

С.Г. Орловська, М.С. Шкоропато, Ф. Ф. Карімова, А.О. Односталко

Вивчення високотемпературного тепломасообміну і кінетики фазових перетворень при горінні вищих алканів в повітрі

*Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова,
Одеса, Україна, вул. Дворянська, 2, 65082, (048) 723-62-27, svetor@rambler.ru*

Проведено дослідження високотемпературного тепломасообміну, процесів плавлення та випаровування при горінні частинок парафіну (октадекана) в повітрі. Встановлена послідовність стадій тепломасообміну при горінні парафіну, розкрито їх фізико-хімічні механізми. Знайдено сталі швидкості горіння, геометричні характеристики полум'я для крапель октадекану різного початкового діаметру.

Ключові слова: тепломасообмін, кінетика фазових перетворень, алкани, парафін, октадекан, константа швидкості горіння.

Стаття поступила до редакції 23.01.2015; прийнята до друку 15.03.2015.

Вступ

Останнім часом, в зв'язку з пошуком ефективних і екологічно чистих палив, зросла цікавість до вивчення процесів горіння парафінів (суміш вищих алканів). Ці дослідження являються актуальними для розробок нових гібридних ракетних двигунів, так як традиційні ракетні пальні є надзвичайно токсичними і вибухонебезпечними. Як відомо, парафін являється висококалорійним екологічно чистим паливом, так як продуктами його згорання є вуглекислий газ та водяна пара [1]. Проведені експерименти показали, що гібридні двигуни на парафіні забезпечують достатньо високий питомий імпульс [2] (specific impulse), що обумовлено високою лінійною швидкістю горіння паливного заряду (fuel regression rate). Встановлено, що розплавлений прошарок поверхні заряду диспергується потоком газоподібного окислювача, потім краплі розплаву згорають в окислювачі. Для моделювання процесів горіння необхідні детальні дослідження закономірностей тепломасообміну, кінетики фазових і хімічних перетворень парафінового палива в газоподібному окислювачі та надійні експериментальні дані щодо характеристик цих процесів.

Дана робота присвячена дослідженню тепломасообміну та кінетики фазових переходів при спалахуванні і горінні крапель парафіну (октадекана) в повітрі, визначенню характеристик їх горіння. Детальне вивчення процесів горіння окремої краплі

являється необхідним для кращого розуміння горіння сукупності (ансамблів) крапель, яке реалізується в камерах згорання.

I. Експериментальні дослідження високотемпературного тепломасообміну і кінетики фазових переходів

Для дослідження високотемпературного тепломасообміну і кінетики горіння крапель парафіну було створено експериментальний стенд [3, 4], схема якого представлена на рис.1.

Частинка парафіну (1) розміщувалась на петлевому підвісі (2) на відстані 95 мм від джерела нагрівання - розжареної спіралі (3). Температура повітря на місці розташування частинки становила 320°C. Стан частинки (краплі) та зміна її діаметру фіксувалися за допомогою Web - камери (4), яка була встановлена на мікроскоп (5). Згодом крапля спалахувала і її полум'я фіксувалося за допомогою Web - камери (6). Зображення від двох Web - камер надходило на персональні комп'ютери (7, 8), де відбувалася їх обробка в системі MatLab 7.0 [5].

Розглянемо результати експериментальних досліджень процесу горіння частинок октадекану. На рис.2 представлена залежність ефективного діаметра частинки, а потім краплі октадекану від часу в процесі її нагрівання та горіння. На залежності $d(t)$

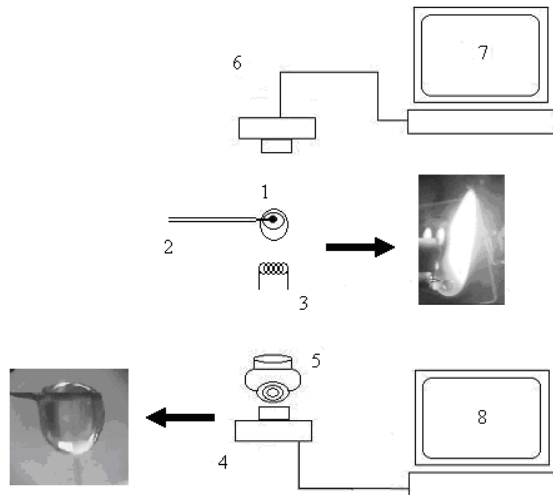


Рис. 1. Блок - схема експериментального стану.

чітко простежуються 4 стадії високотемпературного тепломасообміну зразка з газоподібним середовищем: 1 стадія – нагрівання октадекану в твердому стані, 2 стадія – плавлення зразка, 3 стадія – прогрів рідкої фази (краплі), 4 стадія – горіння краплі. Тривалість стадій, що передують процесу горіння, визначається інтенсивністю фізичних процесів, які протікають на поверхні і в об'ємі твердої і рідкої фаз, а на стадії горіння – інтенсивністю процесів тепломасообміну та хімічної кінетики.

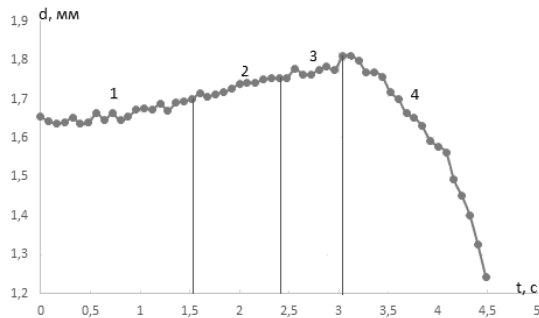


Рис. 2. Залежність $d(t)$ для краплі октадекану з початковим діаметром $d_b = 1,65$ мкм.

На рис.3 представлено зображення зразка на окремих стадіях тепломасообміну: на початку стадії нагрівання в твердому стані (рис.3а), на стадії плавлення (рис.3б, 3в), на стадії нагрівання рідкої фази (рис.3г) та на стадії горіння (рис.3д, 3е). На стадії плавлення видно появу рідкої фази, обсяг якої з часом збільшується. На фоні розплаву простежується залишкова тверда фаза, яка має сферичну форму. З представлених рисунків видно, що діаметр розплавленої краплі більше діаметра твердої частинки внаслідок збільшення відстані між молекулами рідкої фази.

В результаті обробки цифрових зображень було визначено об'єм рідкої фази (розплаву) в процесі плавлення. Зростання об'єму розплаву V_l в

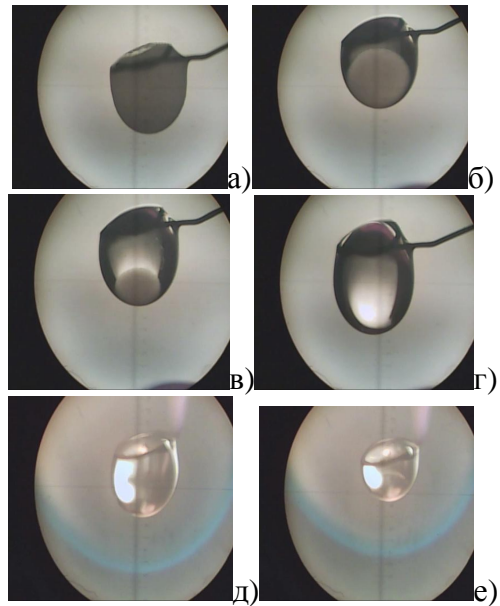


Рис. 3. Зображення зразка парафіну на різних стадіях тепломасообміну з газом. а) нагрівання твердої фази; б), в) плавлення частинки; г) нагрівання краплі; д), е) горіння краплі.

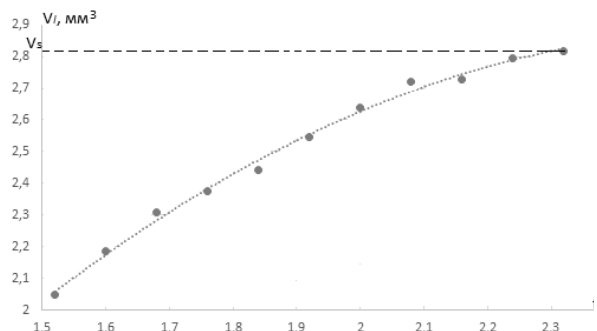


Рис. 4. Залежність об'єму розплаву від часу плавлення частинки октадекану.

залежності від часу надається на рис. 4. Час плавлення визначається моментом досягнення об'ємом розплаву значення V_s , що відповідає об'єму краплі. Із залежності $V_l(t)$ видно, що в процесі плавлення швидкість утворення рідкої фази зменшується, що обумовлено втратами тепла на її випаровування.

На третій стадії відбувається подальше нагрівання рідкої фази від джерела нагрівання і її випаровування. Із рис.3г видно, що крапля подовжується, приймаючи еліпсоїдальну форму. Ефективний діаметр краплі зростає (рис. 2, стадія 3). Це відбувається внаслідок зменшення коефіцієнта поверхневого натягу рідини з підвищенням температури краплі.

Енергія з газової фази передається в краплю до тих пір, доки вся крапля не досягне температури кипіння (температура кипіння октадекану $317,4$ °C). Паливо випаровується в газову фазу і утворюється горюча суміш, яка нагрівається до температури, при якій починається хімічна взаємодія пари з киснем. Цей процес завершується спалахуванням горючої

суміші поблизу поверхні краплі. Таким чином, період індукції (проміжок часу до моменту спалахування) визначається тривалістю послідовних

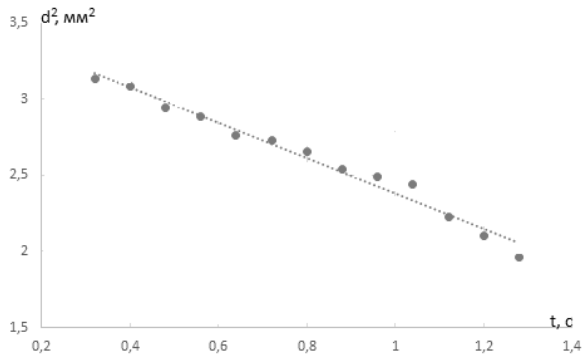


Рис. 5. Часова залежність квадрату діаметра краплі октадекану на стадії горіння.

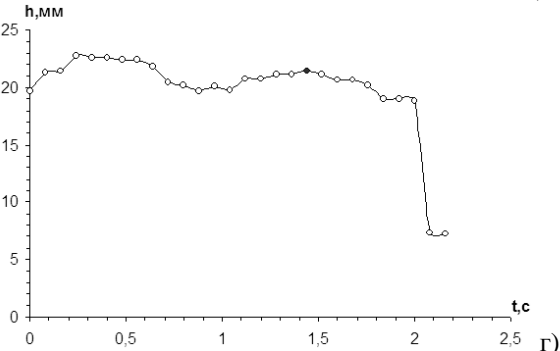
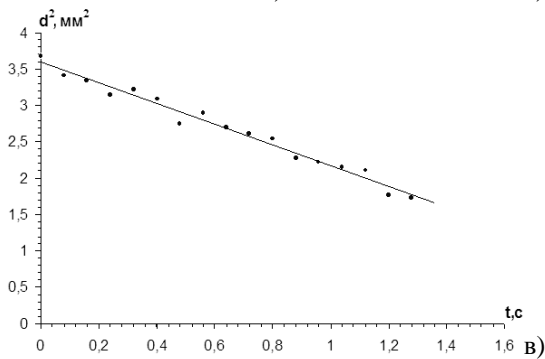
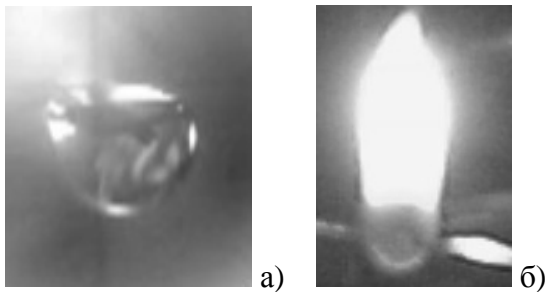


Рис. 6. Цифрові зображення палаючої в повітрі краплі октадекану (а) з початковим діаметром $d_b = 1,87$ мм, її полум'я (б); часові залежності квадрату діаметра краплі (в), висоти полум'я (г).

стадій тепломасообміну: нагрівання твердої фази, плавлення, нагрівання та випаровування рідкої фази. За даних температурних умов період індукції частинки з початковим діаметром $d_b = 1,65$ мкм складає 2,96 с.

На четвертій стадії відбувається горіння краплі (рис.3д, 3е). Знизу видно межу полум'я, що охоплює краплю. Суміш горить як ламінарне сферично симетричне полум'я заздалегідь не перемішаної суміші. Крапля інтенсивно випаровується, її діаметр швидко зменшується (рис.2). Обробка даних на стадії горіння в координатах $d^2 = f(t)$ (рис.5) приводить до лінійної залежності, що вказує на дифузійний режим горіння [6].

За тангенсом кута нахилу цієї залежності отримуємо сталу швидкості горіння, що становить $K_{bur} = 1,3$ мм²/с.

Нами було проведено дослідження процесу горіння крапель октадекану різних початкових діаметрів. Одночасно зі зйомкою краплі в режимі реального часу проводилась реєстрація полум'я в процесі горіння [7]. Обробкою цифрових зображень отримано розміри полум'я в різні моменти часу. На рис.6 представлені зображення палаючої краплі і її полум'я на першій секунді горіння та часові залежності квадрату діаметра краплі і максимальної висоти полум'я в процесі горіння. Висота полум'я визначалась відносно межі «полум'я-газ» під краплею. Отримано, що висота полум'я в процесі горіння знаходиться в межах 19 мм - 22 мм. Горіння краплі відбувається за лінійним законом: $d^2(t) = d_b^2 - K_{bur}t$, де K_{bur} — стала горіння (рис.6в).

В таблиці наведені дані щодо характеристик горіння крапель октадекану різних початкових діаметрів.

Таблиця

Характеристики горіння крапель октадекану

d_b , мм	K_{bur} , мм ² /с	K_{bur}/d_b^2 , с ⁻¹	h_{max} , мм	h_{max}/d_b
2,08	2,0	0,46	25,5	12,25
1,87	1,43	0,41	22,8	12,19
1,65	1,3	0,47	20,2	12,24

З таблиці видно що при збільшенні початкового діаметру краплі збільшується швидкість горіння, але відношення K_{bur}/d_b^2 відрізняються мало. Середнє значення K_{bur}/d_b^2 складає 0,45 с⁻¹. Висота полум'я, що охоплює краплю, зменшується з ростом початкового діаметру та відношення h_{max}/d_b практично однакове: максимальна висота полум'я в 12,2 рази більша від початкового діаметру краплі октадекану.

Висновки

Таким чином встановлено, що горінню краплі парафіну передують стадії нагрівання твердої фази, плавлення, нагрівання та випаровування рідкої фази. Визначена тривалість стадій тепломасообміну та період індукції (час до моменту спалахування). Доказано, що при горінні крапель октадекану квадрат діаметру краплі зменшується з часом по лінійному закону. Для крапель різних діаметрів визначені сталі швидкості горіння та висота полум'я в процесі горіння. Доказано, що висота полум'я в 12,2 рази більша від початкового діаметру краплі.

Орловська С.Г. – к.ф.-м.н., доцент, завідувач науково-дослідної лабораторії;
Шкоропато М.С. – к.ф.-м.н., науковий співробітник науково-дослідної лабораторії;

Карімова Ф. Ф. – науковий співробітник науково-дослідної лабораторії
Односталко А.О. – магістр.

- [1] M. Karabeyoglu, D. Altman, and B. J. Cantwell. *J. of Propulsion and Power* 18, No.3, 610 (2002).
- [2] 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*, № 1, Volume 5, P.8-12 (July 2006).
- [3] С.Г. Орловская, М.С. Шкоропато, Ф.Ф. Каримова, А.С. Шкоропато, В.Д. Кисса, Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. научных статей. 1(12). – Киев: «Триакон», С.430-433 (2013).
- [4] S.G. Orlovskaya, V.V.Kalinchak, M.S. Shkoropado, F.F. Karimova, V.Ya. Chernyak, O.Y. Vergun, *Ukrainian Journal of Physics*, 59(4), 396 (2014).
- [5] V.V. Kalinchak, F.F. Karimova, S.G. Orlovskaya, M.S. Shkoropado, 16th International Conference Digital Signal Processing and its Applications. Contributed papers, Moscow, 449 (2014).
- [6] С. Кумагаи, Горение. Пер. с японского (Химия, М. 1980).
- [7] S.G. Orlovskaya, F.F. Karimova, M.S. Shkoropado, V.V. Kalinchak, *Физика аэродисперсных систем*, (51), 54 (2014).

S.G. Orlovskaya, M.S. Shkoropado, F.F. Karimova, A.O. Odnostalko

Research of High-Temperature Heat and Mass Transfer and Kinetics of Phase Transformations during combustion higher alkanes in the air

*Odessa I.I. Mechnikov National University
Odessa, Ukraine, Dvoryanskaya str. 2, 65082, (048) 723-62-27, svetor@rambler.ru*

The paper presents a study of high-temperature heat and mass transfer and combustion kinetics of octadecane particle in room temperature air taking in consideration fuel heating, melting and evaporation. The consecutive stages of droplet combustion are described. Burning rate constants and flame heights are determined for droplets with different initial diameters

Keywords: heat and mass transfer, kinetics of phase transitions, alkanes, paraffin, Octadecane, burning rate.