

doi: 10.15407/knit2016.03.016

УДК 538.95, 536.46

Л. Ю. Вергун¹, В. Я. Черняк¹, С. Г. Орловська², О. А. Недибалюк¹, О. В. Соломенко¹, С. А. Попов³

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

² Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, навчально-науковий інститут «Інститут геології»

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ПАРАФІНОВИХ ПАЛИВ ДЛЯ ДВИГУНІВ ГІБРИДНИХ РАКЕТ

Розглядається питання збільшення коефіцієнта регресії парафіноподібного палива в аерокосмічних установках. Висунуто гіпотезу щодо залежності цієї величини від зміни конформації ланцюгів на поверхні розплавленого шару. Запропоновано використовувати магнітне поле при підготовці паливного заряду. Зроблено висновок про стабілізацію переносу крапель з поверхні парафіноподібного розплаву в зону горіння при застосуванні сталого магнітного поля.

Ключові слова: парафіноподібне паливо, коефіцієнт регресії, магнітне поле.

ВСТУП

При використанні парафіноподібного палива в аерокосмічних установках є проблема незначного коефіцієнта регресії при його спалюванні. Поняття «регресії» застосовується при дослідженні твердих палив з метою оцінки гранул, що формуються на поверхні розплаву і переносяться в зону горіння. Теоретична залежність, яка описує швидкість регресії палива \dot{r} (швидкість зміни структури поверхневого розплавленого шару) має вигляд [25]

$$\dot{r} = 0.036 \frac{G^{0.8}}{\rho_f} \left(\frac{\mu}{x} \right)^{0.2} \beta^{0.23}, \quad (1)$$

де G — швидкість потоку газопаливної суміші в зоні горіння, ρ_f — густина твердої фази, μ — в'язкість газової фази, x — характерний розмір, що враховує осьове розташування, β — безрозмірний коефіцієнт, що характеризує стан розплавленого шару після відриву з нього частинок до зони горіння. Для застосування залежності

(1) під час обробки експериментальних значень користуються виразом [25]

$$\dot{r} = a G_0^n, \quad (2)$$

де a — коефіцієнт регресії (спалювання), що враховує значення параметрів ρ_f, x, μ, β , G_0 — швидкість переносу маси окислювача, n — показник регресії, що змінюється в межах від 0.4 до 0.7 і залежить від тиску.

Проблема незначної величини коефіцієнта регресії може бути пов'язана із виникненням різноманітних вихрових зон під час переносу часток в зону горіння. Ці зони виникають, скоріш за все, за рахунок наявності у пристінкових та приосьових областях течій з поздовжніми градієнтами статичного тиску різних знаків, виникнення пульсації швидкості та ін. Фізичні закономірності взаємодії вказаних ефектів до теперішнього часу достатньо не вивчені [4].

Процес спалювання парафіноподібних палив в аерокосмічних установках [22] є багатостадійним процесом. На поверхні твердого парафінового стержня під дією високих температур утворюється розплав. Надалі краплини цього роз-

© Л. Ю. ВЕРГУН, В. Я. ЧЕРНЯК, С. Г. ОРЛОВСЬКА,
О. А. НЕДИБАЛЮК, О. В. СОЛОМЕНКО, С. А. ПОПОВ, 2016

плаву відриваються від поверхні за рахунок руху окислювача і відносяться в зону горіння.

Згідно із загальноприйнятою теорією [9] процес горіння краплини поділяють на три фази: 1) фаза прогріву, в якій краплина отримує енергію із газової фази, що сприяє досягненню температури кипіння; 2) фаза випаровування, в якій паливо випаровується в газову фазу; 3) фаза горіння, в якій відбувається спалахування.

Як відомо [9], механізм процесу спалахування залежить від кінетики хімічної реакції розкладання палива, його оптичних, теплофізичних та геометричних характеристик а також від умов теплообміну з навколишнім середовищем.

У процесі спалахування та горіння парафіноподібних палив, як і інших видів вуглеводневих палив, одну із провідних ролей відіграють вуглеводневі радикали R («залишки молекул») та з'єднання RCOH [13]. Також при горінні вуглеводнів має місце утворення холодного полум'я внаслідок передполум'яних реакцій у суміші, протягом яких утворюються проміжні сполуки. Зазначені передполум'яні процеси тісно пов'язані з антидетонаційною стійкістю палив в двигунах, яка, як відомо, залежить від будови молекул вуглеводнів [13].

На початковому етапі спалювання твердого парафіноподібного палива відбувається його перехід із твердої в рідку фазу. У твердому стані вуглеводневе паливо має впорядковану ламелярну структуру. Для подібних структур у роботах [16, 18, 19] були виявлені специфічні дефекти — супервакансії. Це порожнини, поздовжній розмір яких дорівнює довжині полімерного ланцюга, а поперечний — міжланцюговій відстані. Характерною особливістю для ланцюгів, що межують із супервакансією, є входження ланцюгів у простір цього дефекту і утворення в ній області невпорядкованого матеріалу.

В роботі [17] показано, що супервакансії вносять значний внесок у процес плавлення, коли у полімерній системі при збільшенні температури відбувається зменшення кількості впорядкованої (кристалічної) фази та збільшення невпорядкованої (мезоморфної) фази. Мезоморфна фаза є ділянками переплутаних ланцюгів. Центром розгалуження цієї фази є супервакансія, що за-

повнена сегментами сусідніх з нею ланцюгів. Враховуючи дані [16—19, 20], на кінцевому етапі плавлення розплав парафінової структури можна розглядати як сукупність розрізнених ланцюгів та ланцюгів, що мають одне або декілька зачеплень (петель). Наявність областей із зачепленими ланцюгами відповідає так званому явищу кристалізаційної пам'яті. Суть цього явища полягає в тому, що при багаторазовому процесі «нагрівання — охолодження» кристаліти утворюються на одному й тому ж самому місці [7, 14].

На початковому етапі спалювання палива [5, 9, 13] такі області із зачепленими ланцюгами можуть впливати на процеси спалахування палив у зв'язку із формуванням проміжних з'єднань. В роботах [1, 6] було експериментально показано, що при температурах плавлення на деякому відрізьку часу вуглеводні із ряду n-парафінів містять деяку кількість твердої фази, що підтверджується ненульовим значенням модуля зсуву. Наявність у парафіновому розплаві областей із зачепленими ланцюгами може бути причиною вибуху при спалюванні цього палива.

В роботі [10] питання щодо збільшення регресії згоряння парафіноподібного палива пропонувалось розв'язати за допомогою додаткового елемента з сітчастого матеріалу, який можна розмістити у паливний заряд. Продовжуючи тематику інтенсифікації спалювання даного виду палива, тут ми запропонуємо використовувати постійне магнітне поле при підготовці твердого паливного заряду. Необхідно відмітити, що ідея використання магнітного поля для зміни структури парафіновмісних речовин вже використовується в сучасних технологіях [11, 12].

Ідея даного дослідження полягає в розробці методики підготовки парафіноподібного палива, яке при розпиленні буде утворювати краплину з мінімальним вмістом твердої кристалічної фази. Наявність останньої перешкоджає рівномірному характеру переносу краплин із поверхні розплаву в зону горіння.

КОНФОРМАЦІЙНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В СТРУКТУРІ n-ПАРАФІНІВ

Відомо, що для молекул n-парафінів характерним є можливість змінювати конформації за ра-

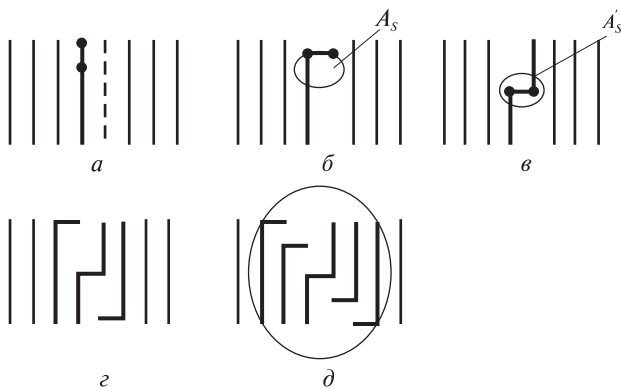


Рис. 1. Солітонний механізм обертального руху ланцюгів та утворення невпорядкованої області (див. текст)

хунок розворотів сегментів ланцюга під впливом зовнішніх силових полів [27]. При такій можливості дефектні зони можуть мати різноманітну геометрію. Механізм цих перебудов для полімерів може бути пов'язаний із взаємодією між диполями та перерозподілом водневих зв'язків [27]. Аналогічні висновки отримано в експериментальних роботах [3, 4], де було виявлено наявність електричних дипольних моментів у нормальних вуглеводнів та зміну взаємних орієнтацій цих молекул під дією поля.

Причина таких перетворень може бути такою. Утворення супервакансій створює передумови до обертального руху ланцюгів, сусідніх з супервакансією. В роботі [8] встановлено, що такий рух відбувається за рахунок переміщення солітонів уздовж ланцюгів. На рис. 1 зображено ланцюговий кристал із супервакансією, яка позначена штриховою лінією. На кінці ланцюгів, сусідніх з супервакансіями, можуть утворюватися солітони. Такий солітон A_s (рис. 1, б) виникає внаслідок розвороту кінцевої ділянки ланцюга, обмеженої двома точками (рис. 1, а). Після свого утворення солітон A_s рухається уздовж ланцюга і переходить в положення A'_s (рис. 1, в), пригальмувавши свій рух за рахунок теплового руху ланцюгів, які оточують солітон. Під час руху солітона відбувається обертання ділянки ланцюга між солітоном і кінцем ланцюга. Таким чином, обертання молекул як цілого не відбувається, а обертання реалізується внаслідок руху солітона уздовж ланцюга.

На рис. 1, а–в зображено механізм руху солітона в ланцюзі, який є безпосереднім сусідом супервакансії. Проте, як це показано на рис. 1, г, д, після гальмування першого солітона виникає можливість утворення солітонів для ланцюгів, які межують з безпосереднім сусідом вакансії. При цьому в околиці вакансії на відстані, яка за порядком дорівнює довжині ланцюга, утворюється неврегульована область (на рис. 1, д вона лежить всередині овалу). Для об'єму цієї області v_{ar} маємо оцінку

$$v_{ar} \approx l_{ar}^3, \quad (3)$$

де l_{ar} — довжина ланцюга.

Таким чином, що довше ланцюг, то більше виникає обертальних солітонних ділянок, в яких за рахунок перебудов неврегульованих сегментних областей виникають диполь-дипольні взаємодії. Запропонована гіпотеза підтверджується експериментальними [26] і теоретичними роботами [23], що присвячені причинам виникнення орієнтаційних моментів під дією зовнішніх силових полів.

Із викладеного вище випливає, що величина коефіцієнта регресії скоріш за все пов'язана з вихровими зонами на поверхні розплаву, утворення яких залежить від солітонного обертального руху ланцюгів у процесі плавлення.

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Відомо, що характеристикою горіння конденсованих сумішей, до яких належить парафіноподібне паливо, є параметри полум'я [13], що утворюється у процесі його спалювання, наприклад ширина фронту горіння, його висота та ін. При розпиленні краплин з поверхні розплаву важливими параметрами є час спалахування та час розплавлення, які визначаються швидкістю надходження окислювача з навколишнього середовища до поверхневого шару розплавленого палива [5].

Враховуючи ці чинники були проведені експерименти горіння обробленого і не обробленого магнітним полем парафіноподібного палива (стеарин) в середовищі нерухомого окислювача і середовищі рухомого окислювача (повітря).

Горіння в нерухомому повітряному середовищі.

В експерименті визначалась середня ширина полум'я. Як відомо [5], для конденсованих систем при дослідженні кінетики горіння використовують циліндричні заряди. В цьому випадку фронт горіння є плоским, спотворення спостерігаються тільки на краях зарядів. В експерименті використовувались тверді стеаринові циліндри діаметром 8 мм. Довжина зразка була вибрана у відповідності з відстанню між котушками по типу кілець Гельмгольца і складала 15 мм. Зразок піддавався дії постійного магнітного поля з моменту утворення факелу. Величина магнітної індукції вимірювалась за допомогою тесламетра універсального 43205. Неповна відповідність розташування котушок точній геометрії кілець Гельмгольца призводила до неоднорідності магнітного поля порядку 5 %. Досліди провадились при індукціях поля 0, 0.43, 1.33, 1.99 мТл. В експерименті визначалась середня ширина полум'я h при наявності магнітного поля та при його відсутності протягом 112 с.

На рис. 2 показано стеариновий зразок, розміщений між котушками.

На рис. 3 наведено порівняльні залежності ширини полум'я, що утворюється внаслідок горіння стеаринового зразка при відсутності та при наявності магнітного поля різної індукції.

Як видно з рис. 2 та 3 застосування постійного магнітного поля при горінні парафіноподібного палива в нерухомому повітряному середовищі



Рис. 2. Стеариновий циліндричний зразок, розміщений між котушками по типу кілець Гельмгольца, що створюють постійне однорідне магнітне поле

змінює кінетику цього процесу. Швидкість зміни ширини фронту горіння свідчить про інтенсивність процесу перенесення крапель з поверхні розплаву в газове середовище. Експериментальні результати були лінійно інтерпольовані з використанням програми OriginPro 8.1. На рис. 3, а—в отримані залежності позначено прямими лініями. В результаті лінійної інтерполяції було виявлено, що магнітне поле з індукцією 0.43 мТл збільшує ширину полум'я в 1.083 раза, магнітне поле з індукцією 1.33 мТл практично не впливає на цю величину, а збільшення індукції до 1.99 мТл збільшує ширину полум'я в 1.38 рази.

Горіння в потоці рухомого окислювача. Для кращого розуміння питання щодо впливу магнітного поля на структуру парафіноподібного палива використовувалась експериментальна методика, викладена в роботах [10, 23, 24], яка ґрунтується

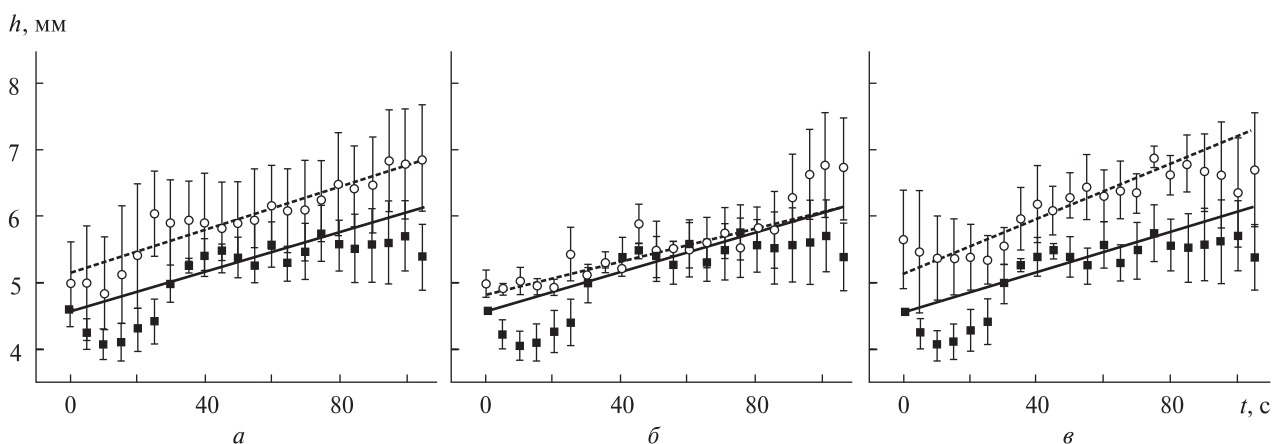


Рис. 3. Зміна ширини h полум'я з часом t при наявності магнітного поля (кружки і штрихова лінія) з індукцією 0.43 мТл (а), 1.33 мТл (б) та 1.99 мТл (в). Темні квадратики і суцільна лінія — залежність при відсутності магнітного поля

ся на застосуванні плазми поперечного дугового розряду. Для проведення експерименту використовувався стеарин, розплав, якого при сталій температурі на протязі 30 хвилин витримувався в постійному магнітному полі. Надалі намагнічений розплав заливався в капсулу, яка розміщувалась в експериментальній установці для спалювання речовин з використанням плазми поперечного дугового розряду.

На рис. 4 приведено залежності ширини h_f факела плазми від часу t роботи системи при спалюванні стеарину, заздалегідь обробленого (сірі кружки) і не обробленого (чорні трикутники) у постійному магнітному полі з різною індукцією при потоці повітря $83 \text{ см}^3/\text{с}$ крізь розряд, додатковий потік повітря $330 \text{ см}^3/\text{с}$, $I = 300 \text{ мА}$, $U = 0.4 \text{ кВ}$.

З рис. 3 і 4 видно, що застосування магнітного поля при підготовці твердих парафіноподібних сумішей змінює характер горіння цих сумішей. Порівняно з ненамагніченим парафіном, для якого ширина факела змінюється нелінійно у процесі спалювання, ширина факела парафінового палива, що заздалегідь пройшло додаткову обробку постійним магнітним полем, практично залишається постійною. Це означає, що відрив краплин з поверхні розплаву в газову фазу відбувається рівномірно.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Раніше було вказано, що застосування магнітного поля стабілізує процес горіння парафіноподібного палива. Молекулярний механізм такої дії може бути таким.

Як відомо [14], енергія системи залежить від ентропії S . На початковому етапі спалювання твердого парафінового палива відбувається підведення енергії до поверхневого шару, що призводить до плавлення, яке протікає від поверхні до нижніх шарів.

В роботах [16–19] зазначено, що для систем з супервакансіями, до яких відносяться n -парафіни, величина S дорівнює сумі

$$S = S_1 + S_2,$$

де S_1 — доданок, що пов'язаний з різними розташуваннями супервакансій по вузлах ґратки:

$$S_1 = k \ln \left[\frac{N!}{n! (N-n)!} \right], \quad (4)$$

де N — число вузлів ґратки, n — число вакансій, k — стала Больцмана.

Поява додаткового доданку S_2 пов'язана з тим, що ланцюги, які оточують супервакансію, можуть приймати згорнуті конфігурації, входячи в область супервакансії. Значення S_2 істотно пере-

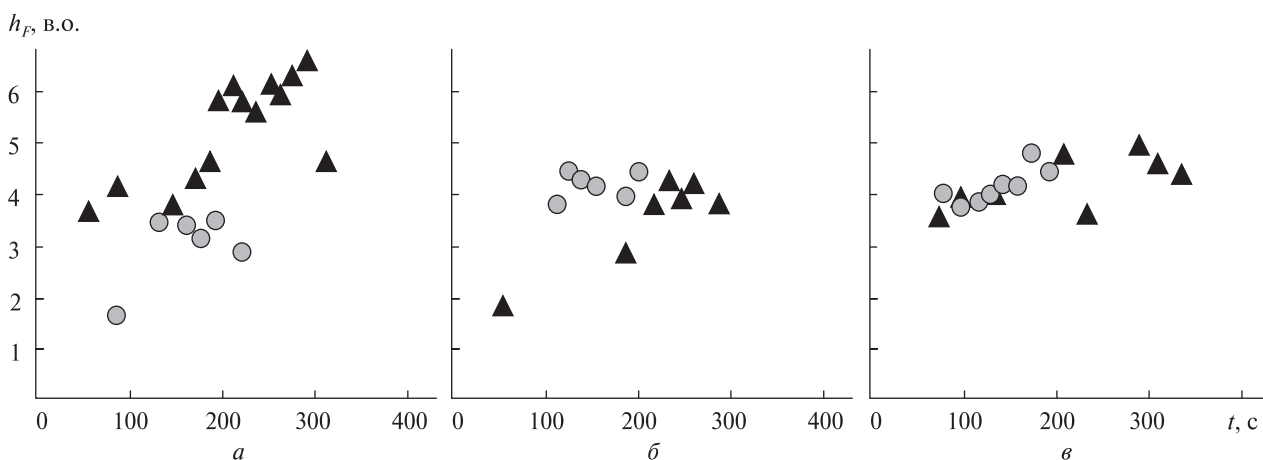


Рис. 4. Зміна ширини h_f факела плазми з часом t роботи системи при спалюванні стеарину, що не був попередньо оброблений в магнітному полі (чорні трикутники) та з попередньою обробкою у магнітному полі (сірі кружки) з індукцією: 0.43 мТл (а), 1.33 мТл (б) і 1.99 мТл (в). Потік повітря через розряд — $83 \text{ см}^3/\text{с}$, додатковий потік повітря — $330 \text{ см}^3/\text{с}$, $I = 300 \text{ мА}$, $U = 0.4 \text{ кВ}$

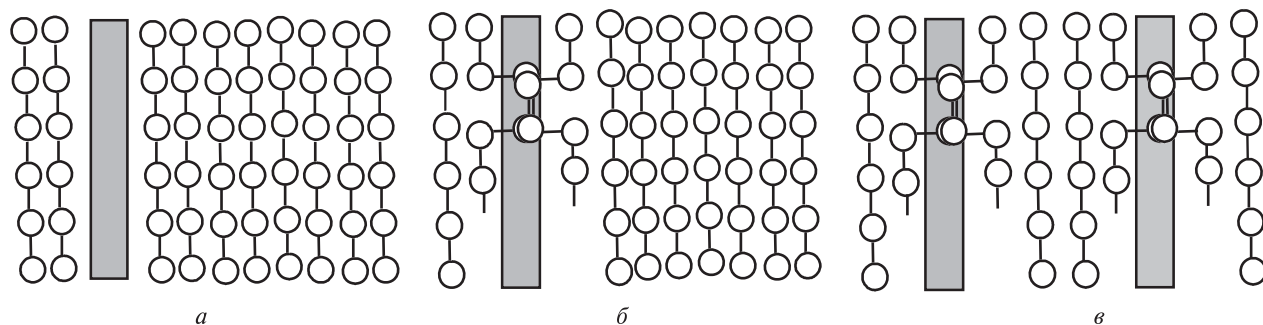


Рис. 5. Схема утворення уступів в області супервакансії (див. текст)

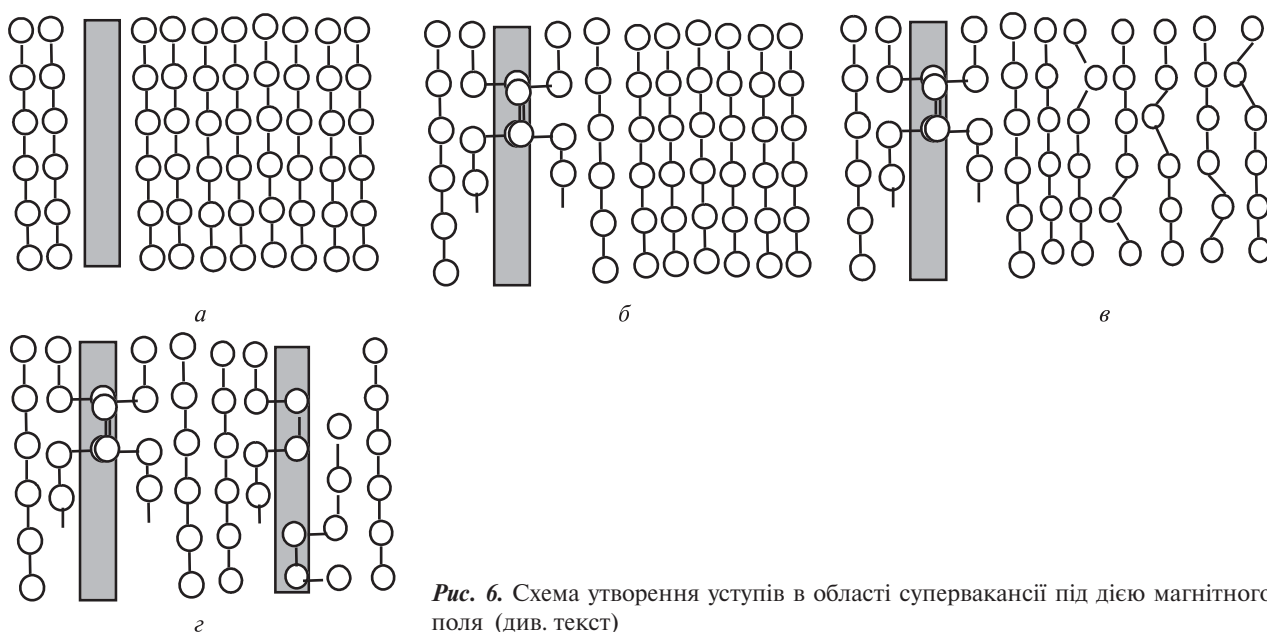


Рис. 6. Схема утворення уступів в області супервакансії під дією магнітного поля (див. текст)

вище S_1 і визначається формулою [16]

$$S_2 = 1.3\mu k, \quad (5)$$

де μ — кількість уступів (петель) у ланцюзі.

Таким чином, значення ентропії визначається кількістю і конфігурацією уступів в області супервакансії. Як вже було вказано, виникнення і форма уступу залежить від причини утворення і характеру поширення солітонів. Відмінності у зміні швидкості ширини полум'я при зміні індукції постійного магнітного поля свідчать про утворення різних для цих умов солітонів. Проте механізм утворення уступів при плавленні кристалів *n*-парафінів буде ідентичним для різних

значень індукції магнітного поля. Відмінності полягатимуть лише в діапазоні кута розвороту ділянки ланцюга.

На рис. 5, 6 зображено схеми утворення уступів у ланцюзі, сусідньому з супервакансією як для систем, де немає магнітного поля, так і для систем у магнітному полі. На рис. 6, *a*, *б* показано схему утворення супервакансій, вже наявних у системі до початку нагрівання. Рис. 6, *в* відповідає подальшому утворенню супервакансій під дією нагрівання.

Під дією магнітного поля змінюється механізм утворення уступів. Як було вказано раніше, для молекул *n*-парафінів було виявлено наявність

дипольного моменту [3, 4]. Таким чином, схема плавлення може виглядати як це показано на рис. 6. Для подібної схеми характерна наявність додаткового проміжного етапу. Як видно, при дії магнітного поля у процесі плавлення в системі відбувається формування нового типу дефектів за рахунок зміни величини кута розвороту окремих ділянок ланцюга (рис. 6, в). При деякому розташуванні цих ділянок виникає можливість формування додаткової дефектної області неврегульованого матеріалу різної геометрії (рис. 6, г), що складається з різних областей. Величина цих областей визначається взаємодією між диполями і перерозподілом водневих зв'язків [27].

ВИСНОВКИ

Однією із обставин, що визначають величину коефіцієнта регресії, є наявність вихрових зон на поверхні розплаву, утворення яких залежить від солітонного обертого руху ланцюгів у процесі плавлення. Утворення солітонів змінює стан розплавленого шару, впливаючи на параметр β в рівнянні [1], значення якого і враховує коефіцієнт регресії a .

Застосування магнітного поля при підготовці парафіноподібного палива призводить до зміни його структури за рахунок змін конфігурацій ланцюгів. Спалювання такого паливного заряду, на наш погляд, стабілізує перенесення окремих крапель з поверхні розплаву в зону горіння і сприяє інтенсифікації процесу горіння.

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. *Ассовский И. Г.* Физика горения и внутренняя баллистика. — М.: Наука, 2005. — 348 с.
3. *Ашеко А. А.* Электрические диполи молекул насыщенных углеводородов с открытой цепью в газовой фазе // *Вісник Харків. ун-ту. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля»*. — 1998. — № 421. — С. 114—117.
4. *Бабенко В. В., Турик В. Н.* Макет вихревых структур теснения в вихревой камере // *Прикладна гідромеханіка*. — 2008. — 10, № 3. — С. 3—9.
5. *Бахман Н. И., Беляев А. Ф.* Горение гетерогенных конденсированных систем. — М.: Наука, 1967. — 222 с.
6. *Булавин Л. А., Актан О. Ю., Забашта Ю. Ф.* Измерение модуля сдвига в процессе плавления // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. — 2012. — 48, № 4. — С. 56—59.
7. *Булавин Л. А., Актан О. Ю., Забашта Ю. Ф.* Рівняння стану полімерних кристалів // *Укр. фіз. журн.* — 2001. — № 11. — С. 1158—1162.
8. *Булаф Р., Кодри Ф.* Солитоны / Пер. с англ. — М: Мир, 1983. — 408 с.
9. *Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р.* Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперимента, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. — М.: Физматлит, 2006. — 352 с.
10. *Вергун Л. Ю., Черняк В. Я., Недибалюк О. А.* та ін. Конформаційні зміни в структурі твердого парафінового палива на початковому етапі його спалювання // *Космічна наука і технологія*. — 2013. — 5, № 5. — С. 73—79.
11. *Лоскутова Ю. В., Прозорова И. В., Юдина Н. В.* Аномалии реологических свойств нефтей в магнитном поле // *Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности: Сб. статей / Под ред. А. К. Хорькова*. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. — С. 183—188.
12. *Лоскутова Ю. В., Юдина Н. В., Писарева С. И. и др.* Реологические свойства высоковязких и парафинистых нефтей в магнитном поле // *Матер. IV Междунар. конф. «Химия нефти и газа»*. — Томск, 2000. — Т. 1. — С. 474—478.
13. *Талантов А. В.* Основы теории горения. — Казань: Ротапринт, 1975. — 249 с.
14. *Френкель Я. И.* Кинетическая теория жидкостей. — Л.: Наука, 1975. — 592 с.
15. *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.
16. *Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F.* Vacancies in folded polymer crystals // *Polymer Sci. Ser. A*. — 2002. — 44, N 9. — P. 980—985.
17. *Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Lazarenko M. M.* The mechanism of melting of lamellar crystals with the branched chains // *Ukr. J. Phys.* — 2005. — N 9. — P. 952—957.
18. *Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F.* The statistical theory of melting of folded crystals containing vacancies // *Polymer Sci. Ser. A*. — 2003. — 45, N 10. — P. 1007—1010.
19. *Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F.* Formation of a mesomorphic phase upon melting of folded crystals containing vacancies // *Polymer Sci. Ser. B*. — 2005. — 47, N 3-4. — P. 109—113.
20. *de Gennes P.-G.* Scaling concepts in polymer physics. — Oxford: Cornell Univ. Press, 1979. — 368 p.
21. *Etkin V.* Thermokinetics (synthesis of heat engineering theoretical grounds). — Haifa, 2010. — 334 p.
22. *Karabeyoglu A., Zilliac G., Cantwell B. J., et al.* Scale-up tests of high regression rate paraffin-based hybrid rocket

- fuels // *J. Propulsion and Power*. — 2004. — **20**, N 6. — P. 1037—1045.
23. Nedybaliuk O. A., Chernyak V. Ya., Martish E. V., et al. Plasma assisted combustion of paraffin mixtures // *Probs Atomic Sci. and Technology*. — 2013. — **1**, N 83. — P. 219—221.
 24. Nedybaliuk O. A., Solomenko O. V., Chernyak V. Ya., et al. Peculiarities of Plasma Assisted Stearine Combustion // *Phys. Rev. and Res. International*. — 2013. — **3**, N 4. — P. 522—529.
 25. Sutton G., Biblaz O. Rocket Propulsion Elements. — 7th Edition. — New York: John-Wiley & Sons, 2001. — 751 p.
 26. Watanabe K., et al. Cryogen-free hybrid magnet for magnetic levitation // *Phys. C*. — 2003. — N 386. — P. 485—489.
 27. Wunderlich B., Möller M., Grebowicz J., et al. Conformational Motion and Disorder in Low and High Molecular Mass Crystals. — Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 1988. — 121 p.
- Стаття надійшла до редакції 28.05.15
- #### 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. Assovskiy I. G. Physics of Combustion and Interior Ballistics [Fizika gorenija i vnutrennjaja ballistika], 348 p. (Nauka, Moscow, 2005) [in Russian].
 3. Asheko A. A. Electric dipoles molecules saturated open-chain hydrocarbons in the gaseous phase. *Visnyk Kharkiv. un-tu. Ser. fizychna: Jadra, chastynky, polja*, N 421, 114—117 (1998) [in Russian].
 4. Babenko V. V., Turik V. N. Breadboard model of vortical structures at flow in the vortical chamber. *Applied hydro-mechanics*, **10** (3), 3—9 (2008) [in Russian].
 5. Bahman N. I., Beljaev A. F. The burning of heterogeneous condensed systems, 222 p. (Nauka, Moscow, 1967) [in Russian].
 6. Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F. Measurement of the Shear Modulus in Melting. *Industrial Laboratory*, **78**(4), 56—59 (2012) [in Russian].
 7. Bulavin L. A., Aktan E. Yu., Zabashta Yu. F. The Equation of State of Polymer Crystals. *Ukr. J. Phys.*, **46** (11), 1158—1162 (2001) [in Ukrainian].
 8. Bullough R. K., Caudrey P. J. (Eds.) Solitons [Solitony], Transl. from Eng., 408 p. (Mir, Moscow, 1983) [in Russian].
 9. Warnatz J., Maas U., Dibble R. W. Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulations, experiments, pollutant formation, Transl. from Eng., 352 p. (Fizmatlit, Moscow, 2006) [in Russian].
 10. 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), 63—69 (2013) [in Ukrainian].
 11. Loskutova Ju. V., Prozorova I. V., Judina N. V. Abnormalities of the rheological properties of oils in a magnetic field. *Automation and information support of processes in the oil industry: Proceedings*, Ed. by A. K. Khor'kov, 183—188 (Izd-vo Tom. un-ta, Tomsk, 2000) [in Russian].
 12. Loskutova Ju. V., Judina N. V., Pisareva S. I., et al. The rheological properties of high-viscosity oils and paraffin in a magnetic field. *Mater. IV Int. confer. «Chemistry of Oil and Gas»*, Vol. 1, 474—478 (Tomsk, 2000) [in Russian].
 13. Talantov A. V. Fundamentals of the theory of combustion, 249 p. (Rotaprint, Kazan', 1975) [in Russian].
 14. Frenkel' Ja. I. Kinetic Theory of Liquids, 592 p. (Nauka, Leningrad, 1975) [in Russian].
 15. Shahparonov M. I., Asheko A. A., Usacheva T. M. Kinetics dielectrically observed processes of thermal motion in liquid alkanes. *Zhurn. fiz. himii*, **58** (11), 2746—2749 (1984) [in Russian].
 16. Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F. Vacancies in folded polymer crystals. *Polymer Sci. Ser. A*, **44** (9), 980—985 (2002).
 17. Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Lazarenko M. M. The mechanism of melting of lamellar crystals with the branched chains. *Ukr. J. Phys.*, N 9, 952—957 (2005).
 18. Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F. The statistical theory of melting of folded crystals containing vacancies. *Polymer Sci. Ser. A*, **45** (10), 1007—1010 (2003).
 19. Bulavin L. A., Aktan O. Yu., Zabashta Yu. F. Formation of a mesomorphic phase upon melting of folded crystals containing vacancies. *Polymer Sci. Ser. B*, **47** (3-4), 109—113 (2005).
 20. de Gennes P.-G. Scaling Concepts in Polymer Physics, 368 p. (Cornell Univ. Press, Oxford, 1979).
 21. Etkin V. Thermokinetics (Synthesis of Heat Engineering Theoretical Grounds), 334 p. (Haifa, 2010).
 22. Karabeyoglu A., Zilliac G., Cantwell B. J., et al. Scale-Up Tests of High Regression Rate Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels. *J. Propulsion and Power*, **20** (6), 1037—1045 (2004).
 23. Nedybaliuk O. A., Chernyak V. Ya., Martish E. V., et al. Plasma assisted combustion of paraffin mixtures. *Probs Atomic Sci. and Technology*, **1** (83), 219—221 (2013).
 24. Nedybaliuk O. A., Solomenko O. V., Chernyak V. Ya., et al. Peculiarities of Plasma Assisted Stearine Combustion. *Phys. Rev. and Res. International*, **3** (4), 522—529 (2013).
 25. Sutton G., Biblaz O. Rocket Propulsion Elements, 7th Edition, 751 p. (John-Wiley & Sons, New York, 2001).
 26. Watanabe K., et al. Cryogen-free hybrid magnet for magnetic levitation. *Phys. C*, N 386, 485—489 (2003).
 27. Wunderlich B., Möller M., Grebowicz J., et al. Conformational motion and disorder in low and high molecular mass crystals, 121 p. (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1988).

Л. Ю. Вэргун¹, В. Я. Черняк¹, С. Г. Орловская²,
О. А. Недибалюк¹, О. В. Соломенко¹, С. А. Попов³

¹ Киевский национальный университет
имени Тараса Шевченко

² Одесский национальный университет
имени И. И. Мечникова

³ Киевский национальный университет
имени Тараса Шевченко,
учебно-научный институт «Институт геологии»

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СВОЙСТВА ПАРАФИНОВЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ГИБРИДНЫХ РАКЕТ

Рассматривается вопрос об увеличении коэффициента регрессии парафиноподобного топлива в аэрокосмических установках. Предложена гипотеза о зависимости этой величины от изменения конформации цепей на поверхности расплавленного слоя. Также предложено использовать магнитное поле при подготовке топливного заряда. Сделан вывод о стабилизации переноса капель с поверхности парафиноподобного расплава в зону горения при использовании постоянного магнитного поля.

Ключевые слова: парафиноподобное топливо, коэффициент регрессии, магнитное поле.

*L. Yu. Vergun¹, V. Ya. Chernyak¹, S. G. Orlovskaya²,
O. A. Nedibalyuk¹, O. V. Solomenko¹, S. A. Popov³*

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv

² Odessa National I. I. Mechnikov University

³ Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THE PROPERTIES OF PARAFFIN BASED FUEL FOR HYBRID ROCKET ENGINES

We consider the question of increasing of paraffin based fuel regression rate. The hypothesis about dependence of these values from the change of chains conformation on surface of melt layer is advanced and use of magnetic field at the preparation of fuel charge is proposed. We conclude that a static magnetic field allows to stabilization of transfer droplets from paraffinic melt to combustions zone.

Key words: paraffin based fuel, regression rate coefficient, magnetic field.