

УДК 538.95, 536.46

О. Ю. Актан¹, Ю. Ф. Забашта¹, В. Я. Черняк¹, С. Г. Орловська²,
О. С. Свєчнікова¹, Ф. Ф. Карімова², М. С. Шкоропадо²

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

² Одеський національний університет імені І. І. Мечнікова

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ ДВИГУНА НА ПАРАФІНОВОМУ ПАЛИВІ ДЛЯ ГІБРИДНИХ РАКЕТ. КІНЕТИКА ПЛАВЛЕННЯ І ГОРІННЯ

Досліджуються кінетика плавлення та горіння парафінових систем, для яких експериментально визначено характеристики поширення фронту плавлення та горіння. На основі отриманих даних пропонується механізм розпилення парафінових палив, у основу якого покладено уявлення щодо втрати стійкості розплавленого шару.

ВСТУП

На даний час однією з актуальних проблем в аерокосмічній галузі є створення малошкідливих видів палив. Як відомо [14], з 2001 р. почались інтенсивні дослідження парафінів з метою їхнього використання як твердого ракетного палива. Головними перевагами цих палив вважається висока калорійність, екологічність, безпека зберігання, висока хімічна інертність при впливові зовнішніх факторів та ін. Перше дослідження двигуна на парафіноподібному паливі було проведено співробітниками Стендфордського університету.

Для створення ефективної конструкції двигуна на парафіновому паливі необхідна інформація щодо повного компонентного складу та оптимального співвідношення мас палива та окислювача, геометричних параметрів паливного блоку, системи регулювання подачі окислювача, системи запалювання, термодинамічних та енергетичних характеристик, швидкості горіння палива в широкому діапазоні параметрів, що впливають на цей процес, експлуатаційних

властивостей палив і т. п. Для отримання таких даних необхідним є проведення систематичних фізичних досліджень.

Як відомо, основними складовими частинами твердопаливного ракетного двигуна є запальвальний пристрій, паливний заряд, корпус, сопло [7, 9]. Спрощену схему такого двигуна приведено на рис. 1. Заряд палива може бути вкладений до камери згоряння у вигляді однієї або декількох шашок.

Також відомо, що остаточному використанню парафінів у двигунах широкого класу літальних апаратів перешкоджає проблема невисокої швидкості регресії екологічного парафінового палива (fuel regression rate) [10]. Зазначена величина являє собою часову залежність внутрішнього радіуса циліндричного паливного заряду, який змінюється в результаті вигорання палива та характеризує ефективність його спалювання [12]. Процесу горіння передують численні процеси, які впливають на величину швидкості регресії: плавлення палива, розпилення палива, рух утворених краплин у потоці окислювача та ін. Дослідження перерахованих процесів разом з горінням є складною фізичною проблемою. Серед небагатьох робіт відоме дослідження [16], де збільшення регресії палива пов'язувалось з реологічними властивостями

© О. Ю. АКТАН, Ю. Ф. ЗАБАШТА, В. Я. ЧЕРНЯК,
С. Г. ОРЛОВСЬКА, О. С. СВЄЧНІКОВА,
Ф. Ф. КАРИМОВА, М. С. ШКОРОПАДО, 2011

розплавленого шару та робота [17], присвячена емпіричному підбору ефективних компонентів парафінової суміші шляхом введення різноманітних нанододатків.

В нашій роботі, на відміну від наявних емпіричних досліджень, робиться спроба розв'язати поставлену проблему на основі фізичних моделей.

ДЕФОРМАЦІЯ ПАРАФІНОПОДІБНОГО ПАЛИВА У ПРОЦЕСІ ПЛАВЛЕННЯ

Під час роботи ракетного двигуна на його експлуатаційні параметри суттєво впливають деформаційні властивості палива. Однією з характеристик цих параметрів є модуль зсуву. Величину модуля зсуву будемо розраховувати за методикою, запатентованою авторами та викладеною в роботах [1, 2, 10]. Експериментальна реалізація цієї методики полягає в тому, що досліджувана речовина розташовується в кюветі. Саме ця обставина дозволяє розрахувати модуль зсуву як різницю жорсткостей між заповненою парафіном та порожньою кюветами.

На рис. 2 наведено часову залежність модуля зсуву докозану $C_{22}H_{46}$ — типового представника ряду n -парафінів (виробник — Новочеркаський завод синтетичних продуктів; марка докозану (ч — чистий)) при температурі $48^\circ C$. Оскільки температура плавлення докозану становить $45^\circ C$, то залежність $G(t)$ описує зміну модуля зсуву у процесі плавлення. Ту обставину, що в зазначених умовах протікає процес плавлення, підтверджує рис. 3, на якому зображено зріз кювети з парафіном, де темний шар поблизу поверхні кювети відповідає розплавленому парафіну.

Після 28 хв візуальною перевіркою було встановлено, що на цей час досліджуваний матеріал повністю розплавився. Таким чином, значення

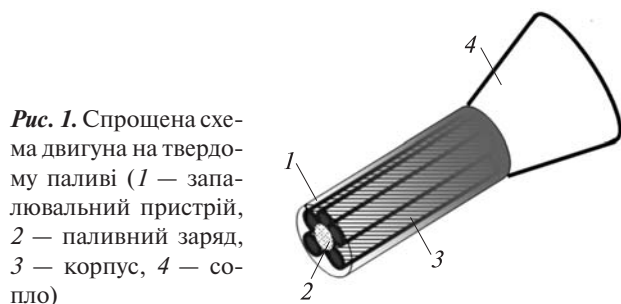


Рис. 1. Спрощена схема двигуна на твердому паливі (1 — запалювальний пристрій, 2 — паливний заряд, 3 — корпус, 4 — сопло)

модуля зсуву G , що відповідає 28-й хвилині, є модулем зсуву розплаву. Як видно з рис. 2, $G \approx 10^7$ Па.

ШВИДКІСТЬ ФРОНТУ ПЛАВЛЕННЯ У ПАРАФІНОПОДІБНОМУ ПАЛИВІ

Для вимірювання швидкості фронту плавлення використано вище наведений експериментальний метод визначення модуля зсуву. Як видно з рис. 3, до поверхні кювети прилягає шар розплавленого парафіну, у центрі ж кювети розташовується циліндр радіусом r_1 , що відповідає твердому парафіну. Використовуючи розв'язок задачі теорії пружності про крутіння складеного стрижня [13] з модулями пружності твердого парафіну G_K (у початковий момент часу) та розплавленого парафіну G_M (в кінцевий момент вимірювання) отримуємо для величини r_1

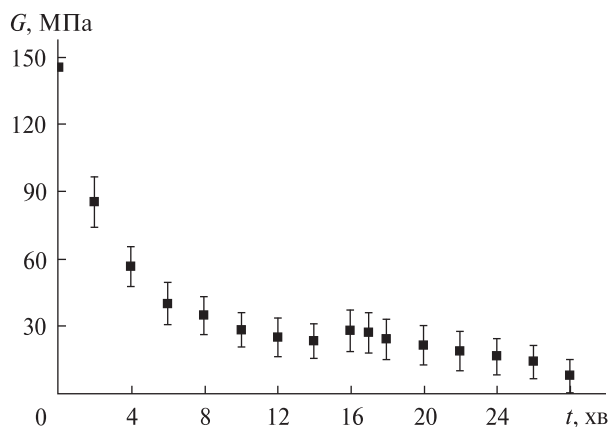


Рис. 2. Часова залежність модуля зсуву $G(t)$ докозану $C_{22}H_{46}$ при температурі $48^\circ C$

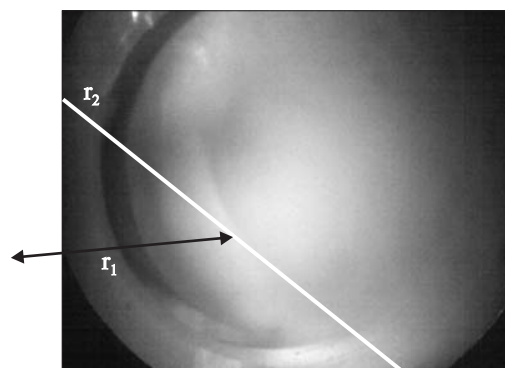


Рис. 3. Зріз кювети з парафіном в процесі плавлення

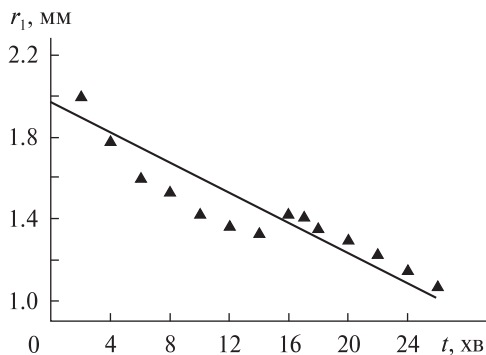


Рис. 4. Кінетика зміни радіусу шару розплавленого парафіну

формулу

$$r_1 = r_2 \left(\frac{G - G_M}{G_K - G_M} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

де r_2 — внутрішній радіус кювети. Розраховані по цій формулі значення r_1 представлено на рис. 4. Приймаючи, що швидкість фронту плавлення є сталою, що відповідає прямій лінії на рис. 4, отримуємо значення швидкості плавлення, рівне 0.036 м/с.

ШВИДКІСТЬ ФРОНТУ ГОРІННЯ ПАРАФІНОВОГО ПАЛИВА

Для вивчення кінетики горіння парафіну та визначення константи швидкості горіння [8] було створено експериментальний стенд, зображений

на рис. 5. Крапля парафіну 1 навішувалася на підвіс. На рис. 6 у збільшеному вигляді зображено краплину парафіну після закінчення процесу плавлення — на початку процесу спалахування. Температура полум'я палаючої краплі фіксувалася за допомогою двох хромель-алюмелевих термопар 2, 3. Нижня термопара знаходилася на відстані 7 мм від краплини, а верхня — на відстані 15 мм. Сигнал від термопар поступав на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 4, а потім на USB-шину персонального комп'ютера 5. Отримана інформація виводилася на екран монітора, а також зберігалась у пам'яті комп'ютера. Висота полум'я фіксувалася за допомогою другої цифрової відеокамери 6. Зміна діаметра краплі фіксувалася за допомогою цифрової відеокамери 8, встановленої на мікроскопі 7 зі збільшенням у шістнадцять разів. Підпалювання краплі здійснювалося за допомогою стаціонарного полум'я 9 з температурою 900 К. Отримані за допомогою цифрових відеокамер відеофайли зміни діаметра та висоти полум'я розкодовувались та оброблювались на комп'ютері в пакеті MatLab 7.0.

На рис. 7 приведено часову залежність зміни квадрата діаметра парафінової краплини з початковим діаметром $d_b = 1.41$ мм у процесі горіння. Отримані експериментальні дані підтверджують лінійну залежність діаметра палаючої краплі із часом (закон Срезневського [5]):

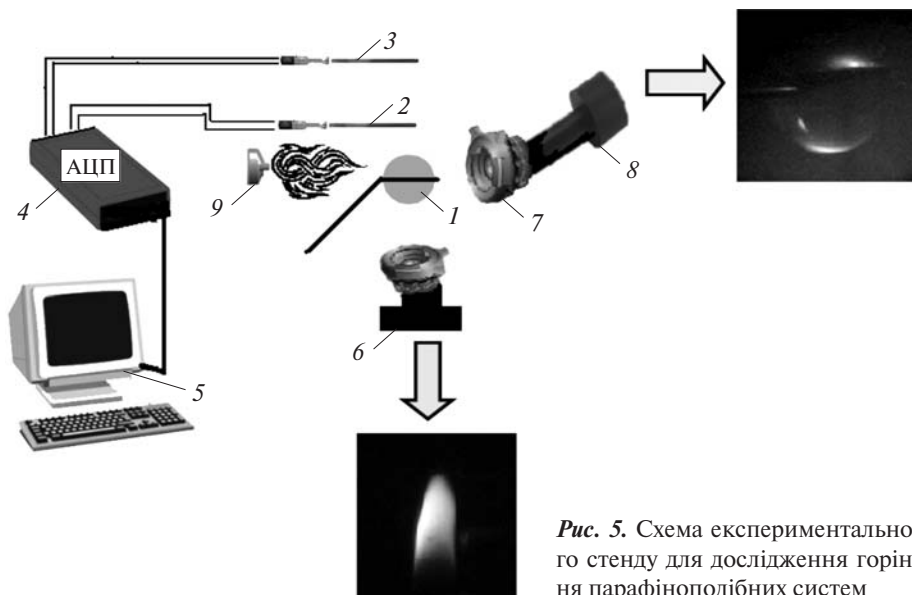


Рис. 5. Схема експериментального стенду для дослідження горіння парафіноподібних систем

$$d^2 = k_{bur} t, \quad (2)$$

де k_{bur} — константа швидкості горіння. За даними рис. 7 константа швидкості горіння склала $k_{bur} = 0.4206 \text{ мм}^2/\text{с}$. Також встановлено, що температура полум'я краплі може досягати $T = 800 \text{ К}$, а максимальна висота полум'я складає 16 мм.

МЕХАНІЗМ РОЗПИЛЕННЯ ПАРАФІНОВОГО ПАЛИВА

Важливу роль при спалюванні парафінового палива відіграє процес розпилення, що в значній мірі визначає величину швидкості регресії. У роботі [14] запропоновано такий механізм розпилення (рис. 8): на поверхні твердого палива 2 виникає шар розплаву 3. В результаті взаємодії з потоком окислювача 5 на поверхні шару виникають капілярні хвилі, що утворюють шар 4, який розділяє рідкий шар 3 та зону горіння 1. Згідно з роботою [6] для того щоб на поверхні розплаву виникли капілярні хвилі, розплав повинен бути рідиною, у розумінні механіки суцільних середовищ, а саме — модуль зсуву розплаву повинен дорівнювати нулеві. Однак, як це видно з рис. 2, модуль зсуву розплавленого парафінового зразка значно відрізняється від нуля. Це викликає сумніви у справедливості механізму розпилення, запропонованого в роботі [14].

На нашу думку, цей механізм має іншу природу: розпилення є результатом того, що розплавлений шар втрачає стійкість [11]. Дійсно, в результаті продування окислювача паливо піддається дії стискного напруження. Оскільки, як вже вказувалось, модуль зсуву розплавленого шару не дорівнює нулеві, то матеріал цього шару не можна розглядати як рідину, а варто вважати деяким в'язкопружним середовищем. Природно, що цей шар зв'язаний з нерозплавленою підкладкою визначеними пружними силами, що з'являються у проміжному шарі, який розділяє тверді і розплавлені ділянки матеріалу.

Отже, ми приходимо до моделі в'язкопружної циліндричної оболонки, що зображає розплавлений шар, розташований на пружній підкладці, який відповідає проміжному шарові (рис. 9, а). Під дією стискних напружень прямолінійна форма оболонки втрачає свою стійкість. Більш стійкою виявляється хвиляста форма (рис. 9, б). Стискне напруження продовжує деформувати



Рис. 6. Зображення парафінової краплини на початку процесу спалахування (збільшено в 50 разів)

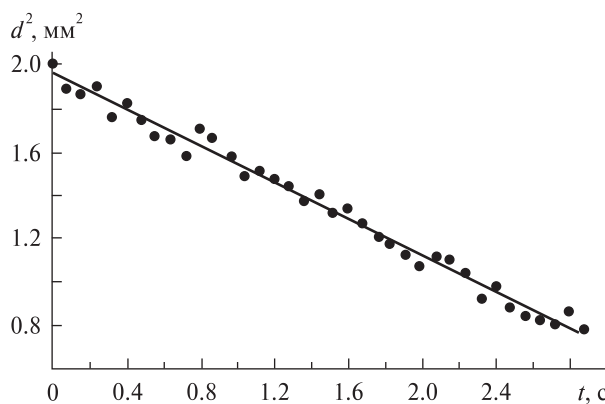


Рис. 7. Часова залежність квадрата діаметра частинки докозану $d^2(t)$ в процесі горіння ($d_b = 1.41 \text{ мм}$)

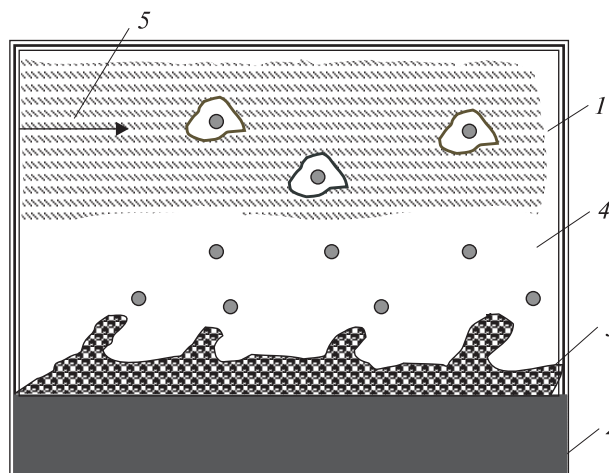


Рис. 8. Механізм розпилення парафіноподібного палива

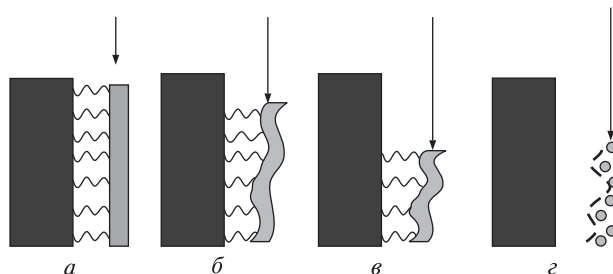


Рис. 9. Етапи деформації (а, б, в) та розпилення (г) розплавленого шару парафіноподібних систем

оболонку (рис. 9, в) доти, поки не відбувається її руйнування, що по суті є розпиленням (рис. 9, г). Розмір крапель, що утворюються, залежить від швидкості деформації розплавленого шару під дією градієнтів тиску і температури.

ВИСНОВКИ

Однією з головних задач, що постає перед розробниками ракетних двигунів, є досягнення ефективного згоряння палива. Для розв'язку цієї задачі необхідно визначити оптимальні режими горіння, які характеризуються такими параметрами як тиск, температура, швидкість руху фронту полум'я й ін., що в свою чергу вимагає створення теоретичних основ горіння парафіноподібних палив.

Аналіз літературних джерел показав, що розробка такої теорії знаходиться в зародковому стані. Однією з ключових проблем є визначення реологічних властивостей речовин, що беруть участь у горінні. Саме реологічні параметри у визначених випадках диктують вибір режимів горіння. У роботі показано, що загальноприйнята думка про розплав парафіну як про типову рідину з нульовим модулем зсуву не відповідає дійсності. Цей факт ставить під сумнів запропонований раніше механізм розпилення палива внаслідок капілярних хвиль. Значна величина модуля зсуву розплаву дозволяє розглядати розплавлений шар як в'язкопружне середовище.

З врахуванням даної обставини автори запропонували інший механізм розпилення, в основі якого лежить уявлення щодо втрати стійкості розплавленого шару. Втрата стійкості відбувається по всій довжині камери згоряння, що призводить до утворення аерозольних крапель розпла-

ву в об'ємі камери. Таким чином, необхідними також є дослідження кінетики випаровування краплі парафіну, процесів запалення і горіння аерозолі в окисному середовищі [3, 4], що часто мають вибуховий характер. Щоб встановити механізми тепломасообміну при запаленні і горінні краплі парафіну і визначити основні характеристики горіння (температуру, швидкість горіння тощо), необхідно використовувати сучасні діагностики високотемпературних швидкоплинних процесів.

1. Булавин Л. А., Актан О. Ю., Мягченко Ю. О. и др. Компьютеризация метода крутильных колебаний // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — № 3. — С. 164—165.
2. Булавин Л. А., Актан О. Ю., Забашта Ю. Ф. и др. Применение метода крутильных колебаний для изучения переходов между жидким и твердым агрегатными состояниями вещества // Письма в ЖТФ. — 2010. — 36, № 6. — С. 66—72.
3. Зельдович Я. Б., Баренблатт С. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. — 478 с.
4. Калинин В. В., Стручаев А. И., Орловская С. Г. Инерционные характеристики пламени капель углеводородов при его гистерезисе // Физика горения и взрыва. — 1990. — № 1. — С. 92—96.
5. Кнорре Г. Ф., Палеев И. И. Теория топочных процессов. — М.: Энергия, 1966. — 491 с.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1988. — 736 с.
7. Назаров Г. А., Прищепа В. И. Космические твердотопливные двигатели. — М.: Знание, 1980. — 63 с.
8. Орловская С. Г., Калинин В. В., Шкоронадо М. С. и др. Определение характеристик горения капель доказана // Тезисы докладов XXIV научной конференции стран СНГ «Дисперсные системы». — 2010. — С. 222—223.
9. Пат. 78427 Украина. Ракетный двигатель твердого топлива / Н. А. Калашников, В. Г. Королев, А. И. Красников, И. П. Балицкий, В. Ф. Кублик, В. Г. Мамонтов. — Опубл. 01.08.2005.
10. Пат. 78094 Україна, МПК⁷ G01N11/16. Спосіб визначення реологічних характеристик консистентних рідин / Л. А. Булавин, О. Ю. Актан, Ю. Ф. Забашта, Т. Ю. Ніколаєнко. — Опубл. 15.02.2007.
11. Пасынский А. Г. Коллоидная химия. — М.: Высш. шк., 1959. — 265 с.
12. Прищепа В. И. Космонавтика: Энциклопедия. — М.: Сов. энцикл., 1985. — 528 с.
13. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. — Киев: Наук. думка, 1972. — 501 с.

14. *Dornheim I. M.* Ideal hybrid fuel is wax // Aviation week and space technology. — 2003. — N 3. — P. 52—54.
15. *Greatrix D.* Regression rate estimation for standard-flow hybrid rockets engines // Aerospace Sci. and Technology. — 2009. — **13**, N 7. — P. 358—363.
16. *Nakagawa I., Hikone S., Suzuki T.* A study on the regression rate of paraffin-based hybrid rocket fuels // Abstracts of 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. — Denver, Colorado, 2009. — P. 4935.
17. *Van Pelt D., Hopkins J., Skinner M. and other.* Overview of a 4-inch OD paraffin-based hybrid sounding rocket program // Abstracts of 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. — Fort Lauderdale, FL, 2004. — P. 358.

Надійшла до редакції 15.09.10

O. Yu. Aktan, Yu. F. Zhabashka, V. Ya. Chernyak, S. G. Orlovskaya, O. S. Svechnikova, F. F. Karimova, M. S. Shkoropado

PHYSICAL FOUNDATION FOR THE
CONSTRUCTION OF PARAFFIN-BASED
HYBRID ROCKET ENGINES. KINETICS
OF MELTING AND COMBUSTION

The kinetics of melting and combustion for paraffin systems is investigated. For these systems, some characteristics of the propagation of the front of melting and combustion are experimentally determined. A mechanism of the dispersion of paraffin fuels is proposed on the basis of the obtained information. The foundation of the mechanism is the notion of loss in stability of the paraffin molten layer.