

УДК 536.46

Орловська С. Г.

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

E-mail: [svetor25@gmail.com](mailto:svetor25@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1203-6978>

## Вивчення кінетики випаровування та горіння крапель парафінового палива

*В роботі досліджуються процеси випаровування і горіння крапель вищих алканів октадекана і докозана в повітрі. Актуальність цих досліджень обумовлена необхідністю пошуку ефективних палив для гібридних двигунів. Парафін є легкоплавким матеріалом, який може використовуватись в якості екологічно чистого і високоенергетичного палива. Метою даної роботи є дослідження кінетики випаровування та горіння крапель октадекану і докозану, встановлення механізмів цих процесів, визначення сталих випаровування та горіння, а також коефіцієнта дифузії пари вказаних алканів в повітрі. Дослідження проводилися за допомогою розробленого раніше методу визначення швидкостей випаровування та горіння крапель з реєстрацією процесів в реальному часі і комп'ютерною обробкою цифрових зображень. Для досліджень використовувались краплі діаметром від 1,3 мм до 2,05 мм. Випаровування чистих алканів вивчалось в температурному інтервалі 360–510 К. Горіння крапель ініціювалося від потужного іскрового розряду, займання відбувалось миттєво.*

*Отримано наступні результати. Для всіх досліджуваних крапель алканів підтвердився дифузійний механізм горіння, були визначені сталі швидкості горіння і висота полум'я в процесі горіння. Отримано, що, в залежності від початкового діаметру краплі, стала горіння докозану на 15–40% менша, ніж октадекану. Проаналізовано вплив природної конвекції на характеристики горіння.*

*Дослідження процесу випаровування крапель октадекану і докозану в повітряному середовищі при різних температурах також підтвердили лінійний характер зміни квадрата діаметру крапель з часом ( $d^2$ -закон). Отримано, що в температурному інтервалі  $T = 470 \div 510$  К швидкість випаровування октадекана в 5 разів більша, ніж докозану. По експериментально знайденим сталим швидкостям випаровування проведена оцінка коефіцієнту дифузії пари досліджуваних парафінів в повітрі. Отримано, що при однаковій температурі значення коефіцієнту дифузії пари октадекану на порядок вищий, ніж докозану.*

**Ключові слова:** парафіни, алкани, октадекан, докозан, краплі, випаровування, стала випаровування, коефіцієнт дифузії, горіння, стала горіння.

**Вступ.** Актуальність вивчення процесів випаровування і горіння окремих крапель рідкого палива, пов'язана з пошуком ефективних методів використання палив в енергоустановках та двигунах різних типів. Різноманітність рідких палив та умов їх використання забезпечують постійний попит на експериментальні дані, що характеризують процес займання та горіння палив, а саме температур займання і горіння, періоду індукції (затримка займання), швидкостей випаровування і горіння та інших характеристик. Аналіз літературних джерел показав, що саме вивченню цих характеристик при горінні крапель рідкого палива надається перевага [1-6]. Константа швидкості горіння (випаровування) є основною характеристикою, яка визначає ефективність перетворення палива і суттєво залежить

від типу палива, інтенсивності утворення сажі, умов згорання (температури, тиску) [1,4,5]. Затримка займання і тривалість горіння є функцією розміру крапель і також залежать від температурних та концентраційних умов [3]. В роботах [2,6] встановлено, що процес горіння крапель чистого палива характеризується певною стадійністю процесів тепломасообміну, що дозволяє краще моделювати та оптимізувати горіння, враховувати часові аспекти процесу. Запровадження новітніх цифрових технологій збору та обробки даних в режимі реального часу дозволяє отримати значно більше інформації та забезпечує якісно новий рівень діагностики процесів горіння палива [4,7].

З розробкою нових видів гібридних палив для ракетних двигунів зростає зацікавленість в дослідженнях процесів горіння крапель парафінів [5,7-11]. Відомо, що парафін являється висококалорійним екологічно чистим паливом (продукти згорання - вуглекислий газ та пари води). Як показали дослідження [9,10], гібридні двигуни на основі парафінів забезпечують достатньо високий питомий імпульс, що обумовлено високою лінійною швидкістю горіння паливного заряду. Проведені експерименти довели, що пальне на основі парафіну може забезпечити високі поверхневі витрати палива (його випаровування та винесення в зону горіння) в порівнянні з іншими гібридними паливами [8]. Автори роботи [11] вказують на суттєвий вплив початкового діаметру крапель алканів на механізм і стабільність горіння палива.

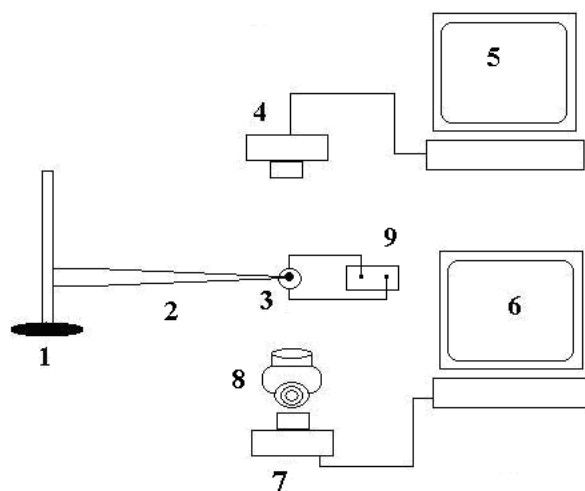
Таким чином, для розробки ефективних паливних композицій на основі парафінів для гібридних двигунів необхідні надійні дані по характеристикам випаровування, спалахування і горіння окремих алканів, їх сумішей та умов використання в енергетичних устроях.

**1. Постановка задачі та методика експерименту.** Метою даної роботи є дослідження кінетики випаровування та горіння крапель чистих алканів, визначення констант швидкостей випаровування та горіння, а також коефіцієнта дифузії пари досліджуваного палива в повітрі.

Горіння крапель парафінів (алканів) в нагрітому до високої температури газовому середовищі протікає стадійно [6]. На початковій стадії ці палива знаходяться в твердому стані, а займаються і горять рідкому стані. Проміжна стадія – це плавлення частинки парафіну, коли існує двофазна система. По мірі зростання температури розплавленої краплі збільшується швидкість випаровування рідини і нагрівання пари. Цей процес закінчується займанням краплі. Інтенсивне випаровування рідини спостерігається в процесі горіння краплі, що визначає сталу швидкості горіння.

В даній роботі проводяться дослідження кінетики випаровування та горіння крапель вищих алканів: октадекана і докозана. Хімічна формула октадекана  $C_{18}H_{38}$ , молекулярна маса  $M=254,5$  г/моль, густина твердої фази  $\rho=776$  кг/м<sup>3</sup>, температура плавлення  $T_{mel}=301,3$ К, температура кипіння  $T_{boil}=590,5$ К. Хімічна формула докозана  $C_{22}H_{46}$ , молекулярна маса  $M=310,6$  г/моль, густина твердої фази  $\rho=790$  кг/м<sup>3</sup>, температура плавлення  $T_{mel}=317,4$ К, температура кипіння  $T_{boil}=641,6$ К.

Для вивчення кінетики горіння та випаровування крапель насичених вуглеводів в повітрі був створений експериментальний стенд, схема якого представлена на рис.1. Дослідження були направлені на визначення швидкості випаровування і горіння по результатам реєстрації в режимі реального часу за допомогою цифрової камери діаметра краплі. Окрім того в режимі реального часу за допомогою іншої цифрової камери фіксувалось також полум'я цієї краплі з моменту займання і до моменту його зникнення. Обробка результатів експерименту включала знаходження часової залежності квадрату діаметру краплі (перевірка виконання горіння).



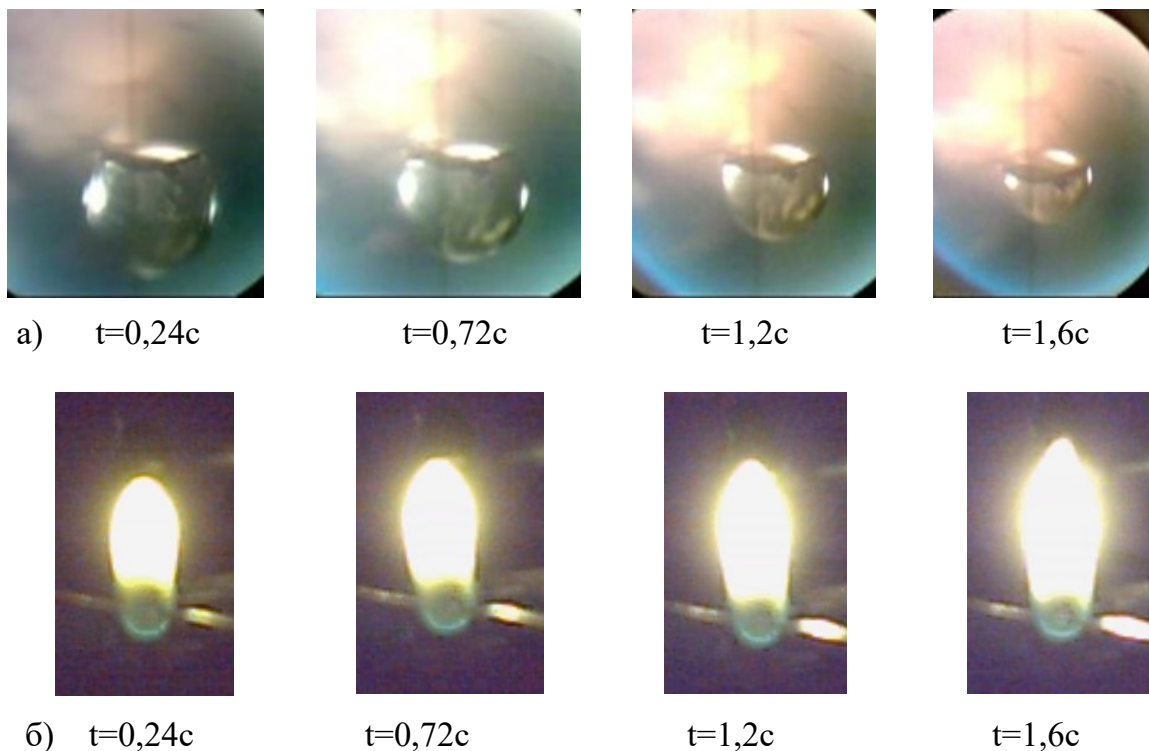
**Рис. 1.** Блок - схема експериментального стенду: 1 – штатив; 2 – підвісі; 3 – крапля парафіну; 4, 7 – цифрові камери; 5, 6 - персональні комп'ютери; 8 – мікроскоп; 9- котушка Румкорфа.

Дослід виконувався наступним чином. Крапля парафіну (3) розміщувалась на підвісі (2). Підпалювання краплі здійснювалось за допомогою іскрового розряду, що генерується індукційною котушкою Румкорфа (9). Полум'я палаючої краплі фіксувалось за допомогою Web – камери (4). Зміна діаметру краплі фіксувалось за допомогою Web - камери (7), яка була встановлена на мікроскоп (8) для збільшення зображення. Зображення від двох Web – камер надходили на персональні комп'ютери (5, 6). Отримані відео файли палаючої краплі та її полум'я, розкодовувались та оброблялися на комп'ютері, що дало змогу отримати для крапель різних початкових діаметрів часові залежність квадрату діаметру краплі та висоти полум'я в режимі реального часу. Обробку послідовних цифрових зображень крапель здійснювали із використанням пакету MatLab [6].

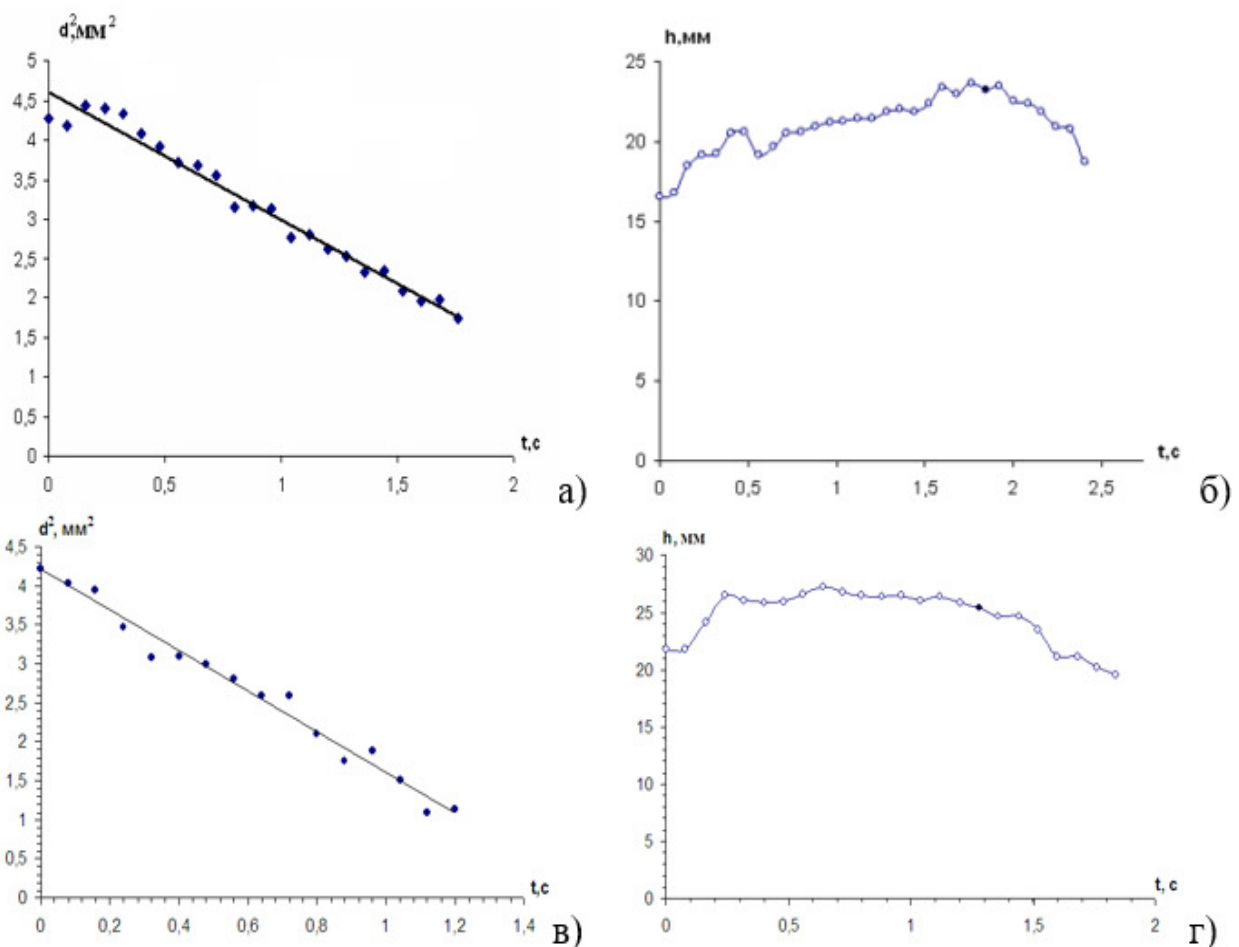
**2. Горіння крапель октадекана і докозана.** На рис. 2 представлено результати візуалізації процесу горіння однієї з крапель докозана в повітрі при температурі  $T_g = 293 \text{ K}$ : послідовні зображення палаючої краплі (рис. 2а) та її полум'я (рис. 2б) в одні і ті ж моменти часу.

Крапля знаходилась на петлевому підвісі (рис.2а). Займання краплі відбувалося миттєво. Знизу під краплею видно блакитну поверхню, що є нижньою межею полум'я краплі з оточуючим повітрям. Полум'я має конусоїдальну форму (рис.2б), що характерно для горіння в умовах природної конвекції. Візуально видно збільшення висоти полум'я в процесі згорання краплі.

На рис.3.надаються результати обробки цифрових зображень у вигляді часових залежностей квадрату діаметра краплі та висоти полум'я в процесі горіння крапель докозана і октадекана.



**Рис. 2.** Зображення палаючої в повітрі краплі докозану (а) з початковим діаметром 05 мм та її полум'я (б).



**Рис. 3.** Часові залежності квадрату діаметра крапель і висоти полум'я для докозану (а,б) і октадекану (в, г) з початковим діаметром  $d_b = 2,05$  мм.

На початковому етапі горіння для докозану зафіксовано збільшення діаметру краплі внаслідок її розширення (рис. 3а). Це відбувається за наступних причин. Після займання краплі внаслідок іскрового розряду температура поверхні краплі швидко підвищується, а температура всередині ще залишається нижчою. Відбувається нерівномірне термічне розширення рідини, що призводить до збільшення об'єму краплі. Окрім того відбувається накопичення пари під поверхнею (діють сили поверхневого натягу рідини), що призводить до збільшення внутрішнього тиску, і як наслідок, збільшенню діаметра краплі. Таким чином, на поверхні краплі спостерігається наступний баланс сил. Діють сили поверхневого натягу, які намагаються зменшити поверхню краплі. Але при нагріванні відбувається термічне розширення рідини та підвищення тиску пари в при поверхневому прошарку краплі, що збільшує її діаметр. Цей етап розширення краплі на початку горіння короткочасний і надалі горіння краплі переходить в квазістаціонарний режим, де її діаметр зменшується за законом:  $d^2 = d_b^2 - K_{bur}t$  ( $d^2$  – закон), тобто квадрат діаметра краплі лінійно зменшується з часом.

Для крапель октадекану перехідний період розширення краплі перед стабільним горінням протікає, зазвичай, за короткий проміжок часу в порівнянні з докозаном і спостерігався не в кожному досліді (рис.3в) внаслідок миттєвого підпалу краплі. Це закономірно, так як молекулярна маса рідини впливає на її фізичні властивості. Зі зростанням молекулярної маси рідини збільшуються температура кипіння, в'язкість рідини та зменшуються теплопровідність і тиск насиченої пари. Зростання динамічної в'язкості сповільнює рух рідини і пари, зменшення коефіцієнта теплопровідності продовжує етап вирівнювання температури, а при зменшенні тиску насиченої пари потрібно більше часу для накопичення достатнього тиску для збільшення об'єму краплі. Тому, зважаючи на більшу молекулярну масу докозана в порівнянні з октадеканом, для нього перехідний етап до режиму стабільного горіння довший.

Процес квазістаціонарного горіння крапель октадекана і докозана протікає в дифузійному режимі, згідно  $d^2$  – закону (рис.3а,в). За тангенсом кута нахилу залежності  $d^2 = f(t)$  було визначено сталу швидкість горіння  $K_{bur}$  для вказаних видів палива (табл.1). Отримано, що стала горіння крапель октадекану, більша ніж докозана. Із таблиці також випливає, що зі збільшенням початкового діаметру стала горіння зростає. Відхилення від ідеальної залежності  $d^2 = d_b^2 - K_{bur}t$  при більших краплях пояснюється не зміною кінетики випаровування, а підсиленням ролі природної конвекції. При більших діаметрах число Грасгофа, яке пропорційне  $d^3$ , істотно зростає. Підсилення природної конвекції підвищує швидкість відведення парів палива й забезпечує більші значення сталої горіння. Для важчих вуглеводнів (докозан) вплив природної конвекції проявляється сильніше, ніж для коротших молекул (октадекан), через більшу в'язкість рідкої фази та вищу температуру кипіння, що забезпечує тривалішу дію термоконвекційних потоків у навколишньому середовищі.

Аналіз часових залежностей висоти полум'я досліджуваних алканів вказує на те, що полум'я октадекану в процесі горіння більш стабільне (рис.3г) і його висота змінюється плавно по мірі вигорання краплі. Для докозана максимальна

**Таблиця 1.** Характеристики горіння крапель октадекана ( $C_{18}H_{38}$ ) і докозана ( $C_{22}H_{46}$ ) в повітрі

$d_b$ , мм	$K_{bur}$ , мм <sup>2</sup> /с		$h_{max}$ , мм		$h_{max}/d_b$	
	$C_{18}H_{38}$	$C_{22}H_{46}$	$C_{18}H_{38}$	$C_{22}H_{46}$	$C_{18}H_{38}$	$C_{22}H_{46}$
1.87	1.43	1.22	22.81	21.45	13.25	11.47
2.05	2.59	1.61	27.18	23.63	12.20	11.58

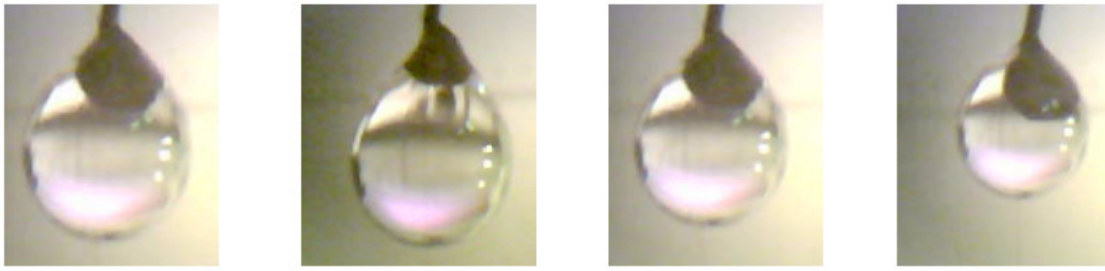
висота полум'я досягається наприкінці процесу горіння. Висота полум'я в роботі визначалася відносно межі „ полум'я – газ ” під краплею. Максимальні значення висоти полум'я надаються в табл.1, з якої випливає, що збільшення початкового діаметру призводить до зростання висоти полум'я, що охоплює краплю.

В табл.1. проаналізовано відношення максимальної висоти полум'я до початкового діаметру краплі. Для докозану отримано, що максимальна висота полум'я приблизно в 11,5 разів більша від початкового діаметру краплі докозану. Для октадекану цей параметр дещо вищий і показує значну залежність від початкового діаметра. Параметр  $h/d_b$  дає змогу оцінювати ефективність згоряння, аналізувати взаємодію полум'я з навколишнім середовищем [11] і залежить від початкового діаметру краплі, властивостей палива, умов тепломасообміну при згорянні. У нашому випадку згоряння відбувалося в повітрі за умов природньої конвекції та нормального тиску. Завдяки природній конвекції полум'я над краплею витягнуте, тому цей параметр сягає великих значень.

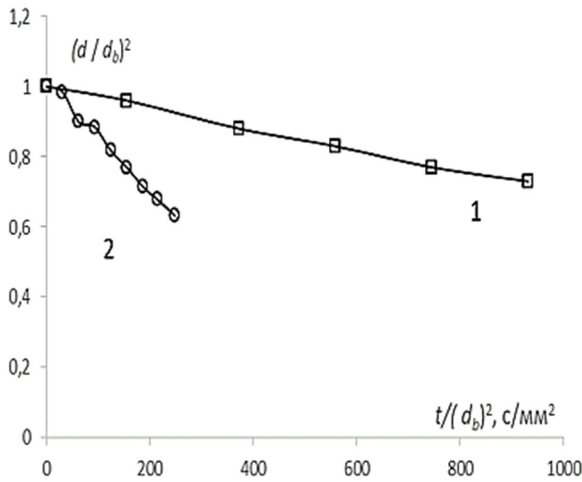
**3. Випаровування крапель парафінового палива.** Процес горіння крапель парафінів відзначається певною стадійністю [6], коли на початку процесу речовини перебувають в твердому стані, а займаються і горять в рідкому. Проміжним етапом є стадія плавлення, де речовина перебуває в двофазному стані. Якщо частинка парафіну перебуває під дією потужного теплового джерела, як у вище описаному випадку, стадії нагрівання і плавлення протікають миттєво і ми спостерігаємо тільки стадію займання і горіння. На цій стадії ключовим процесом є випаровування краплі, особливо на етапі квазістаціонарного горіння. В роботі проводились дослідження випаровування крапель докозану при температурах вище температури плавлення парафіну. Для цього частинка парафіну на підвісі вносились в нагріту до заданої температури піч і надалі відбувалася цифрова реєстрація її поведінки за допомогою Web-камери. Всі дані передавались на комп'ютер. В подальшому виконувалась обробка цифрових зображень, які дали змогу отримати залежність зміни квадрату діаметра краплі з часом.

На рис. 4 показані зображення краплі октадекану діаметром  $d_b = 1,39$ мм в процесі випаровування в різні моменти часу, а на рис.5 часові залежності відношення квадрату плинного діаметру до початкового для краплі октодекану і докозану при температурі повітря  $T=508$ К.

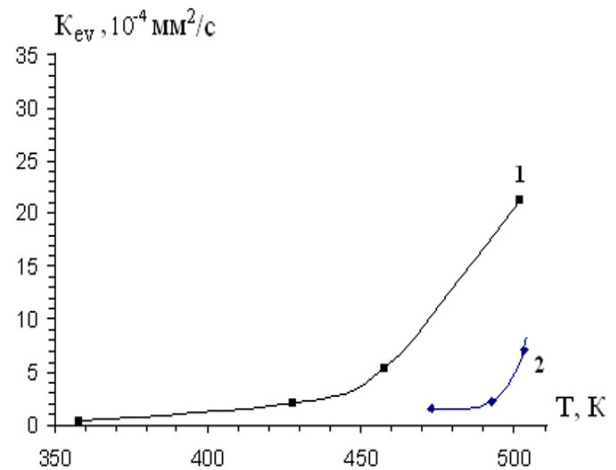
Із рис. 5 видно, що зміна квадрату діаметра крапель вказаних алканів з часом в процесі випаровування носить лінійний характер, тобто підпорядковується  $d^2$  – закону. Стала швидкості випаровування визначалась як тангенс кута нахилу залежності  $d^2 = f(t)$ . Для докозану температурний інтервал, в якому вивчався



**Рис. 4.** Зображення краплі октадекану  $d_b = 1.39$  мм в процесі випаровування в різні моменти часу при температурі повітря  $T = 508$ К.



**Рис. 5.** Залежність величини  $(d/d_b)^2$  для докозану (1) і октадекану (2) від часу  $t/(d_b)^2$  при температурі повітря  $T=508$  К при випаровуванні



**Рис.6.** Порівняння сталих випаровування октадекану (1) та докозана (2) в залежності від температури нагрітого повітря

процес випаровування зміщувався в сторону більших температур, оскільки при нижчих значеннях температури швидкість випаровування була занадто малою. Із порівняння залежностей константи швидкості випаровування октадекана і докозана (рис.6) впливає, що в інтервалі температур  $T=470 \div 510$  К стала швидкості випаровування октадекану приблизно в 5 разів більша, ніж докозанау.

Знаючи сталу випаровування, можна визначити коефіцієнт дифузії пари ( $D$ ) вуглеводню в повітрі при заданій температурі :

$$K_{ev} = \frac{4D}{\rho_l} C_{vs} \cdot Nu, \quad (1)$$

де  $\rho_l$  – густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ,  $C_{vs}$  – концентрація насиченої пари рідини біля поверхні краплі, визначається тиском насиченої пари і залежить від температури;  $Nu$  – дифузійне число Нуссельта. З урахуванням природної конвекції можна записати:

$$Nu = 2 + 0.54 Re^{1/2}, \quad Re = \sqrt{0.5 \cdot Gr}, \quad Gr = \frac{gd^3(T - T_g)}{273 \cdot \nu_g^2}, \quad (2)$$

де  $Re$ ,  $Gr$  – числа Рейнольдса та Грасгоффа,  $\nu_g$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря.

Використовуючи (1) і (2), можна оцінити коефіцієнт дифузії пари вуглеводневих палив, враховуючи те, що стала швидкості випаровування вимірювалась в умовах природньої конвекції. Внаслідок проведених розрахунків отримано наступні значення коефіцієнтів дифузії пари досліджуваних алканів при температурах близьких до 500 К: для октадекана  $D = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , для докозана  $D = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

**Висновки.** Внаслідок проведених експериментів підтверджено, що кінетика випаровування крапель вищих алканів октадекану і докозану в інтервалі температур 360-520 К описується  $d^2$  – законом, тобто лінійною залежністю квадрату діаметра краплі від часу. Отримані сталі випаровування для октадекана і докозана вказують на те, що в інтервалі температур  $T = 470 \div 510 \text{ К}$  швидкість випаровування октадекана приблизно в 5 разів більша, ніж докозану. При нижчих температурах випаровування докозану протікає дуже повільно. Проведено оцінки коефіцієнтів дифузії пари октадекана і докозана в повітрі при різних температурах. Отримано, що за температури 500К, коефіцієнт дифузії октадекана ( $D = 2.2 \text{ м}^2/\text{с}$ ) практично на порядок більший ніж докозана.

Проведено дослідження кінетики горіння крапель октадекана і докозана, займання яких відбувалося від іскрового розряду. Доведено, що після стабілізаційного етапу, процес горіння протікав в квазістаціонарному режимі згідно лінійного закону зміни квадрату діаметра краплі з часом. Визначені сталі горіння вказаних алканів. Отримано, що, в залежності від початкового діаметру краплі, стала швидкості горіння докозану на 15-40 % менша, ніж октадекану. Обґрунтовано вплив природньої конвекції на характеристики горіння крапель різного діаметру.

### Література:

1. *Keith Bartle E.M. Fitzpatrick J.M. Jones M.L. Kuback* The combustion of droplets of liquid fuels and biomass particles//Fuel . – 2011, Vol. 90, Iss. 3. – P. 1113-1119.
2. *Ahmad Fuad Abdul Rasid, Yang Zhang.* Combustion Phases of Evaporating Neat Fuel Droplet// Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2022. – Vol. 96, Iss.1. – P. 60-69.
3. *Shah Shahood Alam.* Burning Behavior of Liquid Fuel Droplets//International Journal of Engineering Research and Applications. –2015. – Vol.5, Iss. 6. – P. 43-54.
4. *Zheng L., Wei C., Zhang Y., Khandelwal B.* Experimental investigation on droplet evaporation characteristics during combustion of future and current aviation fuels with range of properties//The Aeronautical Journal. – 2023. – 127. – P. 1952–1967.
5. *Céline Morin, Christian Chauveau, Philippe Dagaut, Iskender Gökalp, Michel Cathonnet.* Vaporization and oxidation of liquid fuel droplets at high temperature and high pressure: application to n-alkanes and vegetable oil methyl esters // Combustion Science and Technology. – 2004. – Vol. 176, Iss. 4. – P. 499-529.
6. *Орловська С.Г. , Шкороподо М.С. , Карімова Ф. Ф., Односталко А.О.* Вивчення високотемпературного тепломасообміну і кінетики фазових перетворень при горінні вищих алканів в повітрі// Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 347-350.

7. Orlovskaya S.G., Kalinchak V.V., Shkoropado M.S., Karimova F.F., Chernyak V.Ya, Vergun O.Y. Investigation of paraffin droplets burning // Ukr. J. Phys. – 2014. – Vol. 59, Iss. 4. – P. 396-400.
8. Kirsty Veale, Sarp Adali, Jean Pitot, Michael Brooks. A review of the performance and structural considerations of paraffin wax hybrid rocket fuels with additives // Acta Astronautica. – 2017. – Vol. 141. – P. 196-208.
9. 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, Iss.1. – P.8. –12.
10. Kevin Lohner, Jonny Dyer, Eric Doran, and Zachary Dunn Fuel Regression Rate Characterization Using a Laboratory Scale Nitrous Oxide Hybrid Propulsion System //AIAA. – 2006. – 4671. – P.1-16.
11. Yu Cheng Liu, Yuhao Xu, Michael C. Hicks Comprehensive study of initial diameter effects and other observations on convection-free droplet combustion in the standard atmosphere for n-heptane, n-octane, and n-decane // Combustion and Flame. – 2016. – Vol. 171. – P.27-41.

### **Orlovska S. G.**

## **Study of the kinetics of evaporation and combustion of paraffin fuel droplets**

### SUMMARY

*The work investigates the processes of evaporation and combustion of droplets of higher alkanes octadecane and docosane in air. The relevance of these studies is due to the need to find effective fuels for hybrid engines. Paraffin is a low-melting material that can be used as an environmentally friendly and high-energy fuel. The purpose of this work is to study the kinetics of evaporation and combustion of droplets of octadecane and docosane, establish the mechanisms of these processes, determine the evaporation and combustion constants, as well as the vapor diffusion coefficient of the specified alkanes in air. The studies were carried out using a previously developed method for determining the rates of evaporation and combustion of droplets with real-time registration of processes and computer processing of digital images. Droplets with a diameter of 1.3 mm to 2.05 mm were used for the studies. The evaporation of pure alkanes was studied in the temperature range of 360–520 K. The combustion of droplets was initiated by a powerful spark discharge, and ignition occurred instantly.*

*The following results were obtained. For all the studied alkane droplets, the diffusion mechanism of combustion was confirmed, the burning rate constants and the flame height during the combustion process were determined. It was found that, depending on the initial diameter of the drop, the burning rate of docosane was 15–40% lower than that of octadecane. The influence of natural convection on the combustion characteristics was analyzed.*

*Studies of the evaporation process of octadecane and docosane droplets in the air at different temperatures also confirmed the linear nature of the change in the square of the drop diameter with time ( $d^2$ -law). It was found that in the temperature range  $T = 470 \div 510$  K, the evaporation rate of octadecane is 5 times higher than that of docosane. The experimentally found evaporation rate constants were used to estimate the vapor diffusion coefficient of the studied paraffins in air. It was found that at the same temperature the vapor diffusion coefficient of octadecane is an order of magnitude higher than that of docosane.*

**Keywords:** paraffins, alkanes, octadecane, docosane, drops, evaporation, evaporation constant, diffusion coefficient, combustion, combustion constant.