електричного поля залишкова тверда фаза практично вертикально осідає в розплаві на дно краплі, а потім зникає. При плавленні в електричному полі рідка фаза з'являється повільніше,

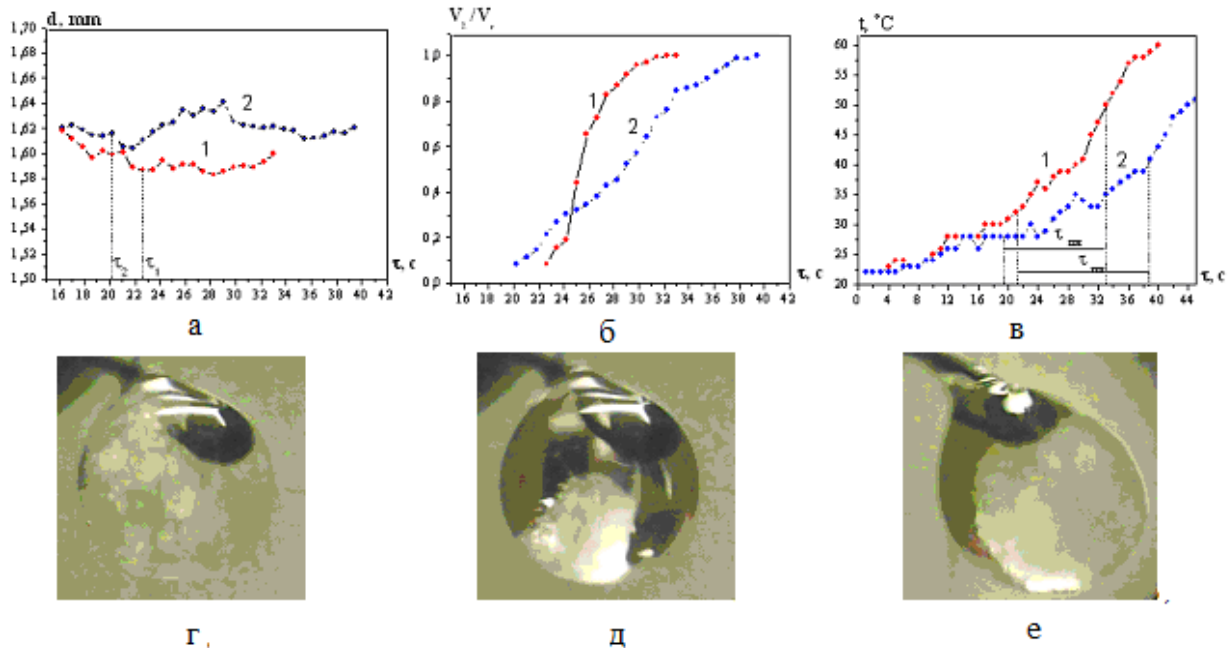


Рис. 5. Часові залежності діаметра (а), відносної частки розплаву (б), температури (в) частинки октадекану в процесі її нагрівання та плавлення без електричного поля (1) і в полі (2): $d=1,62$ мм, $t_g=56^\circ\text{C}$. Зображення краплі октадекана в різні моменти часу: г – $E = 0$, $\tau = 20,88$ с, д – $E = 0$, $\tau = 27,76$ с, е – $E=82$ кВ/м. $\tau=27,76$ с

а залишкова тверда фаза в процесі плавлення зазнає коливання і обертається в розплаві при осіданні на дно краплі.

Комп'ютерна обробка цифрових зображень краплі дозволила визначити об'єм рідкої фази в процесі плавлення і визначити швидкість плавлення. На рис. 7. представлені у порівнянні залежності об'єму розплаву від часу при плавленні частинки октадекана без накладання електричного поля і в електричному полі. Видно, що електричне поле призводить до зміни якості залежності $V_{\text{liq}}(t)$. Без електричного поля залежність $V_{\text{liq}}(t)$ монотонно зростаюча функція, яка дозволяє визначити середню швидкість плавлення частинки. В електричному полі плавлення можна розбити на дві стадії з різними швидкостями появи розплаву. На початковому етапі частинка плавиться повільно, потім, при появі певної кількості розплаву, швидкість плавлення швидко зростає. Саме на другому етапі спостерігається обертання твердого залишку в розплаві. Знайдені нами значення часу плавлення τ_f і швидкості плавлення v_f , частинок октадекана однакових початкових діаметрів представлені в таблиці 1.

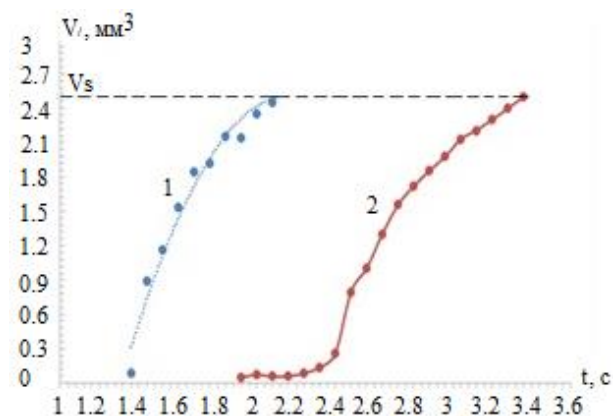


Рис. 7. Залежності об'єму розплаву в процесі плавлення частинки октадекана у відсутності електричного поля (1) і в електричному полі (2); $d_b=1,64$ мм, $t_g = 450$ °C

Таблиця 1
Вплив електричного поля на характеристики плавлення частинки октадекана

d, мм	E=0		E=82 кВ/м		
	τ_f , с	v_f , мм ³ /с	τ_f , с	v_{f1} , мм ³ /с	v_{f2} , мм ³ /с
1,64	0,88	2,08	1,44	1,06	1,86

З таблиці видно, що час плавлення частинки парафіну в електричному полі приблизно в півтора рази більший, ніж у відсутності поля. Це є результатом того, що швидкість плавлення в електричному полі на початковому етапі (v_{f1}) приблизно в 2 рази нижча, ніж на другому етапі плавлення (v_{f2}).

Пояснення отриманих результатів щодо впливу електричного поля на характеристики плавлення можна отримати виходячи з електронної теорії поляризації неполярних діелектриків. Парафін (октадекан) є неполярним діелектриком з діелектричною проникністю $\epsilon = 1,9 \dots 2,2$. Поляризація діелектриків у всіх випадках виникає внаслідок зміщення атомних електронів і ядер, які відбуваються при внесенні діелектрика в електричне поле.

При внесенні неполярної молекули в зовнішнє однорідне електричне поле E, негативні заряди молекули трохи змістяться щодо позитивних. В результаті у молекули з'явиться електричний дипольний момент p, величина якого залежить від напруженості зовнішнього поля E. Для визначення виду цієї залежності треба взяти до уваги, що при поляризації діелектриків ми маємо справу з зовнішніми електричними полями, напруженість яких дуже мала в порівнянні з напруженістю полів, що діють в атомах і молекулах.

Індукований дипольний момент p залежить від напруженості поля E лінійно. Якщо молекула сферично симетрична, то можна написати

$$p = \beta e, \quad (1)$$

де β - поляризованість молекули – стала величина, залежить від будови молекули.

Якщо молекула не має сферичної симетрії (у разі парафіну), то напрями векторів E і p, не співпадають. Однак лінійний зв'язок між компонентами цих векторів зберігається. Замість співвідношення (1) потрібно записати:

$$p_i = \sum \beta_{ij} E_j, \quad (i, j = x, y, z). \quad (2)$$

Дев'ять величин β_{ij} утворюють так званий тензор поляризованості молекули. Він залежить від будови молекули і від її орієнтації відносно координатних осей.

Тензор поляризованості молекули симетричний, тобто $\beta_{ij} = \beta_{ji}$. Це твердження є наслідком закону збереження енергії. При зміні електричного поля на dE заряди всередині молекули зазнають зміщення dr_a і над молекулою відбувається робота

$$\delta A = \sum_a e_a E dr_a = E dp.$$

Ця робота йде на збільшення потенційної енергії деформації молекули:

$$dU = E dp.$$

Запропоновані міркування можна використовувати для пояснення отриманих результатів. При накладенні електричного поля відбувається деформація сферично несиметричних молекул октадекана. Потім, в наслідок термодіелектричного ефекту, на

межі розділу твердої і рідкої фаз з'являється різниця потенціалів. Хоча ця різниця потенціалів невелика: $\sim 0,3 \div 0,7$ В, напруженість поля може досягати значної величини ($300 \div 700$ В/см). З урахуванням малої товщини подвійного електричного шару на границі розділу фаз (порядку 10 мкм), за нашими оцінками, напруженість зовнішнього поля порівнянна з напруженістю поля подвійного електричного шару. Обертання твердого ядра є проявом ефекту Квінке – спонтанного обертання маленьких сферичних і циліндричних тіл в рідкому діелектрику під дією сильного електричного поля. Ймовірно, частина теплової енергії переходить в енергію обертального руху твердого ядра, (нерозплавленого залишку), що уповільнює процес плавлення.

3. Дослідження впливу електричного поля на характеристики горіння крапель парафіну

За результатами наших експериментальних досліджень, проаналізуємо вплив електричного поля на швидкість і час горіння крапель алкану - октадекану.

Обробка відео зображень в різні моменти часу дозволила знайти часову залежність діаметра краплі в процесі горіння, а потім побудувати залежність квадрату діаметра краплі від часу (див. рис. 2). Із рис. 2 видно, що існує така область діаметрів палаючої краплі, для якої горіння описується законом d^2 (лінійна залежність квадрату діаметра краплі від часу). Із залежностей $d^2(t)$ було знайдено сталі швидкості горіння (табл. 2). Аналіз отриманих результатів вказує на збільшення швидкості горіння в електричному полі. Для частинки діаметром 1,96 мм швидкість горіння в електричному полі збільшується на 11%, а для діаметра 1,64 мм – на 23 %.

Таблиця 2

Вплив електричного поля на швидкість горіння крапель октадекану при $t_g=450$ °С

$d_b, \text{мм}$	$k_{\text{bur}}, \text{мм}^2/\text{с}$ ($E = 0$)	$k_{\text{bur}}, \text{мм}^2/\text{с}$ ($E = 82 \text{ кВ/м}$)	$\frac{k_{\text{bur}}(E \neq 0)}{k_{\text{bur}}(E = 0)}$
1,64	1,43	1,76	1,23
1,96	1,61	1,77	1,1

Внаслідок обробки цифрових зображень полум'я палаючої краплі було визначено форму і розміри полум'я в процесі горіння. На рис. 8 показана залежність максимальної висоти полум'я від часу горіння. В електричному полі спостерігається зменшення максимальної висоти полум'я приблизно в півтора рази. Тому збільшення швидкості горіння в електричному полі пов'язано з наближенням зони

горіння до поверхні краплі, підвищенням, внаслідок цього, температури в зоні горіння, що призводить до збільшення швидкості випаровування краплі.

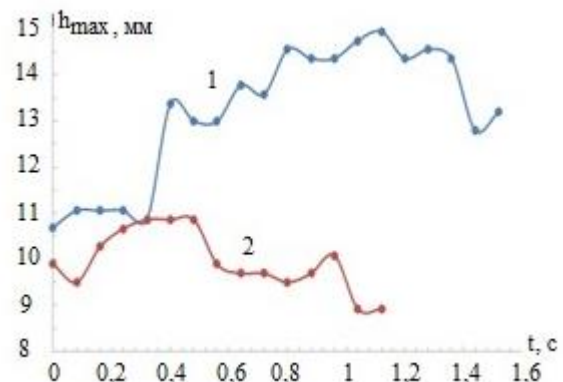


Рис. 8. Залежність максимальної висоти полум'я від часу горіння:

1 – $E = 0$; 2 – $E = 82$ кВ/м; $d=1,64$ мм, $t_g=450$ °С

На рис. 9 в порівнянні представлено еволюцію форми і геометричних розмірів полум'я крапель октадекана однакових початкових діаметрів в електричному полі і без поля в одні і ті ж моменти часу. Бачимо, що в електричному полі відбувається деформація полум'я: зміщення в напрямку електричного поля, зменшення його висоти і збільшення поперечних розмірів вздовж лінії напруженості електричного поля.

Зазначимо, що максимальне відхилення полум'я в бік негативного електрода спостерігається через деякий час після моменту займання краплі. При цьому, відхилення полум'я від центру краплі в напрямку поля (в бік негативної пластини конденсатора) у 3 рази більше, ніж проти поля.

Відомо, що істотну роль у процесі згорання вуглеводневих палив відіграє іонізація газів як у фронті полум'я, так і в зоні продуктів згорання. Іонізація газів вимагає значних витрат енергії. При згоранні вуглеводних палив сильний вплив на іонізацію полум'я має термоелектронна емісія. Це явище виникає при високих температурах, коли енергія електронів стає достатньою для того, щоб вони могли покинути поверхню твердих частинок. В результаті термоелектронної емісії частинки набувають позитивного заряду. У вуглеводневих полум'ях до таких частинок слід віднести, насамперед, частинки вуглецю (сажі).

При цьому процес емісії електронів з поверхні продуктів неповного згорання, в тому числі частинок вуглецю, інтенсифікується, що супроводжується збільшенням їх позитивного заряду. Електрони, що покинули частинки, прямують до позитивно зарядженого електрода, і їх рівноважна концентрація

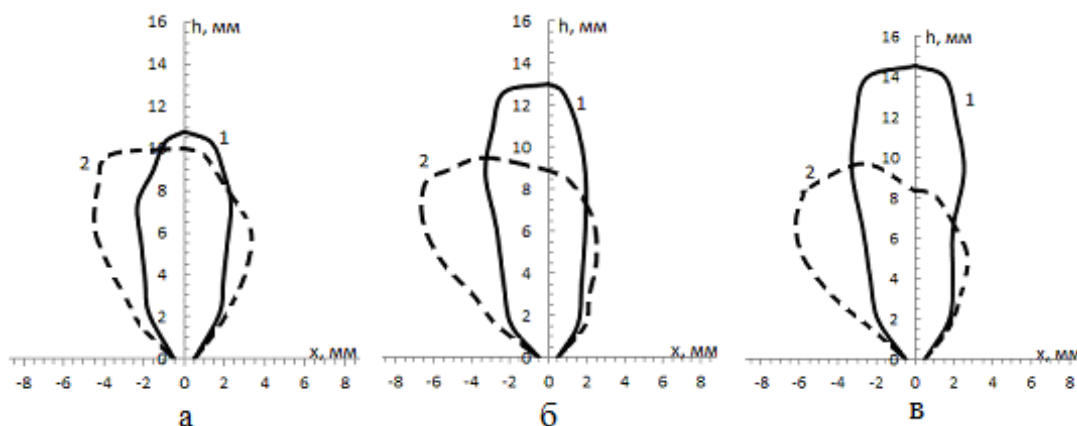


Рис. 9. Вплив електричного поля на геометричні розміри полум'я в процесі горіння краплі октадекана, $d=1.64\text{мм}$, $t_g=450\text{ }^\circ\text{C}$. 1 – без електричного поля, 2 – в електричному полі, $E = 82\text{ кВ/м}$; а) $t = 0$, б) $t = 0,55\text{ с}$, в) $t = 0,78\text{ с}$

досягається. У свою чергу частинки, що придбали в результаті випущення електронів позитивний заряд, спрямовуються до негативного електроду, захоплюючи при цьому за собою і нейтральні частинки. Це явище відомо під назвою "електронного вітру Четтока" або «іонного вітру».

Рух заряджених частинок викликає появу об'ємної сили, діючої на нейтральний газ. Ця сила спрямована в бік руху позитивно заряджених частинок, тобто до негативного електроду. Рух частинок, що виникає під дією електричного поля збурює полум'я, в результаті чого різко зростає його поверхня і загальна швидкість згоряння палива. «Іонний вітер», таким чином, змінює режим переміщення газу, в результаті чого можуть змінитися форма полум'я і швидкість горіння.

Крім того, на зміну характеристик процесу горіння в електричному полі може вплинути перетворення в об'ємі полум'я енергії електричного поля в теплову, у результаті чого підвищується температура і збільшується швидкість хімічних реакцій [15]. Також хімічна взаємодія може посилитися внаслідок поляризації реагуючих частинок і їх активації, здійснюваної за допомогою зіткнень з електронами, які в полі набувають деяку додаткову енергію.

Ймовірно, на процес поширення полум'я електричне поле впливає одночасно як за допомогою іонного вітру і перетворенням енергії електричного поля в теплову, так і прямим впливом на кінетику хімічних реакцій.

Збільшення швидкості горіння крапель октадекана в електричному полі можна пояснити впливом «іонного вітру» на полум'я, в наслідок чого, фронт горіння наближається до поверхні краплі і інтенсифікує тепловий потік в рідину. В результаті відбувається збільшення швидкості випаровування краплі. Фактором, що додатково збільшує температуру по-

лум'я, є перетворення енергії електричного поля в теплову.

Висновки

Визначена стадійність процесів тепломасообміну, що передують горінню крапель октадекана в нагрітому газі. Встановлено, що період індукції спалахування краплі складається з послідовних стадій: прогріву твердої фази, плавлення частинки і прогріву рідкої фази. На останній стадії відбувається випаровування краплі та прогрівання пари до температури спалахування.

Отримано, що в електричному полі зменшується швидкість плавлення частинки і, як наслідок, збільшується час плавлення. Збільшується тривалість і інших стадій тепломасообміну, що входять в період індукції. Це пов'язано з витратами енергії на пружну деформацію молекул октадекана в електричному полі, внаслідок зміщення електронних орбіт в атомах.

Доведено, що при плавленні частинки октадекана в електричному полі відбувається обертання нерозплавленої залишкової твердої фази в розплаві, що є проявом ефекту Квінке. У зв'язку з затратами енергії на цей процес відбувається подовження часу плавлення.

Вивчена кінетика горіння крапель октадекана різних початкових діаметрів. Доведено, що на певній ділянці горіння виконується лінійний закон зміни квадрату діаметра краплі з часом.

Доведено, що електричне поле приводить до збільшення швидкості горіння крапель алкану і зміщення полум'я в напрямку поля. При цьому полум'я стає асиметричним, значно змінюються його геометричні розміри: зменшується висота і збільшується ширина. Ці явища пов'язані з дією «іонного вітру» в

полум'ї і перетворенням енергії електричного поля в теплову, внаслідок чого фронт горіння наближається до поверхні краплі, збільшуючи швидкість її випаровування.

Література

1. Кумагаи, С. Горение [Текст] / С. Кумагаи ; пер. с японского. – М. : Химия, 1980. – 256 с.
2. Хитрин, Л. Н. Физика горения и взрыва [Текст] / Л. Н. Хитрин. – М. : Изд. Московского университета, 1967. – 442 с.
3. Математическая теория горения и взрыва [Текст] / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович и др. – М. : Наука, 1980. – 478 с.
4. Франк–Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплотеплопередача в химической кинетике [Текст] / Д. А. Франк–Каменецкий. – М. : Наука, 1987. – 502 с.
5. Характеристики горения жидкого топлива на основе нитрата гидроксилламмония. Механизм горения и приложение к ракетным двигателям малой тяги [Текст] / Т. Кацуми, Х. Кодама, Т. Мацуо и др. // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45, № 4. – С. 109 - 120.
6. Потапкин, А. В. Экспериментальное исследование тяговых характеристик гибридного ракетного двигателя при различных способах подачи окислителя [Текст] / А. В. Потапкин // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 15 - 22.
7. Experimental investigation of a paraffin based hybrid rocket [Text] / L. M. C. Santos, L. A. R. Almeida, A. M. Fraga at all // Thermal Engineering. – 2006. – Vol. 5, no. 1. – P. 8-12.
8. Brown, Timothy R. Testing of paraffin – based hybrid rocket fuel using hydrogen peroxide oxidizer [Text] / Timothy R. Brown, Michael C. Lydon // Department of Astronautical Engineering, USAFA. Colorado Space Grant Consortium. – 2005. – P. 1-8.
9. Investigation of the Burning of Paraffin Droplets [Text] / S. G. Orlovskaya, V. V. Kalinchak, M. S. Shkoropado at all // Ukr. J. Phys. – 2014. – Vol. 59, no. 4. – P. 396-400.
10. High temperature heat and mass transfer and combustion of paraffin particles [Text] / S. G. Orlovskaya, V. V. Kalinchak, F. F. Karimova at all // 12th International Conference “Aviation and Cosmonautics –2013”. – Moscow : MAI, 2013. – P. 371-373.
11. Orlovskaya, S. G. Burning characteristics of paraffin based fuel [Text] / S. G. Orlovskaya, M. S. Shkoropado, F. F. Karimova // Dusty Plasmas in Applications. 4th International Conference on the Physics of Dusty and Burning Plasmas, Odessa, august 25-29 2013. – P. 79 - 83.
12. Plasma assisted combustion of paraffin mixtures [Text] / O. A. Nedybaliuk, V. Ya. Chernyak, E.V. Martysh at all // Problems of Atomic Science and Technology. – 2013. – № 1. – P. 219 - 221.
13. Influence of plasma on surface tension of hydrocarbons [Text] / I. I. Fedirchuk, O. A. Nedybaliuk,

L. Yu. Vergun at all // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. – 2015. – № 1. (21). – P. 239–242.

14. Ламинарное пропановоздушное пламя в слабом электрическом поле [Текст] / П. К. Третьяков, А. В. Тутикин, Н. В. Денисова и др. // Физика горения и взрыва. – 2012. – № 2. – С. 9-14.

15. Ilchenko, E. P. Role of charged soot grains in combustion of liquid hydrocarbon fuels in external electric field [Text] / E. P. Ilchenko, V. G. Shevchuk // Ukr. J. Phys. – 2005. – Vol. 50, no. 2. – P. 144–150.

16. Flame Characteristics of n-Octane Droplet under Electrical Field [Text] / K. Yamashita, O. Imamura, J. Osaka at all // Journal of the Japan Society of Microgravity Application. – 2008. – Vol. 25, No. 3. – P. 381-386.

17. Imamura, O. A study on single fuel droplets combustion in vertical direct current electric fields [Text] / O. Imamura, Y. Kubo, J. Osaka // Proceedings of Combustion Institute. – 2005. – Vol. 30, No. 2. – P. 1949-1956.

References

1. Kumagai, S. Gorenje. Translation from Japanese [Combustion]. Moscow, Himija Publ., 1980. 256 p.
2. Hitrin, L. N., Fizika gorenija i vzryva [Physics of combustion and explosion]. Moscow, Moscow University Press Publ., 1967. 442 p.
3. Zel'dovich, Ja. B., Barenblatt, G. I., Librovich, V. B., Mahviladze. G. M., Matematicheskaja teorija gorenija i vzryva [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 478 p.
4. Frank–Kameneckij, D. A., Diffuzija i teploperedacha v himicheskoj kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 502 p.
5. Kacumi, T., Kodama, H., Macuo, T., Ogava, H., Cuboi, N., Hori, K. Harakteristiki gorenija zhidkogo topliva na osnove nitrata gidroksilammonija. Mehanizm gorenija i prilozhenie k raketnym dvigateljam maloj tjagi [The burning characteristics of liquid fuel based on hydroxylammonium nitrate. Combustion mechanism and attachment to low-thrust rocket engines] Fizika gorenija i vzryva, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 109-120. (In Russian).
6. Potapkin, A. V. Jeksperimental'noe issledovanie tjagovyh harakteristik gibridnogo raketnogo dvigatelja pri razlichnyh sposobah podachi oksitelja [Experimental study of the hybrid rocket engine traction characteristics with various ways of supplying oxidizer]. Fizika gorenija i vzryva, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 15-22. (In Russian).
7. Santos, L.M.C., Almeida, L.A.R., Fraga, A. M., Veras, C.A.G. Experimental investigation of a paraffin based hybrid rocket, Thermal Engineering, 2006, vol. 5, no. 1, pp. 8-12.
8. Timothy, R., Brown. Michael, C., Lydon Testing of paraffin – based hybrid rocket fuel using hydrogen peroxide oxidizer. Department of Astronautical

Engineering, USAFA. Colorado Space Grant Consortium, 2005, pp. 1-8.

9. Orlovskaya, S. G., Kalinchak, V. V., Shkoropado, M. S., Karimova, F. F., Chernyak, V. Ya. Investigation of the Burning of Paraffin Droplets, *Ukr. J. Phys.* 2014, vol. 59, no. 4, pp. 396-400.

10. Orlovskaya, S. G., Kalinchak, V. V., Karimova, F. F., Shkoropado, M. S., Chernyak, V. Ya., Vergun, L. Yu. High temperature heat and mass transfer and combustion of paraffin particles. *12th International Conference "Aviation and Cosmonautics-2013"*, Moscow, MAI Publ., 2013, pp. 371-373.

11. Orlovskaya, S. G. Shkoropado, M. S., Karimova, F. F. Burning characteristics of paraffin based fuel. *Dusty Plasmas in Applications. 4th International Conference on the Physics of Dusty and Burning Plasmas*, 2013, pp. 79-83.

12. Nedybaliuk, O. A., Chernyak, V. Ya., Martysh, E. V., Vergun, O. Yu., Orlovskaya, S. G. Plasma assisted combustion of paraffin mixtures. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2013, no. 1, pp. 219 - 221.

13. Fedirchuk, I. I., Nedybaliuk, O. A., Vergun, L. Yu., Orlovskaya, S. G., Shkoropado, M. S. Influence

of plasma on surface tension of hydrocarbons. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*, 2015, no. 1 (21), pp. 239 – 242.

14. Tret'jakov, P. K. Tupikin, A. V., Denisova, N. V., Ganeev, O. V., Zamashnikov, V. V., Kozorezov Ju. S. Laminarnoe propanovozdushnoe plamja v slabom jelektricheskom pole [Laminar propane-air flame in a weak electric field]. *Fizika gorenija i vzryva*, 2012, no. 2, pp. 9-14.

15. Ilchenko, E. P. Shevchuk, V. G. Role of charged soot grains in combustion of liquid hydrocarbon fuels in external electric field. *Ukr. J. Phys.* 2005, vol. 50, no. 2, pp. 144–150.

16. Yamashita, K., Imamura, O., Osaka, J., Nakaya, S., Tsue, M., Kono, M. Flame Characteristics of n-Octane Droplet under Electrical Field. *Journal of the Japan Society of Microgravity Application*, 2008, vol. 25, no. 3, pp. 381-386.

17. Imamura, O., Kubo, Y., Osaka, J. A study on single fuel droplets combustion in vertical direct current electric fields. *Proceedings of Combustion Institute*, 2005, vol. 30, no. 2, pp. 1949–1956.

Поступила в редакцию 12.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ АЛКАНОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

С. Г. Орловская, М. С. Шкороподо, О. Н. Зуй

Актуальность исследований процессов горения топлив на основе алканов обусловлена поиском новых эффективных, экологически чистых топлив для энергетики и аэрокосмической отрасли. Парафин (смесь алканов) является легкоплавким материалом, который может использоваться в качестве экологически чистого и высокоэнергетического топлива. Важной задачей является интенсификация процессов горения топлива в реакционном объеме. Одним из факторов интенсификации может быть электрическое поле. Целью данной работы является исследование закономерностей влияния электрического поля на процессы высокотемпературного теплообмена, плавления и горения капель жидкого топлива на основе алканов.

В работе разработана методика исследований кинетики плавления и горения капель жидкого топлива с использованием цифровой съемки объекта исследования и компьютерной обработки полученных изображений.

Проведено исследование влияния однородного электрического поля на горение частиц алканов в воздухе. Определена стадийность процессов теплообмена в процессе горения. Показано, что плавление частицы является основной составляющей частью периода индукции, времени за которое частица воспламеняется. Выявлено, что скорость плавления существенно уменьшается, если напряженность электрического поля превышает некоторое критическое значение. Установлено, что воздействие электрического поля на плавление более выражено при повышенных температурах газа. Доказано, что при плавлении частицы октадекана в электрическом поле происходит вращение нерасплавленной остаточной твердой фазы в расплаве, что является проявлением эффекта Квинке.

Исследована кинетика горения капель октадекана различных начальных диаметров. Доказано, что на определенном участке горения выполняется линейный закон изменения квадрата диаметра капли со временем (закон Срезневского). Проведено исследование влияния электрического поля на скорость горения частиц различного начального диаметра. Установлено, что под действием электрического поля происходит рост скорости горения капель алканов. В частности, для капель октадекана, скорость горения в постоянном электрическом поле возрастает на $10 \div 23\%$ в зависимости от начального диаметра капли. Найдены константы скорости горения капель октадекана.

Изучено влияние электрического поля на геометрические размеры пламени. Установлено, что под влиянием поля пламя становится асимметричным и смещается в сторону отрицательно заряженной пластины конденсатора. При этом уменьшается высота пламени и увеличивается его ширина. Эти явления связаны с действием "ионного ветра" в пламени и превращением энергии электрического поля в тепловую, вследствие чего фронт горения приближается к поверхности капли, увеличивая скорость ее испарения.

Ключевые слова: горение; плавление; топливо; двигатели; алканы; октадекан; скорость горения; электрическое поле; пламя.

COMBUSTION OF FUEL BASED ON ALKANES UNDER THE ACTION OF ELECTRIC FIELD

S. G. Orlovskaya, M. S. Shkoropado, O. N. Zui

The relevance of research on the combustion processes of alkane-based fuels is due to the search for new, efficient, environmentally friendly fuels for the energy and aerospace industries. Paraffin (a mixture of alkanes) is a low-melting material that can be used as an environmentally friendly and high-energy fuel. An important task is to intensify the processes of fuel combustion in the reaction volume. One of the factors of intensification is the electric field. The purpose of this work is to study the laws of the influence of the electric field on the processes of high-temperature heat and mass transfer, melting and burning drops of liquid fuel based on alkanes.

The paper developed a methodology for studying the kinetics of melting and burning of liquid fuel droplets using digital imaging of the object of study and computer processing of the images obtained.

Studies have been conducted on the effect of a uniform electric field on the combustion of alkane particles in the air. The stages of heat and mass transfer in the combustion process are determined. It is shown that the melting of a particle is the main component of the induction period — the time during which the particle ignites. It was revealed that the melting rate significantly decreases if the electric field strength exceeds a certain critical value. It is established that the effect of the electric field on melting is more pronounced at high gas temperatures. It was found that when an octadecane particle melts in an electric field, the unmelted residual solid phase rotates in the melt. It is proved that this is a special case of the Quincke effect.

The kinetics of combustion of octadecane drops of various initial diameters was studied. It has been proven that a linear law of variation of the square of the diameter of a droplet with time (Sreznevsky's law) is fulfilled in a certain area of burning. The influence of the electric field on the burning rate of particles of different initial diameters was studied. It has been established that under the action of an electric field an increase in the rate of burning of alkane droplets occurs. In particular, for octadecane drops, the burning rate in a constant electric field increases by 10 ÷ 23% depending on the initial diameter of the drop. The burning rate constants of octadecane are found.

The influence of the electric field on the geometric dimensions of the flame is studied. It is established that under the influence of the field the flame becomes asymmetrical and shifts towards the negatively charged plate of the capacitor. This reduces the height of the flame and increases its width. These phenomena are associated with the action of "ion wind" in the flame and the transformation of the energy of the electric field into heat. As a result of the action of these physical mechanisms, the combustion front approaches the surface of the drop, increasing its rate of evaporation.

Keywords: burning; melting; fuel; engines; alkanes; octadecane; burning rate; electric field; flame.

Орловська Світлана Георгіївна – канд. фіз.-мат. наук, доц. каф. загальної фізики і фізики теплоенергетичних та хімічних процесів Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна.

Шкоропато Максим Сергійович – канд. фіз.-мат. наук, науковий співробітник Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна.

Зуй Оксана Миколаївна – науковий співробітник Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна.

Orlovskaya Svetlana Geogievna – candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Department of General Physics and Physics of Heat-and-Power and Chemical Processes at the Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, e-mail: svetor25@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-1203-6978.

Shkoropado Maxim Sergejevich – candidate of physical and mathematical sciences, Researcher at the Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, e-mail: shkoropado@onu.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-1522-6809.

Zui Oksana Nikolaevna – Researcher at the Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, e-mail: oks.zuj@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-9520-4441.