

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.01.030>

УДК 538.95, 536.46

Л. А. Булавін<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>, Л. Ю. Вергун<sup>1</sup>, Ю. Ф. Забашта<sup>1</sup>,  
С. Г. Орловська<sup>2</sup>, О. А. Недибалюк<sup>1</sup>, О. В. Соломенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>2</sup> Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

## МЕХАНІЗМ РОЗПИЛЕННЯ ПАРАФІНОВОГО ПАЛИВА ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПЛАЗМИ ПОПЕРЕЧНОЇ ДУГИ

*Розглядається питання інтенсифікації парафіноподібних систем, які можуть бути застосовані при створенні паливних зарядів для гібридних ракет. Експериментально визначено адгезійну міцність на зсув для парафінових систем з різними довжинами ланцюгів. Запропоновано механізм розпилення палива на основі парафіну при застосуванні плазми поперечної дуги, пов'язаний зі зміною кількості та форми зв'язків між парафіновими молекулами.*

**Ключові слова:** парафін, плазма поперечної дуги, розпилення.

### ВСТУП

В роботах [1, 5] розглядалось питання інтенсифікації процесів спалювання палива на основі парафінів, які можуть знайти своє застосування при створенні твердих зарядів для гібридних ракет. Інтенсифікація цього процесу базується на використанні плазми поперечної дуги [13]. При дослідженні структури парафінів на початковому етапі горіння було висунуто гіпотезу, що розпилення є процесом втрати стійкості поверхневого шару. Цей процес супроводжується утворенням мікрогранул, що містять тверду та рідку фазу. В роботі [5] зазначається, що характер плавлення n-парафінів залежить від рухливості та кількості сегментів неупорядкованої фази. В даній роботі ми спробуємо знайти причину зміни характеру розпилення під дією плазми поперечної дуги.

На рис. 1 зображено полум'я, яке утворюється під час горіння представників ряду парафінів, а саме октодекану  $C_{18}H_{38}$  та докозану  $C_{22}H_{46}$  із за-

стосуванням плазми однієї і тієї ж поперечної дуги. Як видно з рис. 1, при спалюванні парафінів з різними довжинами ланцюгів за допомогою плазми поперечної дуги маємо різні форми полум'я. Отримані результати можна ототожнити з різним характером розпилення частинок, зумовленим зміною співвідношення рідкої та твердої фаз в цих частинках, як зазначено в роботі [6, 11]. Як відомо [13], при проходженні плазми крізь речовину відбувається утворення заряджених частинок та їхня взаємодія з речовиною. Саме ця взаємодія і є причиною утворення частинок, які надалі переносяться в зону горіння. Взаємодія таких заряджених областей зі структурою палива можна досліджувати, використовуючи експериментальний метод визначення адгезійної міцності на зсув. Це пов'язано з тим, що при проходженні окисника у поверхневих шарах на межі «твердий парафін — розплав» створюється напружений стан речовини, вирішальну роль в якому відіграють зсувні напруження [1]. Наявність зазначеного напруженого стану може спричинити виникнення пристінкових та приосевих течій, появу

© Л. А. БУЛАВІН, В. Я. ЧЕРНЯК, Л. Ю. ВЕРГУН, Ю. Ф. ЗАБАШТА,  
С. Г. ОРЛОВСЬКА, О. А. НЕДИБАЛЮК, О. В. СОЛОМЕНКО, 2017

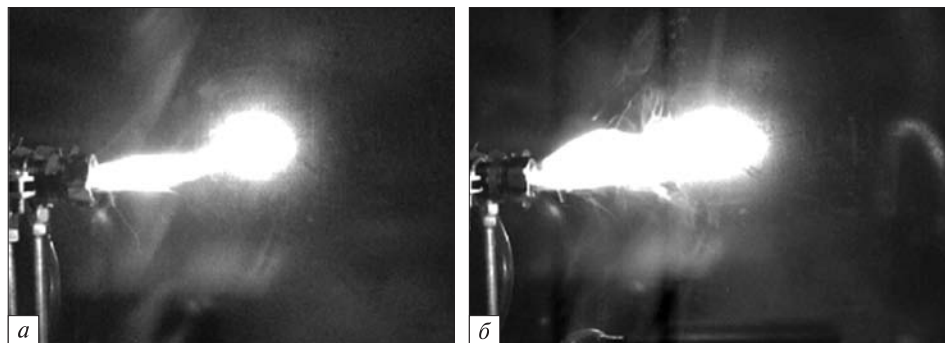


Рис. 1. Горіння н-парафінів: а — октодекан  $C_{18}H_{38}$ , б — докозан  $C_{22}H_{46}$

пульсації тощо [3]. Для опису режимів подібних структурованих течій використовують теоретичні рівняння [4], для розв'язку яких необхідно значення реологічних характеристик, таких як коефіцієнти в'язкості, зсувні напруження та ін. На розподіл зсувних напружень, викликаних наявністю структурованої рідини, або, іншими словами, наявністю твердої фази, впливає наявність активних центрів — функціональних одиниць, здатних утворювати зв'язок із кінцевою групою сублантажа [16]. Згідно із електричною теорією адгезії [7, 15] при контакті двох поверхонь в результаті диполь-дипольних взаємодій утворюються комплекси з переносом заряду [7]. Враховуючи той факт, що у парафінів експериментально виявлено електричний дипольний момент [2, 8], в роботі використовувалась методика [16], яка базується на визначенні величини адгезійної міцності, що пов'язана із взаємодією та перерозподілом активних центрів. Роль активних центрів полягає у формуванні молекулярних взаємодій між двома шарами, в яких виникають зсувні напруження, причому ці центри лежать в кожному з цих шарів. Для встановлення механізмів перерозподілу активних центрів у парафінових шарах будемо визначати адгезійну міцність між кремнієподібними системами, для яких експериментально встановлено існування таких центрів [10], та твердим парафіном. Для цього випадку величина, яка характеризує роботу адгезійних сил, визначається за формулою

$$W_a = \overline{WN}, \quad (1)$$

де  $\overline{W}$  — середня енергія одиниці зв'язку, що визначає адгезію;  $N$  — число зв'язків в розрахунку на одиницю площі адгезії між шарами [6].

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Особливістю методу визначення адгезійної міцності на зсув для дослідження взаємодій активних центрів (в нашому випадку — заряджених областей) на втрату стійкості шару речовини є розміщення останньої між двома пластинами, які містять кремній. Наявність активних центрів у кремнієподібних системах було встановлено в роботі авторів [16]. Відповідно до цієї роботи в експерименті визначається міцність в напрямку, перпендикулярному до з'єднаних поверхонь — адгезійна міцність на розтяг. У парафіновому шарі виникають напруження, що діють паралельно поверхні підкладки.

На рис. 2 показано схему підготовки зразка (а), схема його навантаження (б) та зміну структури при зсуві (в). Видно, що зразок піддається дії крутильного моменту  $M$ , і при цьому обидві підкладки зсуваються на кут  $\gamma$ .

На рис. 3 зображено процес затвердіння досліджуваних зразків октодекану  $C_{18}H_{38}$  (а) та докозану  $C_{22}H_{46}$  (б), а також зовнішній вигляд лабораторного обладнання (в).

У поперечному перерізі затверділого парафінового шару виникають дотичні напруження  $\tau_{xy}$ , розподіл яких показано на рис. 4. До такого розподілу приводить розрахунок, виконаний методами теорії пружності [9]. Як видно, максимальні дотичні напруження виникають на зовнішній поверхні твердого парафінового шару, причому вони досягають максимуму в точках  $x = y = a/2$ , де  $a$  — поперечний розмір зразка. Значення максимального дотичного напруження визначається формулою

$$\tau_{\max} = \frac{M}{qa^3}, \quad (2)$$

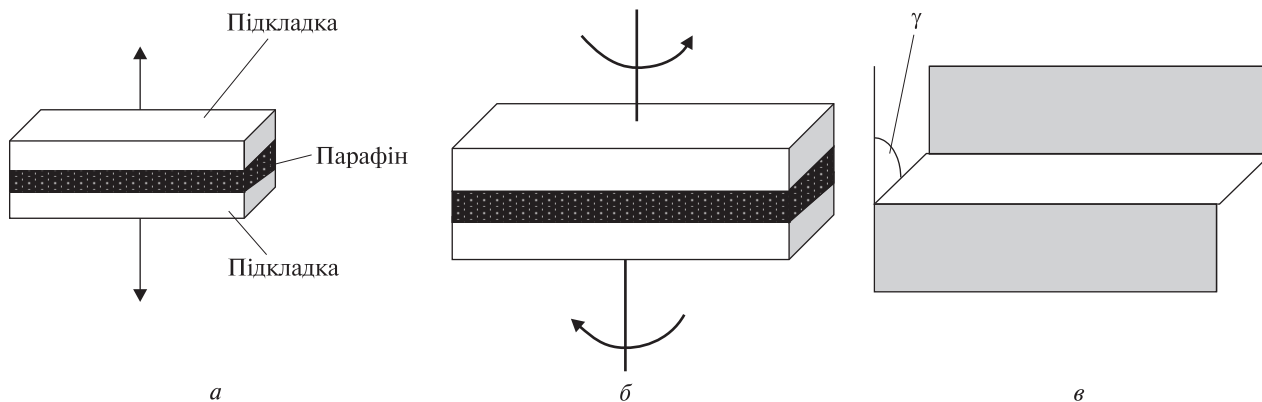


Рис. 2. Схеми експериментального визначення адгезійної міцності

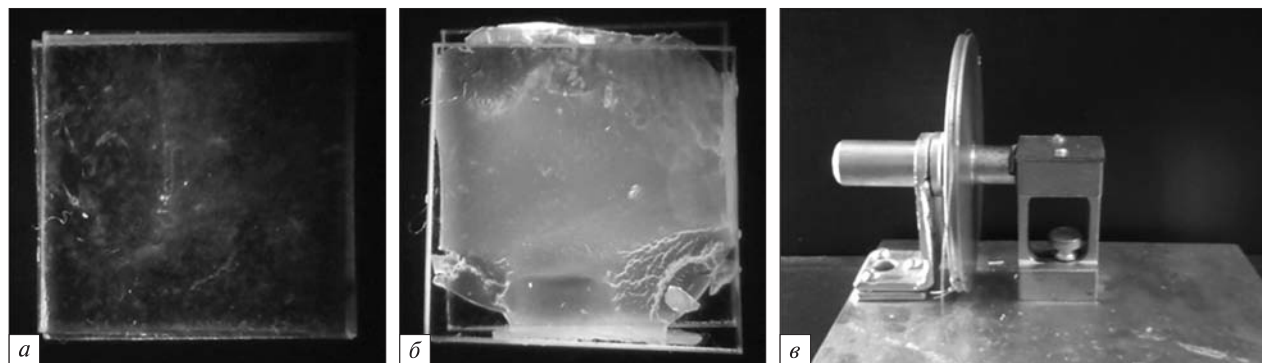


Рис. 3. Підготовка досліджуваних зразків (а, б) та експериментальне обладнання (в)

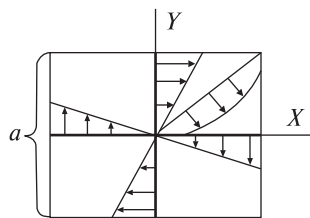


Рис. 4. Розподіл дотичних напружень  $\tau_{xy}$  по поперечному перерізу парафінового шару, що затвердів між пластинами

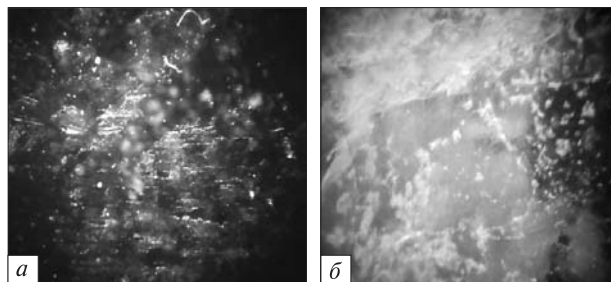


Рис. 5. Збільшене фото поверхні системи «кварцова підкладка — твердий парафін» після розриву: а — підкладка вкрита октодеканом  $C_{18}H_{38}$ , б — підкладка вкрита докозаном  $C_{22}H_{46}$

де  $q = 0.208$ . Формула (2) і числове значення коефіцієнта  $q$  відповідають випадку, коли поперечний переріз має форму квадрата.

Як відомо, у матеріалознавстві є декілька феноменологічних теорій міцності, що відрізняються одна від одної критеріями руйнування. Однією з найбільш поширених теорій є теорія, згідно з якою

руйнування відбувається тоді, коли дотичні напруження досягають певного критичного значення  $\tau_p$  міцності на зсув. Тому міцність на зсув  $\tau_p$  розраховувалась за формулою

$$\tau_p = \frac{M}{q a^3} \quad (3)$$

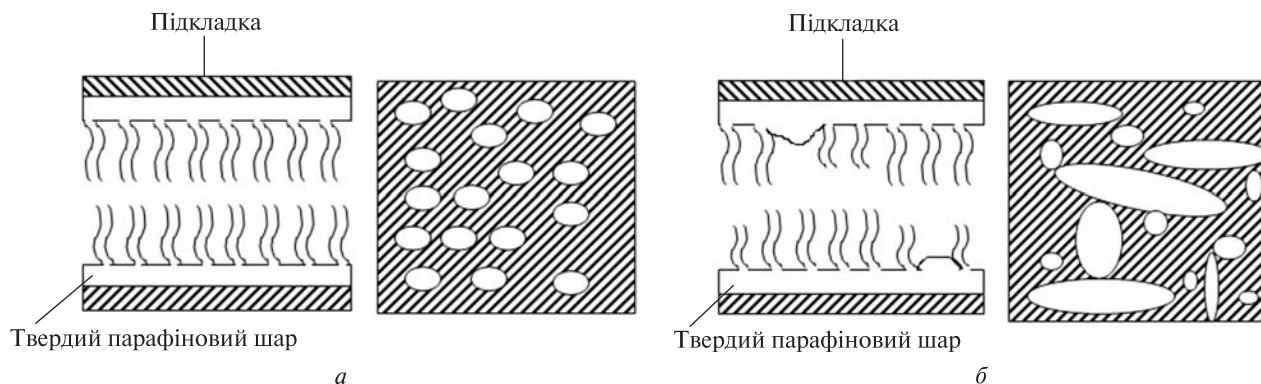


Рис. 6. Схематичний розподіл в'язей зруйнованої поверхні «кварцова підкладка — твердий парафін» у випадку октодекану  $C_{18}H_{38}$  (а) та у випадку докозану  $C_{22}H_{46}$  (б)

Для експериментальних робіт використовувались: октодекан  $C_{18}H_{38}$  (чистий, виробник «Реохім» Дніпро, ТУ ОКП 2631110191), докозан  $C_{22}H_{46}$  (чистий, виробник «Реохім» Дніпро, ТУ 6-09-18-41-78 ОКП 2631110131), лабораторне скло з розмірами  $10 \times 10$  мм (CAT.NO.7101 Microscope slides). Зразки виготовлялись шляхом нанесення розплавленого шару між двома пластинами з подальшим затвердінням.

#### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 5 зображено поверхні «кварцова підкладка — твердий парафін» після руйнування. Значення адгезійної міцності для докозану  $C_{22}H_{46}$  склало  $\tau_p = 21.1 \pm 2$  Па, для октодекану  $C_{18}H_{38}$  —  $10.3 \pm 3$  Па. Як видно, октодекановий шар (рис. 5, а) після розриву утворює поверхню з розрізнених парафінових областей, на відміну від докозанового шару (рис. 5, б), який має щільнішу структуру. Це означає, що у випадку октодекану збільшується кількість в'язей, які з'єднують активні центри з парафіновим матеріалом.

На рис. 6 схематично показано розподіл в'язей для зруйнованого октодеканового та докозанового шару. Аналіз рис. 6 показує, що щільність структури докозану пов'язана із утворенням в'язей різного типу. Одною із причин такої структури, на наш погляд, є властивість ланцюгів до утворення зачеплень або фізичних вузлів [14].

На нашу думку, у випадку докозану ланцюгами термодинамічно вигідно утворювати фізичні вузли поблизу кварцеподібної поверхні, що містить активні центри з більшою енергією, ніж активні центри безпосередньо у парафіні. При застосуванні плазми поперечної дуги активні центри з більшою енергією будуть формуватись у шарі парафіну. При цьому у більшості випадків парафінові ланцюги будуть взаємодіяти між собою, що призведе до зменшення кількості додаткових в'язей між парафіновим розплавом та боковою поверхнею зарядної капсули. Внаслідок цього мають створюватись більш сприятливі умови для відриву частинок від поверхні розплавленого шару з наступним перенесенням у зону горіння. Розміри цих крапель будуть залежати від довжини ланцюга і впливати на характер полум'я, як це можна побачити з рис. 1 та з роботи [12].

#### ВИСНОВКИ

Механізм застосування плазми поперечної дуги для інтенсифікації спалювання парафіноподібних палив полягає як у створенні додаткових активних центрів в термодинамічній системі, так і у зменшенні сили поверхневого натягу, що перешкоджає утворенню в'язів між ланцюговими молекулами, які запобігають зростанню пристінкового шару.

1. Актан О. Ю., Забашта Ю. Ф., Черняк В. Я. та ін. Фізичні основи конструювання двигуна на парафіновому паливі для гібридних ракет. Кінетика плавлення і



- горіння // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 3. — С. 28—33.
2. Ашеко А. А. Электрические диполи молекул насыщенных углеводородов с открытой цепью в газовой фазе // Вісник Харків. ун-ту. Сер. фіз. «Ядра, частинки, поля». — 1998. — № 421. — С. 114—117.
  3. Бабенко В. В., Турик В. Н. Макет вихревых структур течения в вихревой камере // Прикладна гідромеханіка. — 2008. — 10, № 3. — С. 3—19.
  4. Беляева Н. А. Неоднородное течение структурированной жидкости // Математическое моделирование. — 2006. — 18, № 6. — С. 3—14.
  5. Вергун Л. Ю., Черняк В. Я., Недибалюк О. А. та ін. Конформаційні зміни структури твердого парафінового палива на початковому етапі його спалювання // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 5. — С. 73—79.
  6. Воюцкий С. С. Аутогезия и адгезия высокополимеров. — М.: Гостехиздат, 1978. — 244 с.
  7. Дудчак Т. В., Дудчак В. П., Остапенко Р. М. Дослідження технологічних параметрів пресування на адгезійну міцність антифрикційних полімерних покриттів // Проблеми трибології (Problems of Tribology). — 2012. — № 2. — С. 91—95.
  8. Шахпаронов М. И., Ашеко А. А., Усачева Т. М. Кинетика диэлектрически наблюдаемых процессов теплового движения в жидких алканах // Журн. физ. химии. — 1984. — 58, № 11. — С. 2746—2749.
  9. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. — Киев: Наук. думка, 1972. — 501 с.
  10. Behrens S. H., Grier D. G. The Charge of Glass and Silica Surfaces // J. Chem. Phys. — 2001. — N 115. — P. 6716—6721.
  11. Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F. The physical model of aerosol forming during the liquid fuel burning // Abstracts of the European Aerosol Conference. Budapest. Hungary. — 2004. — V. II. — P. 1249—1250.
  12. Fedirchuk I. I., Nedybaliuk O. A., Vergun L. Yu., et al. Influence of Plasma on Surface Tension of Hydrocarbons // Probl. Atomic Sci. and Technology. Ser: Plasma Phys. — 2015. — N 1. — P. 239—242.
  13. Nedybaliuk O. A., Solomenko O. V., Chernyak V. Ya., et al. Peculiarities of Plasma Assisted Stearine Combustion // Phys. Rev. and Res. Int. — 2013. — 3, N 4. — P. 522—530.
  14. Pierre Gilles de Gennes. Scaling Concepts in Polymer Physics. — Oxford: Cornell University Press, 1979. — 324 p.
  15. Stuart M. Lee. Handbook of Composite Reinforcements. — John Wiley & Sons, 1992. — 732 p.
  16. Vergun L. Yu., Zabashta Yu. F., Todosiychuk T. T. Evaluation of protective coating and inert surfaces adhesion // Functional Materials. — 2014. — 21, N 1. — P. 64—68.

Стаття надійшла до редакції 17.11.16

## REFERENCES

1. Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F., Chernyak V. Ya., et al. Physical foundation for the construction of paraffin-based hybrid rocket engines. Kinetics of melting and combustion. *Kosm. nauka tehnol.*, 17 (3), 28—33 (2011) [in Ukrainian].
2. Asheko A. A. Elektricheskie dipoli molekul nasyshchennykh uglevodorodov s oktrytoy tsep'yu v gazovoy faze. *Visnik Kharkivs'kogo universitetu. Seriya fizichna «Yadra, chastinki, polya»*, 421, 114—117 (1998) [in Russian].
3. Babenko V. V., Turik V. N. Breadboard model of vortical structures at flow in the vortical chamber. *Applied hydro-mechanics*, 10 (82), 3—19 (2008) [in Russian].
4. Belyaeva N. A. Heterogeneous flow of the structured liquid. *Matem. Mod.*, 18 (6), 3—14 (2006) [in Russian].
5. Vergun L. Yu., Chernyak V. Ya., Nedibalyuk O. A., et al. The conformation changes of the solid paraffin's structure during initial stage of its burning. *Kosm. nauka tehnol.*, 19 (5), 73—79 (2013) [in Ukrainian].
6. Voyutskiy S. S. Autogeziya i adgeziya vysokopolimerov, 244 p. (Gostekhizdat, Moscow, 1978) [in Russian].
7. Dudchak T. V., Dudchak V. P., Ostapenko R. M. Doslidzhennya tekhnologichnikh parametriv presuvannya na adgeziyu nitsnist' antifriktsiynikh polimernikh pokrittiv. *Problemi tribologii (Problems of Tribology)*, 2, 91—95 (2012) [in Ukrainian].
8. Shakhparonov M. I., Asheko A. A., Usacheva T. M. Kinetika dielektricheski nablyudaemykh protsessov teplovogo dvizheniya v zhidkikh alkanakh. *Zh. fiz. khimii*, 58 (11), 2746—2749 (1984) [in Russian].
9. Timoshenko S. P. Kurs teorii uprugosti, 501 p. (Naukova dumka, Kiev, 1972) [in Russian].
10. Behrens S. H., Grier D. G. The Charge of Glass and Silica Surfaces. *J. Chem. Phys.*, 115, 6716—6721 (2001).
11. Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F. The physical model of aerosol forming during the liquid fuel burning. Abstracts of the European Aerosol Conference. Budapest. Hungary, V. II, 1249—1250 (2004).
12. Fedirchuk I. I., Nedybaliuk O. A., Vergun L. Yu., et al. Influence of plasma on surface tension of hydrocarbons. *Probl. Atomic Sci. and Technology. Ser: Plasma Physics*, 21 (1), 239—242 (2015).
13. Nedybaliuk O. A., Solomenko O. V., Chernyak V. Ya., et al. Peculiarities of Plasma Assisted Stearine Combustion. *Physical Review & Research International*, 3 (4), 522—530 (2013).
14. de Gennes P.-G. Scaling Concepts in Polymer Physics, 324 p. (Cornell University Press, Oxford, 1979).
15. Stuart M. Lee. Handbook of Composite Reinforcements, 732 p. (John Wiley & Sons, 1992).
16. Vergun L. Yu., Zabashta Yu. F., Todosiychuk T. T. Evaluation of protective coating and inert surfaces adhesion. *Functional Materials*, 21 (1), 64—68 (2014).

Л. А. Булавин<sup>1</sup>, В. Я. Черняк<sup>1</sup>, Л. Ю. Вєргун<sup>1</sup>,  
Ю. Ф. Забашта<sup>1</sup>, С. Г. Орловская<sup>2</sup>, О. А. Недыбалюк<sup>1</sup>,  
Е. В. Соломенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Киевский национальный университет  
имени Тараса Шевченко

<sup>2</sup> Одесский национальный университет  
имени И. И. Мечникова

#### МЕХАНИЗМ РАСПЫЛЕНИЯ ПАРАФИНОВОГО ТОПЛИВА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПЛАЗМЫ ПОПЕРЕЧНОЙ ДУГИ

Рассматривается вопрос интенсификации парафиноподобных систем, которые могут быть применены при создании топливных зарядов для гибридных ракет. Экспериментально определена адгезионная прочность на сдвиг для парафиновых систем с различными длинами цепей. Предложен механизм распыления топлива на основе парафина при применении плазмы поперечной дуги, связанный с изменением количества и формы связей между парафиновыми молекулами.

**Ключевые слова:** парафин, плазма поперечной дуги, распыление.

L. A. Bulavin<sup>1</sup>, V. Ya. Chernyak<sup>1</sup>, L. Yu. Vergun<sup>1</sup>,  
Yu. F. Zabashta<sup>1</sup>, S. G. Orlovskaya<sup>2</sup>, O. A. Nedibalyuk<sup>1</sup>,  
O. V. Solomenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv

<sup>2</sup>I. I. Mechnikov National University of Odessa

#### MECHANISM OF PARAFFIN-BASED FUEL SPRAYING USING PLASMA TRANSFERRED ARC

We discuss the problem of paraffin-based systems' intensification. Such systems can be used in the technologies of the fuel charges for hybrid rockets. The shear adhesion strength for a paraffin-based system with chains of a different length is determined experimentally. The mechanism of paraffin-based fuel spraying using a transverse plasma arc is proposed. This mechanism is associated with the changes in a quantity and a form of bonds between paraffin molecules.

**Key words:** paraffin-based fuel, transverse plasma arc , spraying.