

УДК 662.612:662.637.5

<https://doi.org/10.18524/0367-1631.2026.64.361470>**Назарчук Б. В.<sup>1</sup>, Німич А. В.<sup>2</sup>, Панченко Д. Ю.<sup>3</sup>, Шевчук В. Г.<sup>4</sup>, Сидоров О. Є.<sup>5</sup>**<sup>1,2,3,4</sup> Військова академія, м. Одеса<sup>5</sup> Одеський національний університет імені І. І. МечниковаE-mail: [shevchukoniph@gmail.com](mailto:shevchukoniph@gmail.com)ORCID iD: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5023-2094><sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3314-5356><sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4798-4719><sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0666-0539><sup>5</sup> <https://orcid.org/0009-0003-5555-7033>

## Експериментальне дослідження спалахування та горіння крапель суспензійних пальних

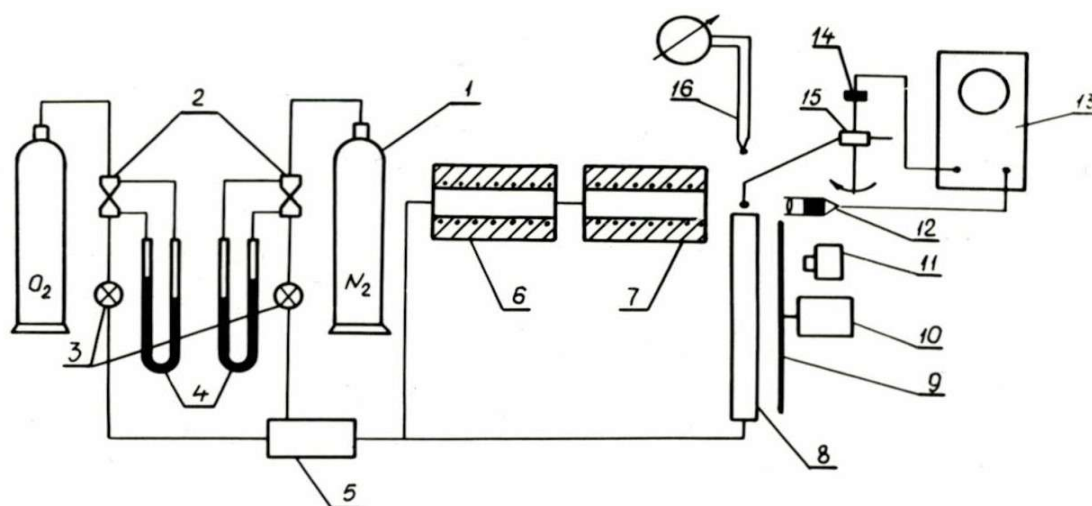
В роботі експериментально досліджено процес спалахування та горіння крапель суспензій порошкоподібного бору різної дисперсності (аморфного та кристалічного) і гасу (марки ТС-1). Показано двохстадійний процес — вигорання рідкої зв'язки і подальше спалахування і горіння твердого борного залишку. Виявлена аналогія процесів спалахування і горіння твердого залишку і штучних конгломератів бору. Запропонована методика розрахунку обох стадій горіння крапель суспензійного пального і показано, що повне перетворення за час менше 20 мс (що становить практичний інтерес), можливо для крапель діаметром не більше 50 мкм.

**Ключові слова:** суспензії, бор, крапля, спалахування, горіння.

Досягнення сучасних технологій виготовлення суспензій забезпечили можливість створення суспензійних пальних (СП) із вмістом конденсованої фази до 50% за масою і вище. Їх застосування може дозволити реалізувати переваги рідинної схеми подачі пального. Водночас очевидно, що при такому високому вмісті к-фази в СП процеси його розпилення та перетворення в камері згорання реактивного двигуна повинні мати суттєві специфічні особливості порівняно з рідкими пальними. Що стосується процесу перетворення, ці відмінності обумовлені насамперед значною різницею в часі затримки займання та горіння рідин, які реагують у паровій фазі, та твердих пальних, що реагують гетерогенно. Тому серед першочергових завдань, що виникають при визначенні принципової можливості та перспективності використання СП для двигунів різного призначення, є наступні: встановлення фізичної картини розвитку процесу перетворення, визначення критичних умов займання, а також часових характеристик спалахування та горіння залежно від виду твердого пального та параметрів рідкого пального і середовища.

В даній роботі в якості твердого пального вибрано бор як один із найбільш перспективних високоенергетичних компонентів в складі конденсованих ракетних пальних [1].





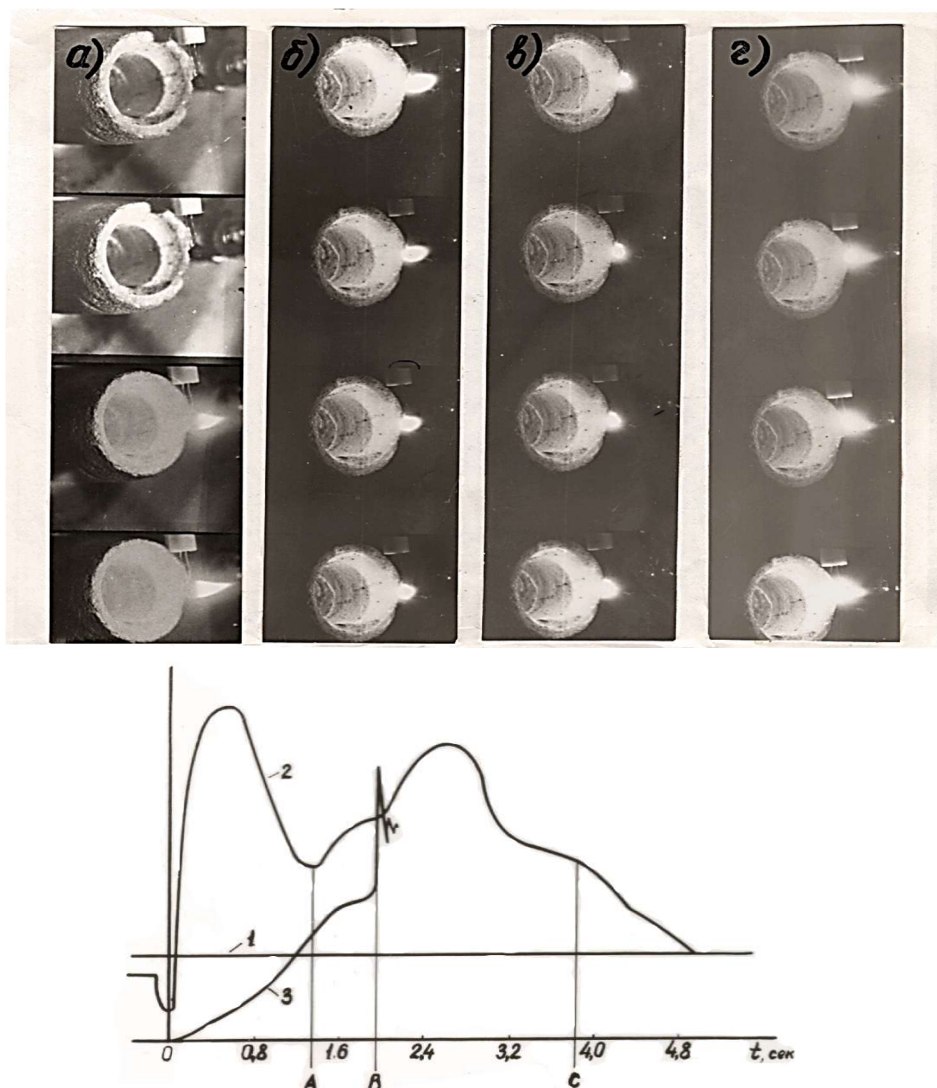
**Рис. 1** Принципова схема експериментальної установки.

1. газові балони; 2. газові крани; 3. газовий лічильник; 4. манометри; 5. змішувач газів; 6, 7. електричні печі; 8. реакційна труба; 10. обтюратор; 11. кінокамера; 12. фотодіод; 13. осцилограф; 15. система вводу крапель; 16. термопара.

Як показав досвід вивчення спалахування та горіння різних дисперсних систем бора [1-5], такі роботи доцільно починати з дослідження поодиноких крапель суспензій. В даній роботі наведено методику експериментів, результати досліджень критичних умов займання поодиноких крапель суспензій, що різняться вмістом і розмірами частинок бора в СП, та часів горіння крапель суспензії (50% бора + 50% гасу) в кисневмісних середовищах.

Експериментальне дослідження спалахування та горіння суспензійних пальних виконувалося за методом підвішеної краплі на установці, принципову схему якої наведено на рис. 1. Крапля суспензії вводилася в окислювальний газ, який прогрівався в електронагрівальних печах до максимальної температури  $T_{max} = 1280$  К. Система подачі газів дозволяла змінювати об'ємний вміст кисню в суміші  $O_2 + N_2$  у діапазоні  $m_{O_2\infty} = 0.05 \div 1.0$  з відносною похибкою 2%. Система реєстрації забезпечувала одночасну фіксацію світлового потоку від частинки на підвісі та газофазного факела зв'язки фотодіодом, температури центра краплі – хромель-алюмелевою термопарою з діаметром спаю  $d = 200$  мкм із записом на шлейфовий осцилограф, а також паралельну кінозйомку (швидкість зйомки до 48 кадр/с). Часи горіння визначалися за результатами кінозйомки процесу горіння крапель на підвісі та при їх падінні після перегорання підвісу у вертикальній трубі фотореєстратором із безперервною протяжкою плівки (швидкість протяжки 25 мм/с). У досліджах використовувалися краплі, діаметр яких лежав у діапазоні  $d_{ко} = 0.6 \div 2.0$  мм.

На рис. 2 представлено характерну реєстрограму процесу займання та горіння краплі суспензії, підвішеної на спаї термопари. Момент введення краплі у високотемпературний потік відповідає на осцилограмі (ОГ) різкому зменшенню сигналу від фотодіода (ФД) – крива 2. Після короткого ( $\tau \cong 0.2$  с) проміжку часу



**Рис. 2** Регістрограма процесу спалахування та горіння краплі суспензії (50% В+50% Т-б). Діаметр краплі  $d_k = 2$  мм.  $T_\infty = 1100$  К;  $m_{O_2\infty} = 0.4$ . Осцилограма: швидкість протяжки – 25 мм/с. Криві: 1 –  $T_\infty$ ; 2 – ФД; 3 – ТП. Кінограма – швидкість зйомки 32 кадр/с.

фотодіод фіксує різке збільшення світлового потоку, одночасно починається прогрів центра краплі (крива 2, 3 — точка О), а на кінограмі (КГ) поблизу краплі з'являється факел газофазного полум'я (кадри "а"). Вигорання вуглеводневої зв'язки, що супроводжується прогрівом твердого залишку, припиняється через  $\tau \approx 1.4$  с (ділянка ОА на осцилограмі, КГ – кадри "б"). Подальше збільшення температури залишку (ОГ – ділянка АВ, КГ – кадри "в") обумовлене виключно саморозігрівом ( $T_A > T_\infty$ ) і завершується його спалахуванням, тобто переходом процесу в самопідтримуваний високотемпературний режим (ОГ – точка В). Необхідно відзначити, що в усіх дослідах моменти закінчення вигорання зв'язки і спалахування конденсованого залишку були розділені помітним проміжком часу  $\tau_{з.в.}$ . Подальший аналіз кривої 3 на ОГ неможливий, так як термопара перегорає практично миттєво. Час горіння залишку (ОГ – ділянка ВС, КГ – кадри "г") легко визначити за показаннями фотодіода і кінограмі ( $\tau_r \approx 1.9$  с).

Такий характер розвитку процесу, типовий для всіх випадків, коли при зміні початкового діаметра краплі, складу горючого і параметрів окислювального газу були забезпечені умови, необхідні для інтенсивного горіння борного залишку, дозволяє сформулювати висновок про двостадійність горіння суспензійного пального.

Перша стадія включає в себе випаровування рідкої зв'язки, її запалення і горіння в газовій фазі. Друга стадія – запалення і горіння твердого залишку. Тобто час повного перетворення краплі суспензійного горючого складається з часу вигорання зв'язки, затримки запалення і горіння борного залишку.

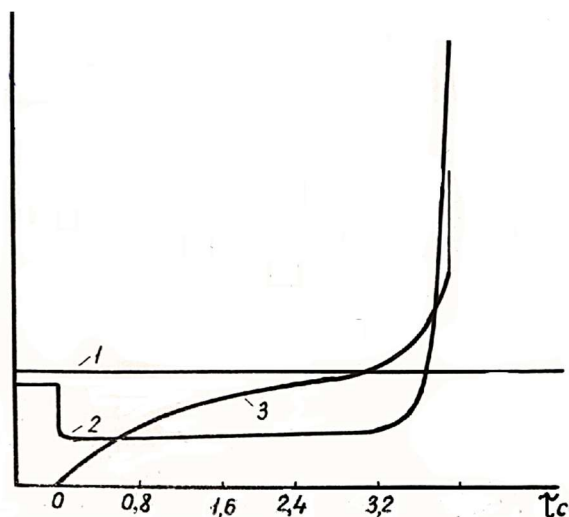
Кінозйомка крапель СП показала, що їхній розмір на стадії вигорання зв'язки в повітрі (або інертного випаровування в азоті) при температурах середовища до 1250 К не змінюється. Тому природно очікувати, що при цьому не змінюється і густина конденсованого залишку. Тоді першу стадію перетворення СП можна описати як процес дифузійного горіння рідкого палива, що випаровується з зовнішньої поверхні стаціонарної пористої частинки, а другу стадію моделювати запалюванням і горінням конгломерату частинок бора відповідної густини, скориставшись результатами досліджень, виконаних раніше (див., наприклад, [4]).

Для перевірки гіпотези про аналогію другої стадії горіння СП і процесів запалювання та горіння конгломератів частинок бору проводилося порівняння: 1) динамічних картин у передполум'яний період і критичних умов спалахування крапель вихідних суспензій і твердих залишків попередньо висушених в інертній атмосфері частинок СП і штучно приготованих конгломератів; 2) часів горіння борного залишку і конгломератів частинок бору. Критичними умовами спалахування крапель СП тут і надалі будемо називати такі параметри середовища, при яких забезпечувалося самопідтримуюче горіння твердої фази суспензії, оскільки саме вона є основним енергоносієм палива. Оскільки для всіх марок досліджених суспензій навіть при максимальній температурі, реалізованій на установці, спалахування в повітрі не спостерігалось, в досліді визначався мінімальний вміст кисню, необхідний для запалювання залишку.

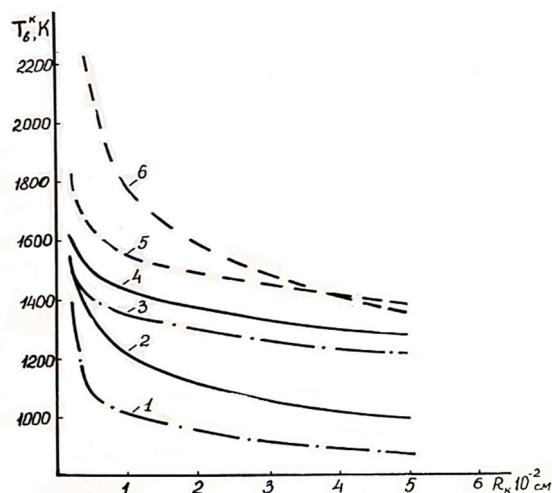
На рис. 3 наведено типовий вигляд осцилограми передполум'яного процесу для попередньо висушених крапель СП. Аналогічний вигляд має цей процес і для штучних конгломератів, які виготовлялися з тих же порошоків бору та гліцерину в якості зв'язки, котрий потім видалявся в процесі сушки.

Результати експериментального визначення критичних мольних вмістів кисню в середовищі, необхідних для спалахування, наведено в табл. 1. З таблиці випливає, що тепловиділення при згорянні зв'язки не змінює критичних умов запалювання залишків суспензій. (У надкритичних умовах теплопередача від газофазного факела зв'язки помітно скорочує час затримки запалювання борного залишку порівняно з попередньо висушеною краплею СП).

Причому ці умови незначно відрізняються від граничних концентрацій кисню, необхідних для запалювання конгломератів частинок бору. Дуже слабо впливає на параметри запалювання і дисперсний склад порошокоподібного бору, на основі якого приготувані суспензії і конгломерати. Все це дозволяє припустити, що, в першому наближенні, рівень критичних температур запалювання



**Рис. 3.** Осцилограма передспалахувального процесу: твердий залишок. ( $\rho = 0.6 \text{ г/см}^3$ ).  $d_k = 2 \text{ мм}$ .  $T_\infty = 1100 \text{ К}$ ;  $m_{O_2\infty} = 0.5$ . Криві: 1.  $T_\infty$ ; 2. ФД; 3. ТП.



**Рис. 4** Експериментальна залежність температури спалахування конгломерату частинки бору від його розміру в повітрі.  $\rho_k = 0.6$ ; теплове спалахування – криві 1, 2, 6. Термокінетичне спалахування – 3, 4, 5. Криві: 1, 3 –  $d_0 = 0.22 \text{ мкм}$ ; 5, 6 –  $d_0 = 10 \text{ мкм}$ ; 2, 4 – 20% з  $d_1 = 0.22 \text{ мкм}$  + 80% з  $d_2 = 10 \text{ мкм}$

може бути оцінений за даними розрахунку цих величин для конгломератів частинки бору відповідної густини.

На рис. 4 представлені розрахункові температури запалювання конгломератів, утворених сумішшю порошків бору двох фракцій — аморфного  $d_0 = 0.22 \text{ мкм}$  (20% за масою) і крупнодисперсного  $10 \text{ мкм}$  (80% за масою). Розрахунки виконані для двох граничних режимів запалювання: крива 2 — тепловий режим запалювання, коли порушення теплової рівноваги забезпечується накопиченням тепла при саморозігріві до початку помітного випаровування плівки оксиду бору, що покриває кожен частинку в конгломераті; крива 4 – термокінетичний режим спалахування, коли порушення процесу обумовлене одночасно тепловим і кінетичним (в результаті випаровування оксиду з усіх частинки, що становлять конгломерат) механізмами самоприскорення [6]. На цьому ж рисунку наведено критичні умови запалювання конгломератів частинки аморфного бору – криві 1, 3 – і крупнодисперсного бору – криві 5, 6. Співставлення груп кривих 1, 2, 6 і 3, 4, 5 свідчить про те, що і при тепловому, і при термокінетичному режимах спалахування конгломератів частинки біфракційного порошку бору визначається його дрібнодисперсною складовою. Рівень температур запалювання конгломератів у діапазоні розмірів, що становлять практичний інтерес, достатньо високий – критична температура для конгломератів розміром  $R_k = 25 \text{ мкм}$  лежить в інтервалі  $T_b = 1500 - 1600 \text{ К}$ , і різко зростає зі зменшенням їх діаметра, прагнучи до температур спалахування поодиноких частинки бору.

**Таблиця 1.** Характеристики СП та конгломератів частинок бору та критичні умови їх спалахування.

СП	№	Склад борної основи						
	1	$d_0 = 4.9 \text{ мкм} - 40\% + d_0 = 0.22 \text{ мкм} - 10\% + d_0 = 2.8 \text{ мкм} - 50\%$						
	2	$d_0 = 4.9 \text{ мкм} - 33.6\% + d_0 = 0.22 \text{ мкм} - 8.4\% + d_0 = 2.8 \text{ мкм} - 58\%$						
	3	$d_0 = 1 \text{ мкм} - 40\% + d_0 = 2.8 \text{ мкм} - 56\%$						
	4	$d_0 = 0.22 \text{ мкм} - 10\% + d_0 = 3.9 \text{ мкм} - 42\% + d_0 = 2.8 \text{ мкм} - 48\%$						
	5	$d_0 = 10 \text{ мкм} - 44\% + d_0 = 0.22 \text{ мкм} - 8\% + d_0 = 2.8 \text{ мкм} - 48\%$						
Конгломерати	1	$d_0 = 10 \text{ мкм} - 40\% + d_0 = 0.22 \text{ мкм} - 10\% + \text{гліцерин}$						
	2	$d_0 = 4.9 \text{ мкм} - 40\% + d_0 = 0.22 \text{ мкм} - 10\% + \text{гліцерин}$						
СП	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Конгломерати	
							№1	№2
Густина залишку	0.60	0.504	0.528	0.6	0.624	0.588	0.6	0.6
$T_{\infty}, \text{ К}$	1275	1275	1275	1100	1100	1100	1100	1100
$m_{O_2\infty}^{\text{кр}}(\text{СП})$	0.25	0.22	0.26	0.27	0.25	0.24	-	-
$m_{O_2}^{\text{кр}}(\text{залишок})$	0.25	0.22	0.27	0.27	0.25	0.24	0.28	0.25

Зупинимося тепер на способі розрахунку часу вигорання зв'язки на першій стадії горіння СП. Як уже відзначалося вище, такий розрахунок можна провести в припущенні про квазістаціонарне горіння рідкого горючого, що випаровується з поверхні пористої частинки постійного розміру. Спрощену оцінку часу випаровування зв'язки отримаємо із запису рівняння теплового балансу для краплі суспензії:

$$J_{\text{св}} (\Delta H_{\text{вип}} + C_p (T - T_k)) = 4\pi r^2 \lambda \frac{dT}{dr} \tag{1.1}$$

Інтегрування цього рівняння в межах приведеної плівки дає:

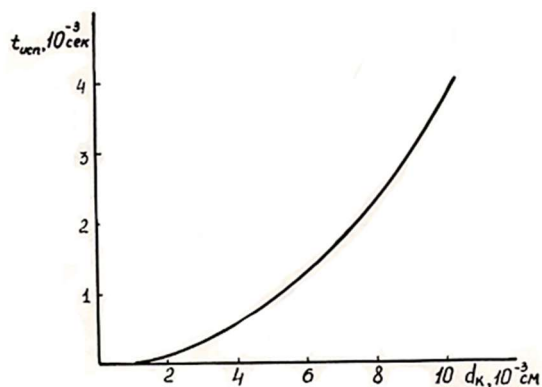
$$\tau_{\text{вип}} = \frac{\kappa_{\text{св}} \rho_{\text{с}} C_p}{6 Nu \lambda \ln(1 - \frac{C_p (T_{\infty} - T_k)}{\Delta H_{\text{вип}}})} d_k^2,$$

де  $J_{\text{св}}$ ,  $\Delta H_{\text{вип}}$ ,  $C_p$ ,  $\kappa_{\text{св}}$  – мольний потік, теплота випаровування, теплоємність та масова доля зв'язки відповідно;  $\rho_{\text{с}}$  – густина суспензії;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності газу;  $Nu$  – число Нуссельта;  $T_{\infty}$  – температура середовища;  $T_k$  – температура кипіння зв'язуючого;  $d_k$  – діаметр краплі.

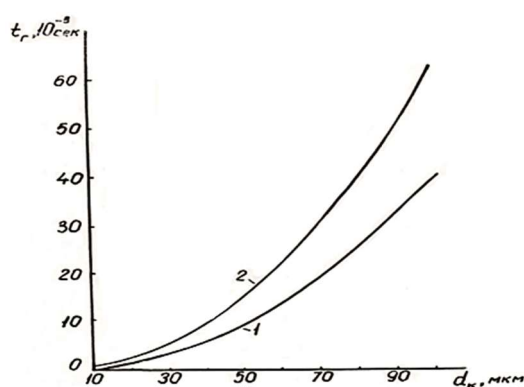
Розрахунковий час випаровування зв'язки з краплі суспензії діаметром  $d_k = 2 \text{ мм}$  становить для умов наших дослідів  $\tau_{\text{вип}} = 1.46 \text{ с}$ , що достатньо близько до експерименту (див. рис. 5).

Рис. 5 ілюструє часи випаровування для крапель суспензії малих розмірів. Як бачимо, час першої стадії вигорання СП (складної гранули) квадратично залежить від розміру крапель і може давати значний внесок у сумарний час перетворення суспензії.

На завершення наведемо результати дослідів із визначення часів горіння конденсованого залишку СП та конгломератів частинок бору (див. табл. 2). Порівняння відносних часів горіння «сухих» залишків і конгломератів між собою



**Рис. 5** Розрахункова залежність часу випаровування зв'язки від діаметра краплі суспензії:  $T_{\infty} = 1100 \text{ K}$ ;  $\kappa_{\text{СВ}} = 0.5$ ;  $\rho_{\text{с}} = 1.2 \text{ г/см}^3$ .



**Рис. 6** Розрахункова залежність часу горіння конгломерату частинок бору від його діаметра:  $T_{\infty} = 1500 \text{ K}$ ,  $m_{\text{O}_2\infty} = 0.21$ ; 1.  $\rho = 0.6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ; 2.  $\rho = 2.34 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$

**Таблиця 2.** Час горіння крапель суспензій та конгломератів.

$m_{\text{O}_2\infty}$	$\tau_r/d_{\text{к0}}^2, \text{с/мм}^2$			
	експеримент			розрахунок
	СП №1	конгломерати		конгломерати
0.8	$1.637 \pm 0.04$	$d_0 = 4.9 \text{ мкм}$	$d_0 = 10 \text{ мкм}$	1.750
		$1.67 \pm 0.08$	$1.68 \pm 0.09$	
1.0	$1.332 \pm 0.05$	$1.317 \pm 0.015$	$1.391 \pm 0.08$	1.280

Примітка. Значення часу горіння, наведені в табл. 2, розраховані в припущенні, що конгломерат частинок бору сплавляється в монолітну краплю.

та з результатами розрахунку цих часів для конгломератів частинок за дифузійною газофазною моделлю горіння бору [5] дозволяє відзначити їхню добру узгодженість.

Тому часи горіння конденсованої фази дрібних крапель суспензії можна оцінити, скориставшись результатами розрахунку інтенсивного горіння конгломератів частинок за моделлю газофазного горіння бору [6]. На рис. 6 нанесено розрахункові часи горіння конгломератів частинок бору в повітрі, отримані за двома припущеннями: перше – при горінні конгломерата його густина не змінюється – крива 1, і друге – після запалювання конгломерат сплавляється в монолітну краплю – крива 2. Природно очікувати, що зі зменшенням розміру конгломерата ймовірність його сплавлення зростає. Крім того, часи горіння краплі бору становлять собою оцінку зверху. З рисунка випливає, що часи горіння конгломератів реальних розмірів достатньо високі. Тому при жорстких вимогах до часу перебування горючого в камері згорання потрібна така організація подачі СП, при якій розмір крапель у розпилі був би обмежений зверху. Так, для крапель суспензії діаметром 50 мкм розрахункове сумарний час вигорання зв'язки та твердого залишку становить  $\tau = 16.5 \text{ мс}$ . Необхідно враховувати також, що зі змен-

шенням розміру конденсованого залишку зростає температура його запалювання, а, отже, і вклад часу затримки спалахування к-фази в загальний час перетворення.

Таким чином, для реалізації ефективного спалювання суспензійних горючих на основі бору в камерах реактивних двигунів необхідний цілеспрямований систематичний пошук шляхів управління окремими стадіями процесу [7-11], в тому числі подачею горючого, спалахуванням та горінням зв'язуючого та конденсованого залишку.

### Література

1. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. Издательство МГТУ им. Н.С. Баумана, 2009, 431с.
2. Полищук Д.И., Золотко А.Н., Шевчук В.Г. О воспламенении частиц бору. *Arhivum Thermodynamiki I Spalania*. 1976, v.7, №1, p.82-87.
3. Zolotko, A.N., Klyachko, L.A., Kopeika, K.M. et al. Critical ignition conditions for boron particles suspended in a gas. *Combust Explos Shock Waves* **13**, 31–36 (1977). <https://doi.org/10.1007/BF00756014>
4. Shevchuk, V.G., Zolotko, A.N. & Polishchuk, D.I. Ignition of packed boron particles. *Combust Explos Shock Waves* **11**, 189–192 (1975). <https://doi.org/10.1007/BF00756716>
5. Vovchuk, Y.I., Zolotko, A.N., Klyachko, L.A. et al. High-temperature combustion of an immobile boron particle in an oxygen-bearing medium. *Combust Explos Shock Waves* **11**, 471–476 (1975). <https://doi.org/10.1007/BF00744913>
6. Клячко Л.А., Яковлева Т.А., Золотко А.Н. Время горения частиц бору с учетом влияния диффузионного и кинетического факторов.- В сб. горение конденсированных систем. Черногоровка, 1972.
7. Goroshin S.V., Ageev N.D., Shoshin J.L., Shevchuk V.G. The Premixed Laminar flames in the boron dust clouds // *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 1993. v.2, P.469-477. DOI:10.1615/INTJENERGETICMATERIALSCHEMPROP.V2.I1-6.290
8. Горліченко, М. Г., Шевчук, В. Г., Німич, А. В., Полищук, Д. Д. (2023). Низькотемпературне хлорування бору. *Фізика аеродисперсних систем*, (61), 89–92. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.291124>
9. Bulanin, F.K., Sidorov, A.E., Poletaev, N.I. et al. Augmentation of Aluminum and Boron Ignition. *Combust Explos Shock Waves* **57**, 190–195 (2021). <https://doi.org/10.1134/S0010508221020076>
10. Boichuk, L.V., Shevchuk, V.G., Shvets, A.I. Flame Propagation in Two-Component Aluminum–Boron Gas Suspensions. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* **38**, 651–654 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1021136126730>
11. Калінчак, В. В., Черненко, О. С., Конійка, О. К. (2023). Критичні умови займання частинок бора в хлорі. *Фізика аеродисперсних систем*, (61), 93–101. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.291126>

Дата надходження: 11.01.2026

Дата прийняття до друку: 17.04.2026

Дата публікації: 28.05.2026

***B. V. Nazarchuk, A. V. Nimych, D. Yu. Panchenko., V. G. Shevchuk, O. Ye. Sydorov***

## **Experimental study of ignition and combustion of slurry fuel droplets**

### **Summary**

*The paper presents an experimental investigation of the ignition and combustion processes of droplets of slurry fuels based on powdered boron of different particle sizes and structures (amorphous and crystalline) mixed with kerosene fuel TS-1. A two-stage combustion process was observed, including the burnout of the liquid binder followed by the ignition and combustion of the solid boron residue. An analogy between the ignition and combustion processes of the solid residue and artificially prepared boron conglomerates was established. A calculation procedure for both combustion stages of slurry fuel droplets is proposed. It is shown that complete conversion within less than 20 ms, which is of practical interest, is achievable for droplets with diameters not exceeding 50  $\mu\text{m}$ .*

**Keywords:** *slurry fuels, boron, droplet, ignition, combustion.*