

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАЛИВА НА ОСНОВІ ПАРАФІНІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ ДВИГУНІВ

Предметом дослідження є процеси випаровування й горіння крапель парафіну в газоподібному середовищі, що містить окиснювач (повітря). Парафін є легкоплавким матеріалом, який може використовуватись у якості екологічно чистого й високоенергетичного палива для гібридних ракетних двигунів. У якості **об'єкта** дослідження використовувався алкан - докозан (чистий), насичений вуглеводень, хімічна формула якого $C_{22}H_{46}$. Для розробок ефективних паливних композицій на основі парафінів (суміші алканів) для гібридних двигунів необхідні дані щодо характеристик випаровування, спалахування й горіння окремих алканів та умов їх використання. **Метою** роботи є дослідження кінетики випаровування та горіння крапель докозану, визначення констант швидкостей випаровування та горіння, а також коефіцієнта дифузії пари докозану в повітрі. **Основні завдання:** а) розробка методів визначення швидкості випаровування та горіння крапель з реєстрацією процесів у реальному часі й комп'ютерною обробкою цифрових зображень; б) встановлення фізичних механізмів випаровування та горіння крапель докозану, вимірювання сталих швидкостей випаровування та горіння. Отримано наступні **результати**. Вивчалось горіння крапель докозану діаметром (d) до 2 мм, ініційоване потужним іскровим розрядом, спалахування відбувалось миттєво, досліджувались зміна діаметру крапель і висота полум'я в процесі горіння. Для всіх досліджуваних крапель підтвердився дифузійний механізм горіння, була визначена стала швидкості горіння й відношення висоти полум'я до початкового діаметра крапель, що є показником ефективності горіння. Процес випаровування крапель докозану в повітряному середовищі при різних температурах також підтвердив дифузійний механізм випаровування (d^2 – закон). По експериментально знайденим сталим швидкості випаровування крапель проведена оцінка коефіцієнту дифузії пари докозану в повітрі. Проведені експериментальні дослідження процесів випаровування та горіння крапель докозану в повітрі дали змогу зробити наступні **висновки**. Доведено, що кінетика випаровування та горіння крапель докозану в дослідженому інтервалі діаметрів (1-2 мм) і температур 473-523 К описується d^2 - законом. Визначена стала горіння крапель докозану за нормальних умов, яка в середньому дорівнює $K_{\text{гор}} = 1,5 \text{ м}^2/\text{с}$. Знайдено сталу випаровування крапель докозану в інтервалі температур повітряного середовища 473-523 К. Унаслідок використання отриманих експериментальних даних щодо сталої випаровування розраховано коефіцієнт дифузії пари докозану в повітрі, значення якого дорівнює $D = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ в інтервалі температур 473-503 К.

Ключові слова: парафіни; докозан; краплі; випаровування; горіння; стала випаровування; коефіцієнт дифузії; стала горіння.

Вступ

Горіння крапель рідкого палива являється предметом багатьох експериментальних і теоретичних досліджень [1-7] в зв'язку широким використанням дисперсних рідинних систем в якості палива для авіаційно-космічної техніки. Актуальність всебічного вивчення процесів, які супроводжують горіння окремих крапель рідкого палива, пов'язана з використанням отриманих результатів для розрахунку та проектування енергоустановок та двигунів різних типів. Різноманітність рідких палив та умов їх використання забезпечують постійний попит на експериментальні дані, що характеризують процес спалахування та горіння палив, а саме температур спалахування і горіння, періоду індукції (часу спалаху-

вання), сталих випаровування і горіння та інших характеристик. Це стимулює розвиток нових методів діагностики процесів високотемпературного тепло-масообміну та горіння палив. 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 [8].

З розробкою нових видів гібридних палив для ракетних двигунів зростає зацікавленість в дослідженнях процесів горіння крапель парафінів [9-11]. 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. Встановлено що, розплавлений прошарок поверхні заряду диспергується потоком газоподібного окиснювача, потім краплі розплаву попадають в камеру згоряння і згорають в окиснювачі. В зону горіння разом з рідкими краплинами можуть потрапляти і частинки, що мають деяку кількість твердої нерозплавленої фази [11]. Утворення такої двокомпонентної системи створює додаткові навантаження на нижній шар парафінового заряду, що потребує подальшої модернізації камери згоряння двигуна. В роботі [12] обговорюються існуючі методи вимірювання швидкості регресії для палив на основі парафіну та результати, отримані з різними добавками. Наведені дані щодо швидкостей регресії вказують на сильний зв'язок між покращенням швидкості регресії в парафіні з додаванням металізованих добавок.

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 методи дослідження

Характеристики горіння розпиленого палива можна дослідити на базовому рівні за допомогою дослідження горіння краплі палива. Метою даної роботи є дослідження кінетики випаровування та горіння крапель парафінового палива, визначення констант швидкостей випаровування та горіння, а також коефіцієнта дифузії пари досліджуваного парафіну в повітрі.

Для досягнення мети роботи було визначено головні завдання: а) розробка методів визначення швидкості випаровування та горіння крапель з використанням цифрової камери і комп'ютерної обробки зображень; б) вимірювання швидкості випаровування та горіння крапель парафіну, перевірка виконання закону зміни квадрату діаметра крапель (d^2 - закон).

Парафіни відзначаються тим, що при організації процесу горіння вони використовуються в твердому стані. Спалахують і горять дані речовини в рідкому стані. В даній роботі проводяться дослідження кінетики випаровування та горіння крапель докозана. Хімічна формула докозана $C_{22}H_{46}$, густина

твердої фази $\rho=778 \text{ кг/м}^3$, температура плавлення $T_{\text{mel}}=317,4\text{K}$, температура кипіння $T_{\text{boil}}=641,6\text{K}$.

Для вивчення кінетики горіння та випаровування крапель насичених вуглеводів в повітрі був створений експериментальний стенд, схема якого представлена на рис. 1.

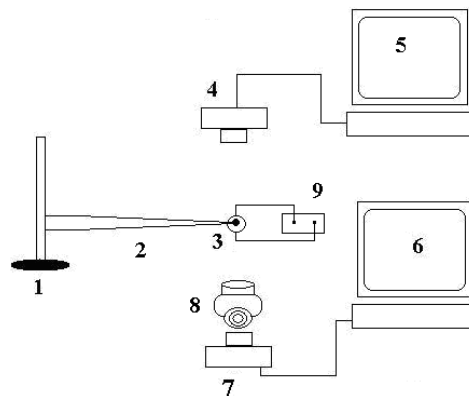


Рис. 1. Блок - схема експериментального стенду: 1 – штатив; 2 – підвіси; 3 – крапля; 4, 7 – цифрові камери; 5, 6 – персональні комп'ютери; 8 – мікроскоп; 9 – котушка Румкорфа

Крапля парафіну (3) навішувалася на підвіс (2). Підпалювання краплі здійснювалося за допомогою іскрового розряду, що генерується індукційною котушкою Румкорфа (9). Полум'я палаючої краплі фіксувалося за допомогою Web – камери (4). Зміна діаметру краплі фіксувалося за допомогою Web – камери (7), яка була встановлена на мікроскоп (8) зі збільшенням у шістнадцять разів. Зображення від двох Web – камер надходило на персональні комп'ютери (5, 6). Після відео - зйомки отримані відео файли палаючої краплі та її полум'я, розкодувалися та оброблялися на комп'ютері, що дало змогу отримати для крапель всіх початкових діаметрів часові залежності квадрату діаметру та висоти полум'я в режимі реального часу. Обробку послідовних цифрових зображень крапель здійснювали із використанням інструментарію Image Processing ToolBox пакету MatLab [8].

2. Результати досліджень та обговорення

2.1. Горіння краплі

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. 2,а), її полум'я (рис. 2,б) в одні і ті ж моменти часу, а результат обробки цифрових зображень - часові залежності квадрату діаметра краплі та висоти полум'я надаються на рис. 3.

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

Із рис. 3а випливає, що залежність квадрату діаметра палаючої краплі від часу можна вважати лінійною, тобто підтверджується закон $d^2 = d_b^2 - K_{\text{гор}} t$. Це дає змогу визначити сталу швидкості горіння $K_{\text{гор}}$ за тангенсом кута нахилу залежності $d^2 = f(t)$.

Аналіз часової залежності висоти полум'я вказує на те, що максимальна висота досягається наприкінці процесу горіння. Висота полум'я визначалася відносно межі „полум'я – газ” під краплею. На рис. 3б темна крапка позначає максимальну висоту полум'я.

В таблиці 1 надаються, визначені для різних початкових діаметрів, характеристики горіння: стала швидкості горіння ($K_{\text{гор}}$), максимальна висота полум'я (h_{max}) та відношення максимальної висоти полум'я до початкового діаметру краплі.

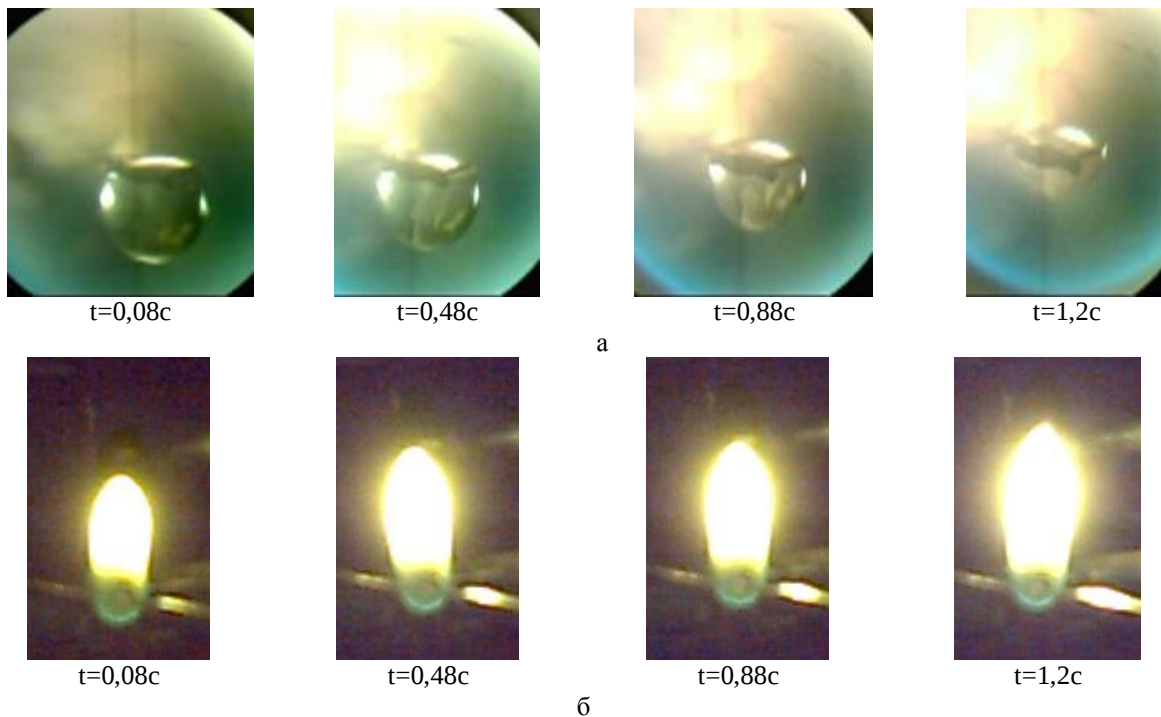


Рис. 2. Зображення палаючої в повітрі краплі докозана (а) з початковим діаметром $d_b = 1,87$ мм та її полум'я (б) в процесі горіння в одні і ті ж моменти часу t

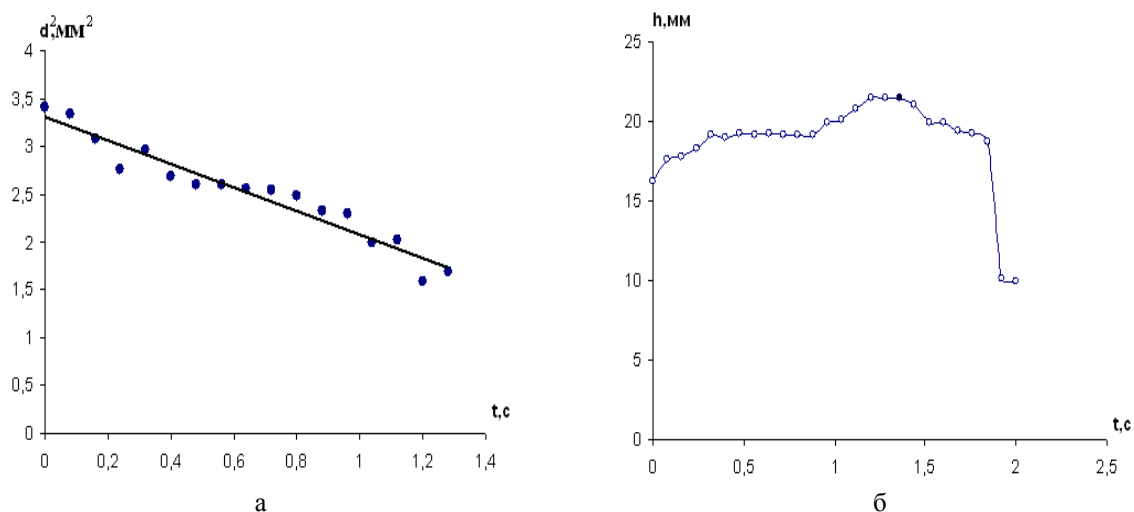


Рис. 3. Часові залежності квадрату діаметра краплі докозана (а) та висоти її полум'я (б), $d_b = 1,87$ мм

Таблиця 1

Характеристики горіння крапель докзана в повітрі

d_b , мм	K_{bur} , мм ² /с	h_{max} , мм	h_{max}/d_b
1,87	1,22	21,45	11,47
1,99	1,44	23,09	11,6
2,04	1,61	23,63	11,58

З таблиці видно, що стала горіння крапель докзана за даних умов протікання процесу і для діаметрів, близьких до 2 мм, в середньому дорівнює $K_{bur} = 1,5$ мм²/с. Збільшення початкового діаметру краплі призводить до збільшення висоти полум'я, що охоплює краплю докзану.

В роботі проаналізовано відношення максимальної висоти полум'я до початкового діаметру краплі (див. табл.1). Отримано, що максимальна висота полум'я приблизно в 11,5 разів більша від початкового діаметру краплі докзану. Висота полум'я визначалася відносно межі „полум'я - газ” під краплею. Параметр h/d_b дає змогу оцінювати ефективність згоряння, аналізувати взаємодію полум'я з навколишнім середовищем [13] і залежить від початкового діаметру краплі, властивостей палива, умов тепломасообміну при згорянні. У нашому випадку згоряння відбувалося в повітрі за умов природної конвекції та нормального тиску. Завдяки природній конвекції полум'я над краплею витягнуте, тому цей параметр сягає великих значень.

2.2. Випаровування краплі

Проведені дослідження з краплями вищих алканів, горіння яких ініціювалось за допомогою потужного теплового джерела, показали, що весь процес перетворення краплі палива складається з послідовних стадій високотемпературного тепломасообміну [14]: а) нагрівання твердої фази, б) плавлення, в) випаровування рідкої фази та нагрівання пари до температури, при якій крапля спалахує, і г) безпосередньо процес горіння з інтенсивним випаровуванням краплі та різким зменшенням її діаметра. На всіх стадіях, окрім першої, відбувається

випаровування краплі з різною інтенсивністю. В даній роботі проводились дослідження випаровування крапель докзану при температурах вище температури плавлення. Для цього частинка докзану на підвісі вносила в нагріту до певної температури піч, де відбувалася цифрова реєстрація її поведінки за допомогою Web – камери через мікроскоп з 24 – х кратним збільшенням. Всі дані передавалися на комп'ютер. В подальшому виконувалась обробка цифрових зображень, які дали змогу отримати залежність зміни квадрату діаметра краплі з часом.

На рис. 4 надаються зображення краплі докзану діаметром $d_b = 1,27$ мм в процесі випаровування в різні моменти часу, а на рис.5 залежності квадрату діаметру краплі від часу при різних значеннях температури.

Із рис. 5 видно, що зміна квадрату діаметра з часом носить лінійний характер, тобто виконується d^2 – закон. Стала швидкості випаровування визначалась по тангенсу кута нахилу залежності $d^2 = f(t)$.

Знання сталої швидкості випаровування дає змогу визначити коефіцієнт дифузії пари (D) докзану в повітрі при заданій температурі:

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

де ρ_l - густина рідини, кг/м³, C_{v_s} - концентрація насиченої пари рідини біля поверхні краплі, визначається тиском насиченої пари і залежить від температури; Nu – дифузійне число Нуссельта, $Nu=2$ у випадку відсутності конвекції.

З урахуванням природної конвекції можна записати:

$$Nu = 2 + 0.54Re^{1/2}, \quad Re = \sqrt{0.5 \cdot Gr},$$

$$Gr = \frac{gd^3(T - T_g)}{273 \cdot \nu_g^2}, \quad (2)$$

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

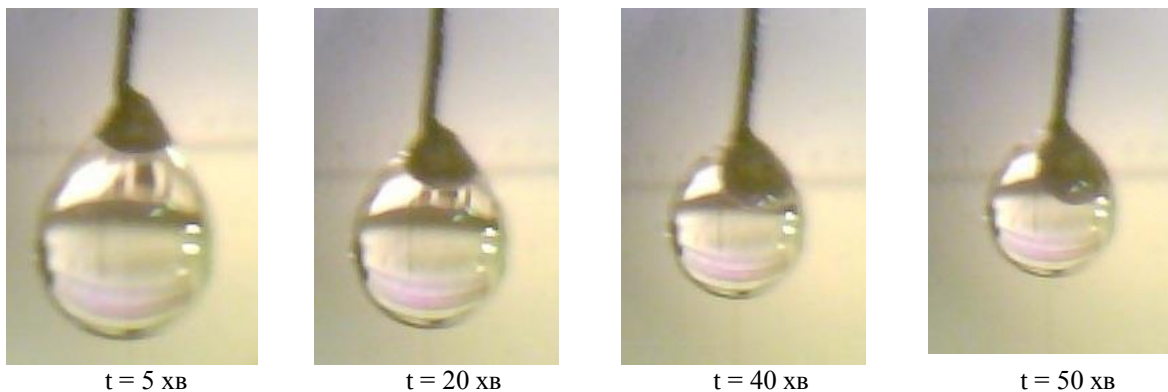


Рис. 4. Зображення процесу випаровування краплі докзану $d_b = 1,27$ мм в різні моменти часу. $T_g = 503$ К.

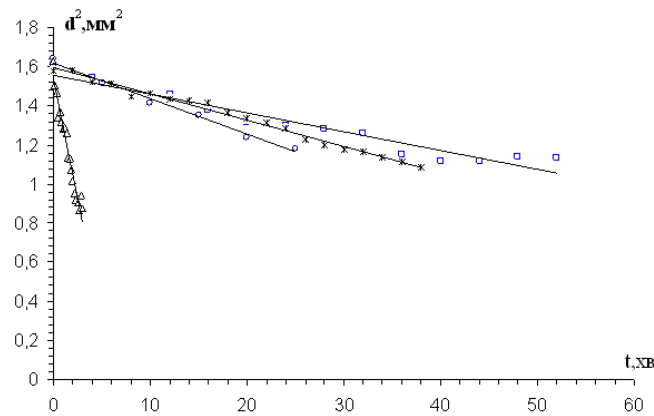


Рис. 5. Залежність квадрату діаметра краплі докозану $d_b = 1,27$ мм від часу при різних температурах повітря: $\square$ – $T_g = 473$ К; $*$ – $T_g = 493$ К; $\circ$ – $T_g = 503$ К; Δ – $T_g = 523$ К.

Використовуючи (1) можна визначити коефіцієнт дифузії пари докозану D , враховуючи те, що стала швидкості випаровування вимірювалась в умовах природної конвекції. Формули (2) дозволяють оцінити швидкість природної конвекції. В нашому випадку це наближено дорівнює:

$$V_c = \frac{Re \cdot v_g}{d} \approx 12,2 \text{ мм/с.}$$

Отримані результати надаються в таблиці 2 для початкового діаметру краплі докозану $d_b = 1,27$ мм і різних температур оточуючого повітря T_g .

Таблиця 2

Характеристики випаровування крапель докозану $d_b = 1,27$ мм

№ краплі	T_g , К	K_{ev} , 10^{-4} мм ² /с	D , 10^{-7} м ² /с
1	473	1,58	2,07
2	493	2,23	1,4
3	503	3,03	1,36
4	523	40,56	8,07

Стала швидкості випаровування в інтервалі температур повітря 473 – 503 К збільшується монотонно, а для температури повітря 523 К спостерігається різке збільшення швидкості випаровування (відповідно і коефіцієнта дифузії). Це може бути пов'язано з тим, що вказана температура газу близька до температури спалахування для даного початкового діаметра краплі і процеси тепло-і масообміну значно прискорюються.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження процесів випаровування і горіння крапель докозану в повітрі дали змогу зробити наступні висновки. Доведено, що кінетика випаровування і горіння крапель докозану в дослідженому інтервалі діаметрів (1-2 мм) і температурах 473-523 К описується d^2 -

законом (законом Срезневського), тобто має місце дифузійний механізм протікання цих процесів. Визначена стала горіння крапель докозану за нормальних умов, яка в середньому дорівнює $K_{bur} = 1,5$ мм²/с. Знайдена стала випаровування крапель докозану в інтервалі температур повітря 473-523 К. Встановлено, що поблизу критичних умов спалахування, які визначаються взаємозв'язком діаметра краплі, температури газу і концентрації окиснювача, стала випаровування зростає майже в 10 разів, внаслідок прискорення процесів тепло-масообміну. Оцінено значення коефіцієнта дифузії пари докозану в інтервалі температур 473-503 К. В середньому отримано значення $D = 1,6 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Даних щодо характеристик горіння і випаровування крапель докозану в науковій літературі бракує.

Конфлікт інтересів

Авторка заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені у цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутних даних.

Використання штучного інтелекту

Авторка підтверджує, що не використовувала методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Авторка прочитала та погодилася з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Li, Sh. Analysis of two interactive burning droplets with different temperatures [Text] / Shangpeng Li, & Huangwei Zhang // *Journal of Fluid Mechanics*. - 2024. - Vol. 986. - 34 p. doi: 10.1017/jfm.2024.265.
2. Alam, Sh. Burning Behavior of Liquid Fuel Droplets [Text] / S. S. Alam // *International Journal of Engineering Research and Applications*. - 2015. - Vol.5, iss. 6. - P. 43-54.
3. The combustion of droplets of liquid fuels and biomass particles [Text] / K. Bartle, E. M. Fitzpatrick, J. M. Jones, & M. L. Kubacki // *Fuel*. - 2011. - Vol. 90, iss. 3. - P. 1113-1119. doi: 10.1016/j.fuel.2010.10.054.
4. Interfering of liquid fuel droplets - A burning approach [Text] / A. Kumar, A. Kumar, V. Goyat, & et al. // *Materials today : proceedings*. - 2022. - Vol. 56, part 1. - P. 278-281. doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.133.
5. Experimental investigation on droplet evaporation characteristics during combustion of future and current aviation fuels with range of properties [Text] / L. Zheng, C. Wei, Y. Zhang, & B. Khandelwal // *The Aeronautical Journal*. - 2023/ - Vol. 127, iss. 1317. - P. 1952-1967. doi: 10.1017/aer.2023.33.
6. Vaporization and oxidation of liquid fuel droplets at high temperature and high pressure: application to n-alkanes and vegetable oil methyl esters [Text] / C. Morin, C. Chauveau, P. Dagaut, & et al. // *Combustion Science and Technology*. - 2004. - Vol. 176, iss. 4. - P. 499-529. doi: 10.1080/00102200490276719.
7. Rasid, Ah. Combustion phases of evaporating neat fuel droplet [Text] / A. F. A. Rasid, & Y. Zhang // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. - 2022. - Vol. 96, iss.1. - P. 60-69. doi: 10.37934/arfm.96.1.6069.
8. Investigation of paraffin droplets burning [Text] / S. G. Orlovskaya, V. V. Kalinchak, M. S. Shkoropado, & et al. // *Ukr. J. Phys.* - 2014. - Vol. 59, iss. 4. - P. 396-400. doi: 10.15407/ujpe59.04.0396.
9. Fuel Regression Rate Characterization Using a Laboratory Scale Nitrous Oxide Hybrid Propulsion System [Text] / K. Lohner, J. Dyer, E. Doran, & Z. Dunn // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 09 July 2006 - 12 July 2006, Sacramento, California. - AIAA. - 2006. - Vol. 4671. - P. 1-16. doi: 10.2514/6.2006-4671.
10. Experimental investigation of a paraffin based hybrid rocket [Text] / L. M. C. Santos, L. A. R. Almeida, A. M. Fraga, & C. A. G. Veras // *Thermal Engineering*. - 2006. - Vol.5, iss.1. - P. 8-12. doi: 10.5380/reterm.v5i1.61658.
11. Конформаційні зміни в структурі твердого парафінового палива на початковому етапі його спалювання [Текст] / Л. Ю. Вергун, В. Я. Черняк, О. А. Недибалюк, & та ін. // *Космічна наука і технологія*. - 2013. - Т. 19, № 5. - С. 63-69.
12. A review of the performance and structural considerations of paraffin wax hybrid rocket fuels with additives [Text] / K. Veale, S. Adali, J. Pitot, & M.

Brooks // *Acta Astronautica*. - 2017. - Vol. 141. - P. 196-208. doi: 10.1016/j.actastro.2017.10.012.

13. Liu, Y. Ch. 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 [Text] / Y. C. Liu, Y. Xu, & M. C. Hicks // *Combustion and Flame*. - 2016. - Vol. 171. - P. 27-41. doi: 10.1016/j.combustflame.2016.05.013.

14. Орловська, С. Г. Горіння палива на основі алканів під дією електричного поля [Текст] / С. Г. Орловська, М. С. Шкороподо, & О. М. Зуй // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. - 2019. - № 8(160). - С. 39-48. doi: 10.32620/akt.2019.8.06.

References

1. Li, Sh., Zhang, H. Analysis of two interactive burning droplets with different temperatures. *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, vol. 986. 34 p. doi: 10.1017/jfm.2024.265.
2. Alam, Sh. Sh. Burning Behavior of Liquid Fuel Droplets. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2015, vol. 5, no. 6, pp. 43-54.
3. Bartle, K., Fitzpatrick, E. M., Jones, J. M., & Kubacki, M. L. The combustion of droplets of liquid fuels and biomass particles. *Fuel*, 2011, vol. 90, no 3, pp. 1113-1119. doi: 10.1016/j.fuel.2010.10.054.
4. Kumar, Ash., Kumar, Aj., Goyat, V., Sharma, J., Nain, J., & Jain, V. Interfering of liquid fuel droplets - A burning approach. *Materials today: proceedings*, 2022, vol. 56, part 1, pp. 278-281. doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.133.
5. 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, vol.127, no. 1317, pp. 1952-1967. doi: 10.1017/aer.2023.33.
6. Morin, C., Chauveau, Ch., Dagaut, Ph., Gökalp, I., & Cathonnet, M. 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, no. 4, pp. 499-529. doi: 10.1080/00102200490276719.
7. Rasid, Ah., & Zhang, Ya. Combustion Phases of Evaporating Neat Fuel Droplet. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2022, vol. 96, no.1, pp. 60-69. doi: 10.37934/arfm.96.1.6069.
8. 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, no 4, pp. 396-400. doi: 10.15407/ujpe59.04.0396.
9. Lohner, K., Dyer, J., Doran, E., & Dunn, Z. Fuel Regression Rate Characterization Using a Laboratory Scale Nitrous Oxide Hybrid Propulsion System.

42nd AIAA/ASME/SAE /ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 09-12 July 2006, Sacramento, California, 2006, article no. 4671, pp. 1-16. doi: 10.2514/6.2006-4671.

10. 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. doi: 10.5380/reterm.v5i1.61658.

11. Vergun, L. Yu., Chernyak, V. Ya., Nedybalyuk, O. A., Orlov's'ka, S. G., Karimova, F. F., & Shkoropado, M. S. Konformacijni zminy v strukturi tverdogo parafinovogo paly'va na pochatkovomu etapi jogo spalyuvannya. [Conformational changes in the structure of solid paraffin fuel at the initial stage of its combustion]. *Kosmichna nauka i texnologiya*, 2013, vol. 19, no. 5, pp. 63–69. (In Ukrainian).

12. Veale, K., Adali, S., Pitot, J., & Brooks M. A review of the performance and structural considerations of paraffin wax hybrid rocket fuels with additives. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 141, pp. 196-208. doi: 10.1016/j.actaastro.2017.10.012.

13. Liu, Yu Ch., Xu, Yu., & Hicks, M. C. 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, pp. 27-41. doi: 10.1016/j.combustfiame.2016.05.013.

14. Orlov's'ka, S. G., Shkoropado, M. S., & Zuj, O. M. Gorinnya paly'va na osnovi alkaniv pid diyeyu elektrychnogo polya [Combustion of alkane-based fuels under the influence of an electric field]. *Aviacijno-kosmichna texnika i texnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2019, no. 8 (160), pp. 39-48. doi: 10.32620/akt.2019.8.06. (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 10.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

FEATURES OF PARAFFIN-BASED FUEL CONVERSION FOR HYBRID ENGINES

Svitlana Orlov's'ka

The subject of this study is the evaporation and combustion processes of paraffin droplets in a gaseous medium containing an oxidant (air). Paraffin is a low-melting material that can be used as an environmentally friendly and high-energy fuel for hybrid rocket engines. The alkane – docosane (pure), a saturated hydrocarbon with the chemical formula $C_{22}H_{46}$, was used as the **object of the study**. To develop effective fuel compositions based on paraffins (alkane mixtures) for hybrid engines, data on the characteristics of evaporation, ignition, and combustion of individual alkanes and their use conditions are necessary. **The purpose** of this work is to study the kinetics of docosane droplet evaporation and combustion, determine the evaporation and combustion rate constants, and determine the diffusion coefficient of docosane vapor in air. **The main tasks**: a) development of methods for determining the rate of evaporation and combustion of docosane droplets with real-time registration of processes and computer processing of digital images; b) establishment of physical mechanisms of evaporation and burning of docosane droplets, measurement of constant evaporation and burning rates. The following **results** were obtained. The burning of docosane droplets with a diameter (d) of up to 2 mm from a powerful spark discharge was studied. The change in drop diameter and flame height during the burning process was studied. The diffusion mechanism of burning was confirmed for all the drops studied, and the constant burning rate and the ratio of the flame height to the initial drop diameter were determined, which is an indicator of burning efficiency. The evaporation process of docosane droplets in air at different temperatures also confirmed the diffusion mechanism of evaporation (d^2 - law). The diffusion coefficient of docosane vapor in air was estimated based on the experimentally found constants of drop evaporation rates. The experimental studies of the evaporation and burning processes of docosane droplets in air allowed us to draw the following **conclusions**. The kinetics of evaporation and combustion of docosane droplets in the investigated diameter range (1-2 mm) and temperatures 473-523 K is described by the d^2 - law. The burning constant of docosane droplets under normal conditions was determined, which on average is equal to $K_{bur} = 1.5 \text{ mm}^2/\text{s}$. The evaporation constant of docosane droplets in the air temperature range 473-523 K was determined. The diffusion coefficient of docosane vapor in air was calculated using the obtained experimental data on the constant evaporation, the value of which is equal to $D = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ in the temperature range of 473-503K.

Keywords: paraffins; docosane; drops; evaporation; combustion; evaporation constant; diffusion coefficient; combustion constant.

Орловська Світлана Георгіївна – канд. фіз. мат. наук, доц. каф. фізики та астрономії, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна.

Svitlana Orlov's'ka – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Associate Professor at the Department of Physics and Astronomy, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine. e-mail: svetor25@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1203-6978.