



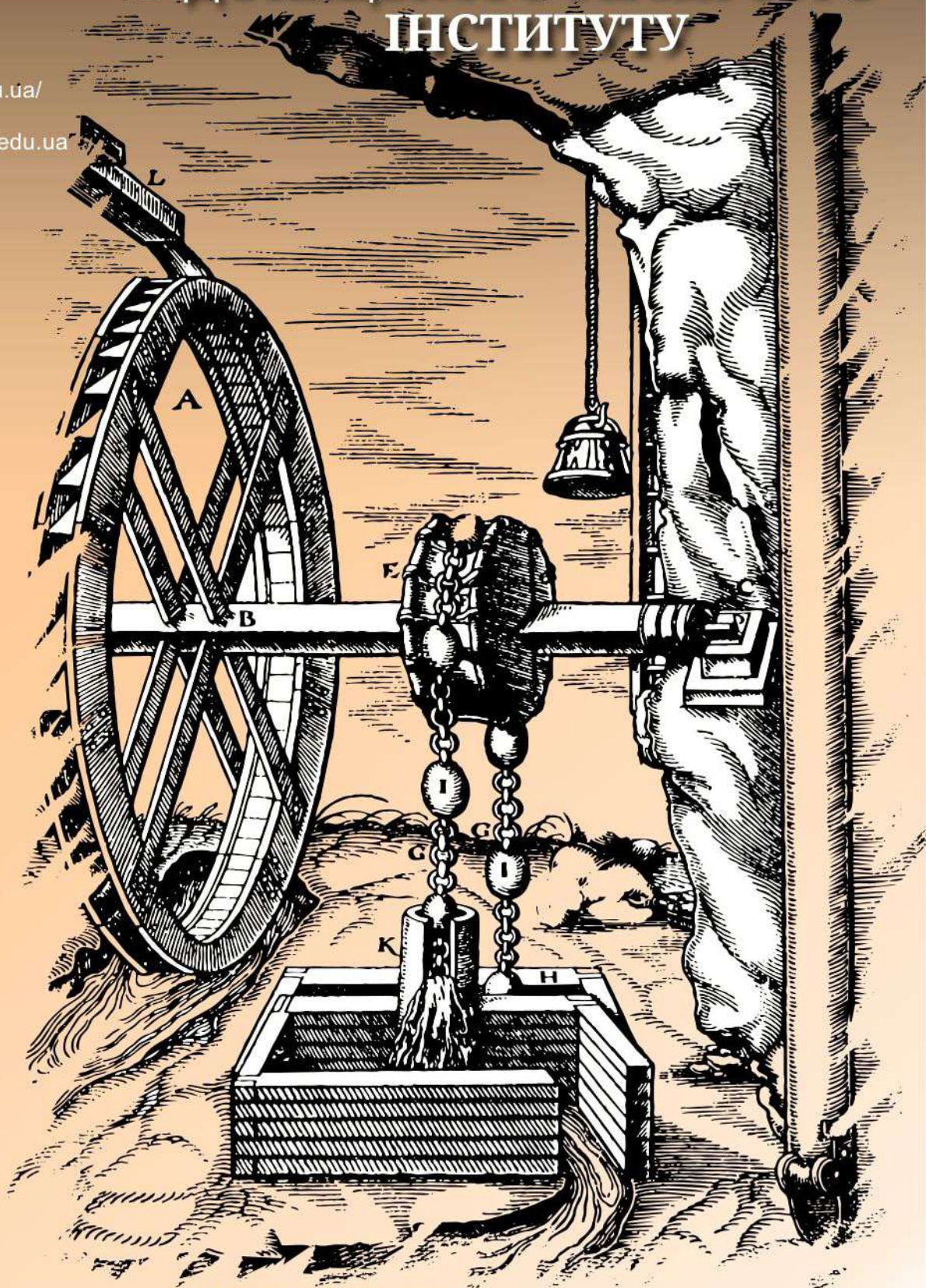
ВІСТІ

82111, Україна
Львівська область
м. Дрогобич
вул. Самбірська, 76

<http://jdmi.donntu.edu.ua/>

e-mail: visti@donntu.edu.ua

ДОНЕЦЬКОГО ГІРНИЧОГО ІНСТИТУТУ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ВІСТІ

ДОНЕЦЬКОГО ГІРНИЧОГО ІНСТИТУТУ

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Виходить 2 рази на рік

Заснований у липні 1995 року

1 (56)' 2025

В журналі публікуються наукові статті за результатами досліджень і розробок в галузі технічних наук. Журнал розрахований на наукових співробітників, інженерно-технічних робітників підприємств, проектних організацій, навчальних та науково-дослідних інститутів, докторантів та аспірантів.

Засновник та видавець – Донецький національний технічний університет

Головний редактор: С.В. Подкопаєв, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна).

Заступник головного редактора: Д.А. Чепіга, канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна).

Відповідальний секретар: О.О. Ісаєнков, доцент кафедри, канд. техн. наук (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна).

Англомовний редактор: М.М. Кабанець, д-р. пед. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна).

Міжнародна редакційна колегія: R. M. Bhattacharjee, Professor (Indian Institute of Technology, Dhanbad Jharkhand, India); Nestor Oszczypko, Professor, Dr of Sciences (Institute of Geological Sciences Jagellonian University, Krakow, Poland); Józef Parchański, Prof. Dr.-Ing., Dr.h.c. (Politechnika Śląska, Gliwice, Poland); Andrzej Solecki, Professor, Dr of Sciences (Institute of Geological Sciences Wrocław University, Wrocław, Poland); Upendra Kumar Singh, Professor (Indian Institute of Technology, Dhanbad Jharkhand, India).

Національна редакційна колегія: В.І. Альохін, д-р геолог. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); Б.В. Болібрех, д-р техн. наук, проф. (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна); І.М. Бубняк, канд. геол. наук, доц. (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна); С.М. Гапєєв, д-р техн. наук, доц. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна); В.А. Глива, д-р техн. наук, проф. (Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна); В.Б. Гого, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); І.О. Єфремов, д-р техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); О.Е. Кіпко, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); В.К. Костенко, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); Я.О. Ляшок, д-р економ. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); А.В. Мерзлікін, канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); С.П. Мінеєв, д-р техн. наук, проф. (Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова, м. Дніпро, Україна); С.Г. Негрій, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); Т.О. Негрій, канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Київський національний університет будівництва і архітектури», м. Київ, Україна); М.В. Петльований, канд. техн. наук, доц. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна); І.О. Садовенко, д-р техн. наук, проф. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна); І.Г. Сахно, д-р техн. наук, проф. (ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя, Україна); А.Є. Скірда, канд. пед. наук, доц. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); Н.Ю. Ляшок, канд. ек. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна); С.В. Сукач, д-р техн. наук, проф. (Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна); О.В. Третьяков, д-р техн. наук, проф. (Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна); О.М. Шашенко, д-р техн. наук, проф. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна); С.І. Чеберячко, д-р техн. наук, проф. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна).

Технічні редактори: А.В. Петренко (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, Україна).

Журнал «Вісті Донецького гірничого інституту» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (технічні науки)», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, наказ №374 від 13 березня 2017 р.

Журнал «Вісті Донецького гірничого інституту» внесено до категорії “Б” “Переліку наукових фахових видань України”, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук за спеціальностями 184–“Гірництво” та 263–“Цивільна безпека” (рішення Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, наказ №975 від 11 липня 2019 р. Діє з 11.07.2019 р.)

Журнал зареєстрований в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідчення: серія КВ, №7378 від 03.06.2003.

Електронна версія журналу зберігається у [Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського](#), внесено до [Національного репозитарію академічних текстів](#). Журнал індексується у загальнодержавній базі даних «Україніка наукова», а також у міжнародних наукометричних базах даних: [Index Copernicus](#), [Citefactor](#), [International Society for Research Activity \(ISRA\) Journal Impact Factor \(JIF\)](#), [International Accreditation and Research Council \(IARC\)](#), [Root Society for Indexing and Impact Factor, Service \(Rootindexing\)](#), [General Impact Factor \(GIF\)](#), [Academic Resource Index \(ResearchBib\)](#).



ЗМІСТ**Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В.**

Методика випробування гірських порід на тріщиностійкість при повздовжньому зсуві 9

Сахно С.В., Завгородня Л.С., Булич О.С., Кирсанов О.Л.

Оцінка асиметричності і неоднорідності втрати стійкості конвеєрних штреків ПрАТ ш/у Покровське на всіх етапах їх експлуатації 15

Holinko V.I., Zgersky R.A.

Analysis of the influence of psychophysiological factors on individual occupational risk of mining enterprises workers 25

**Ковбаса В. О., Кириченко О.В., Купенко М.А., Ващенко В.А.,
Березовський А.І., Школяр Є.В., Мотрічук Р.Б.**

Дослідження механізму та розробка моделей розвитку процесу горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей металевих палив з фторопластами в умовах зовнішніх термічних впливів 31

Власов С. Ф., Молдаванов Є. В., Власов В. С.

Вплив запропонованих заходів щодо моніторингу, попередження, а також ліквідації аварійного стану механізованого кріплення на економічну стійкість вугледобувних підприємств 47

Сидоренко А.А., Микитенко С.В.

Аналіз питомого споживання електроенергії при дисковому різанні гранітів різної твердості 57

Мінєєв С.П., Янжула О.С., Прусова А.А., Чорний С.М., Григоренко В.М.

Відкриття вибухозахищених перемичок при розгазуванні після гасіння шахтної пожежи 66

Руднєв Є.С.

Мікропори викопного вугілля та небезпечні властивості шахтопластів при веденні гірничих робіт 75

Григор'єв Ю.І., Луценко С.О., Жуков С.О., Григор'єв І.Є.

Ретроспективно-каузальний аналіз функціонування кар'єрів як основа розробки адаптивної моделі управління регіональним гірничодобувним кластером 81

Мерзлікін А.В., Назимко В.В., Єфремов І.О.

Закономірності зміни гірського тиску при безцілоковому відпрацюванні запасів в зоні регіонального розвантаження 94

Уряднікова І.В.

Інтегративний підхід до оцінки безпеки систем водоочищення 103

Бочковський А.П., Сапожнікова Н.Ю., Пуріч В.М.

Концепція моделі управління ризиком виникнення стану втоми на робочих місцях та контролю такого стану працівників під час здійснення заходів з державного регулювання та експертизи діяльності підприємств 112

Бачурін Л.Л., Бачуріна Я.П., Подкопаєв С.В.

Щодо застосування підземних допоміжних вентиляторних установок у вугільних шахтах 127

Подкопаєв С.В., Бачурін Л.Л., Чепіга Д.А., Бачуріна Я.П., Підгурна О.Ю., Полій Д.В., Вісин О.О.

Вплив деформації литої смуги на стійкість підготовчої виробки 134

Хорольський А.О.

Результати моделювання виробничих показників та кластеризація малопотужних вугільних шахт в умовах доробки запасів 144

УДК 614.841:536.46

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2025-1-31-46>

В. О. Ковбаса
О.В. Кириченко
М.А. Куценко
В.А. Ващенко
А.І. Березовський
Є.В. Школяр
Р.Б. Мотрічук

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ТА РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ДВОКОМПОНЕНТНИХ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ З ФТОРОПЛАСТАМИ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ВПЛИВІВ

Мета дослідження є встановлення механізму горіння ущільнених двокомпонентних сумішей, що включають металеві пални та фторопласти. Важливим аспектом роботи є розробка моделі цього процесу, яка дозволяє точно визначати критичні діапазони зміни ШВИДКОСТІ горіння таких сумішей під впливом зовнішніх теплових умов.

Методи. Для проведення досліджень було застосовано відомі методи фізико-хімічного аналізу, зокрема контактні та безконтактні способи вимірювання температури, а також швидкісну мікрокіномію процесів горіння. Застосовувались також методи математичного моделювання, чисельно-аналітичні методи для вирішення рівнянь тепло- та масопереносу, хімічної кінетики, а також методи математичної статистики, використовуючи стандартне програмне забезпечення для сучасних чисельних методів. Відносна похибка вимірювань основних характеристик горіння сумішей (температури продуктів горіння сумішей, швидкість горіння та ін.) у зазначених умовах не перевищувала 6...8 %.

Результати. Зовнішні термічні впливи на поверхні корпусів виробів із зарядами досліджуваних сумішей під час зберігання, транспортування, пострілу та польоту можуть призводити до значного нагрівання їх корпусів. Це нагрівання спричиняє розвиток вибухонебезпечного процесу горіння заряду суміші при підвищених температурах та тисках зовнішнього середовища. Це є основною причиною прискорення процесу горіння, передчасного спрацювання виробу та його пожежонебезпечного руйнування. Тому на стадії проектування та стендових випробувань, які моделюють ці зовнішні термічні впливи, важливо визначати критичні діапазони змін швидкості горіння зарядів сумішей, перевищення яких призводить до пожежовибухонебезпечного руйнування виробів в екстремальних умовах експлуатації.

Наукова новизна дослідження полягає у встановленні механізму горіння двокомпонентних сумішей, що складаються з порошків металевих пальних та фторопластів. Виявлено, що процес перетворення таких сумішей у продукти згорання має стаціонарний і одновимірний характер та відбувається у трьох чітко визначених зонах: прогрітий шар у конденсованій фазі суміші, реакційна зона конденсованої фази суміші, зона полум'я, яка є основною зоною тепловиділення у газовій фазі. Розроблена модель горіння двокомпонентних сумішей враховує кінетичні характеристики термічного розкладання фторопластів, а також високотемпературне окиснення, займання та горіння металевих частинок у продуктах розкладання. Це дозволило досягти підвищеної точності визначення критичних діапазонів змін швидкості горіння, знизивши відносну похибку до 6–8% порівняно з 10–12% у попередніх моделях. Встановлення таких критичних меж є важливим для контролю процесу горіння під впливом зовнішніх термічних дій. Перевищення цих меж може призвести до значного прискорення процесу горіння, що, у свою чергу, підвищує ризик пожежовибухонебезпечного руйнування піротехнічних виробів.

Практична значимість. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, отримані у вигляді математичних моделей та бази експериментальних даних, дозволяють оптимізувати технологічні параметри (співвідношення компонентів, дисперсність металевих пальних, природа металу та окиснювача) на стадії виготовлення виробів, збільшуючи температуру їх займання та знижуючи ймовірність пожежовибухонебезпечних руйнувань під час зберігання та транспортування. Під час запуску виробів, оптимізуючи швидкості і кути, під якими вони вистрілюються, можна знижувати температуру нагріву металевих оболонок зарядів сумішей та зменшувати кількість передчасних вибухонебезпечних руйнувань під час пострілу і польоту.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні металізовані суміші на основі фторопластів, термічні дії, процеси горіння, моделі горіння конденсованих систем.

Вступ.

Нині ущільненні суміші з порошків металевих пальних (Mg, Al та ін.) та фторопластів (Ф – 3, Ф – 4 та ін.) широко

використовуються у піротехнічних виробках різного призначення (запалювальні суміші для патронів та снарядів, трасерів тверді ракетні палива, елементи аерокосмічної

техніки та ін.). З кожним роком зростає кількість пожеж та вибухів у процесі обігу досліджуваних виробів (при зберіганні, транспортуванні та ін.), що призводить до руйнування об'єктів, травмування та загибелі людей, значних матеріальних збитків [1 – 4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Аналіз зазначених випадків показує, що займанню та подальшому пожежовибухонебезпечному руйнуванню виробів передують зовнішні термічні впливи, яким вони піддаються (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, в умовах їх транспортування, при ударних термовпливах в умовах пострілу та польоту виробів при їх запусках та ін.) [1, 2, 6]. Це призводить до передчасного займання та вибухонебезпечного розвитку горіння сумішей, що входять до складу виробів, і подальших пожежонебезпечних їх руйнувань. Тому велике практичне значення має запобігання вимушених передчасних пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій.

На сьогодні достатньо докладно досліджено механізм та розроблено моделі горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей (ущільнених сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, алюмінієво-магнієвих сплавів, Ti, Zr та ін.), нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Sr(NO}_3)_2$ та ін.), оксидів металів оксидів металів та добавок органічних та неорганічних речовин) [7 – 14]. Встановлено наступні особливості процесу горіння зазначених сумішей [3-5, 15].

Процес горіння протікає у трьох найбільш характерних зонах (у к-фазі, на поверхні розділу фаз та у зоні полум'я). Дослідження продемонстрували, що під час горіння двокомпонентних сумішей, які містять кисневмісні окиснювачі, на поверхні утворюється агломерація (укрупнення) металевих частинок внаслідок їх спікання, після чого вони повністю згорають. Для визначення теплового потоку із зони полум'я було застосовано добре відомий метод теплового потоку, який дозволив детально оцінити передачу енергії під час горіння.

Розроблені моделі горіння забезпечили точність із похибкою 10–12% і дозволили встановити залежність швидкості горіння сумішей від низки технологічних параметрів,

таких як співвідношення компонентів, їх дисперсність, тощо, а також від зовнішніх умов, таких як температура нагріву, склад і тиск навколишнього середовища. Визначено критичні діапазони швидкості горіння, перевищення яких призводить до вибухового прискорення процесу та підвищення пожежонебезпечності. У таких випадках піротехнічні вироби на основі подібних сумішей можуть зазнати руйнування в екстремальних умовах експлуатації.

Стосовно досліджуваних сумішей металеве палине + фторопласт, нині зазначені вище дослідження для них відсутні.

Мета статті (постановка завдання)

Мета роботи: встановлення механізму горіння двокомпонентних ущільнених з металевих палих та фторопластів, розробка моделі їх горіння для визначення критичних діапазонів зміни швидкості горіння сумішей в умовах впливу зовнішніх термічних дій.

Задачами досліджень є:

- аналіз експериментальних даних по фізико-хімічним процесам, що протікають у різних зонах горіння сумішей та встановлення механізму їх горіння;
- отримання рівнянь для розрахунку швидкості горіння сумішей та визначення її критичних значень в умовах зовнішніх термічних дій.

Виклад основного матеріалу

Методика експериментальних досліджень. Як зразки сумішей використовувались ущільнені двокомпонентні суміші з порошків металів та фторопластів, які виготовлялись стандартними методами ущільнюючого формування, головним чином, пресуванням [1, 2]. При вивченні впливу дисперсності порошків металів та окиснювачів на процес розвитку горіння сумішей використовувались стандартні порошки, які випускаються промисловістю. Коефіцієнт ущільнення зразків складав 0,96...0,98, тобто зразки мали гранично допустимі значення K_u та були практично газонепроникними. Для дослідження впливу підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на процес горіння сумішей зразки мали діаметр $2,5...3,5 \cdot 10^{-2}$ м і товщину металевої оболонки $2,0...2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Висоти запресувань при вказаних діаметрах складали $4...5 \cdot 10^{-2}$ м. Для моделювання впливу підвищених температур нагріву (до

800 K) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па) на швидкість горіння сумішей використовувалось стандартне піротехнічне обладнання [1, 2, 15].

Для проведення досліджень використовувались відомі методи фізико-хімічного аналізу (контактні та безконтактні методи вимірювання температури, швидкісна мікрокінозйомка процесів горіння та ін.), методи математичного моделювання, чисельно-аналітичні методи рішення рівнянь тепло- та масопереносу, рівнянь хімічної кінетики, а також методи математичної статистики з використанням стандартних програм по сучасним чисельним методам [1, 2]. При цьому відносна похибка вимірювань основних характеристик горіння сумішей (температури продуктів горіння сумішей, швидкості горіння та ін.) у вказаних умовах не перевищувала 6...8 %.

Фізико-хімічні процеси, що протікають у різних зонах горіння сумішей. Проведені дослідження поведінки компонентів сумішей з порошків Mg, Al та фторопластів (Ф – 3, Ф – 4 та ін.) в умовах підвищених температур нагріву, притаманних процесу горіння зміцнених сумішей порошків металевих палих з окиснювачами, що розкладаються у межах к-фази, дозволили встановити, що процес горіння зарядів розглядуваних сумішей у середньому стаціонарний та протікає таким же чином, як у сумішевих твердих ракетних паливах (СТРП), у декількох просторово розділених зонах: конденсованій фазі (к-фазі), на поверхні горіння та у газовій фазі (г-фазі – зоні полум'я) (рис. 1) [10].

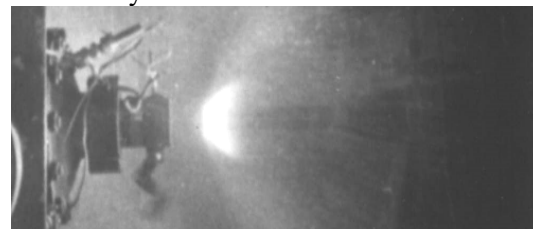
Так, з даних про термічне розкладання фторопластів та окиснення порошків магнію та алюмінію у активних газових середовищах випливає, що при нагріванні зарядів сумішей до температур 1200...1400 K, відповідних значенням температур поверхні горіння сумішей T_n , відбувається повне розкладання окиснювача з виділенням активних газоподібних продуктів (фтор та ін.) по наступному кінетичному рівнянню [1]:

$$u \frac{d\psi_1}{dx} = K_1 e^{-\frac{E_1}{RT}}, \quad (1)$$

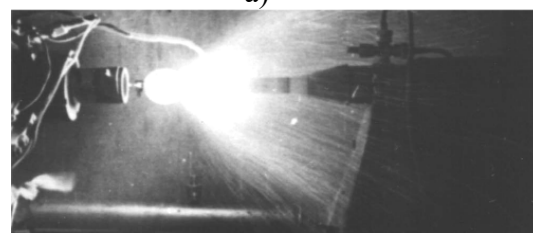
де ψ_1 – відносний ступінь розкладання окиснювача; K_1 , E_1 – кінетичні константи ($E_1 \gg RT$). Умова $E_1 \gg RT$ відповідає тому, що основне поглинання тепла в к-фазі, яке пов'язане з розкладанням окиснювача, практично повністю зосереджене у достатньо вузькому інтервалі температур $\Delta T \cong 2RT_n^2 /$

E_1 , що прилягає до температури поверхні горіння [2, 16].

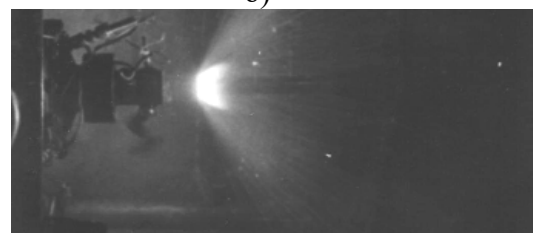
Відповідно до експериментальних спостережень, у газифікованому окиснювачі в к-фазі запускається процес окиснення частинок металу.



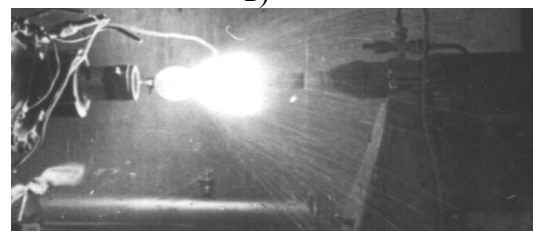
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Кінокадри зйомки загальної картини процесів горіння зарядів сумішей металевих палих з фторопластами при зовнішніх термічних впливах [1, 2].

Аналітична обробка кінетичних кривих окиснення частинок металу в газоподібних продуктах розкладання окиснювача показує, що вказаний процес описується наступним рівнянням [1, 2]:

$$\frac{d\psi_2}{dt} = K_2 \cdot C^l \cdot \rho^{-q} \cdot e^{-E_2/RT}, \quad (2)$$

при $E_2 \gg RT$, де ψ_2 – ступінь окиснення металу; K_2 – передекспоненціальний множник (c^{-1}); E_2 – енергія активації (кДж/моль); C , ρ – відносний масовий вміст активних продуктів у загальному потоці

газоподібних продуктів розкладання, відносна густина газового середовища (по відношенню до нормальних умов) відповідно; l, q – емпіричні константи, що залежать від природи металевго пального. При цьому з умови $E_2 \gg RT$ випливає, що інтенсивне передполум'яне окиснення частинок металевго пального в газоподібних продуктах розкладання окиснювача також протікає у вузькій реакційній зоні к-фази, де відбувається повна газифікація вказаних компонентів.

Мікрокінозйомка поверхні горіння суміші показує, що спалахування частинок металевго пального відбувається одразу ж після їх виходу на поверхню горіння. При цьому поверхню горіння суміші, так само як і у СТРП, можна охарактеризувати середньою температурою T_n . Проте експериментальні дані показують, що для горючих сумішей розглядуваного типу визначення вказаної температури T_n є вельми складним. Це пов'язано з тем, що процеси, які протікають на поверхні горіння розглядуваної суміші (на відміну від СТРП), досить складні. Так, наприклад, детальний аналіз показав, що відмінність в температурах частинок металу і продуктів розкладання окиснювача на поверхні горіння може досягати значень 400...600 К. Більше того, навіть частинки порошку металу на поверхні горіння мають різні температури через нерівність поверхні горіння і різні гідродинамічні і фізичні умови навколо окремих частинок. Ці особливості поверхні горіння і затрудняють точне визначення T_n , тому про експериментально вимірю T_n , як про деяку середню величину для всієї поверхні горіння, можна говорити лише приблизно [1].

Результати мікрокінозйомки поверхні горіння сумішей свідчать про те, що майже всі частинки металевго пального спалахують безпосередньо на поверхні. Після цього вони активно диспергуються у зону полум'я, де повністю згоряють за дифузійним механізмом у потоці газоподібних продуктів термічного розкладання окиснювача. (рис. 2, 3).

Механізм та математична модель горіння сумішей, рівняння для розрахунку швидкості розвитку їх горіння. Проведений аналіз експериментальних відомостей про

фізико-хімічні процеси, що протікають у різних зонах горіння розглядуваних сумішей дозволяє встановити механізм їх горіння згідно якому процес перетворення вихідної суміші в продукти згоряння в першому наближенні є стаціонарним, одновимірним і протікає у наступних трьох найхарактерніших зонах (рис. 4). Зона I – прогрітий шар у к-фазі суміші, де можна знехтувати хімічними перетвореннями. Зона II – реакційна зона к-фази суміші, в якій тверда суміш перетворюється в газ, що містить окремі частинки металу. В межах цієї зони відбувається розкладання окиснювача і енергійне окиснення частинок металевго пального, по реакціям, для яких $E \gg RT$ (E – енергія активації, R – газова стала) [14].

Спалахування частинок металу відбувається на поверхні горіння. Поверхня горіння визначається як площа, на якій тверда суміш втрачає властивості суцільного конденсованого середовища, і характеризується середньою температурою T_n . Більша частина частинок металу, що спалахнули, диспергуються у г-фазу.

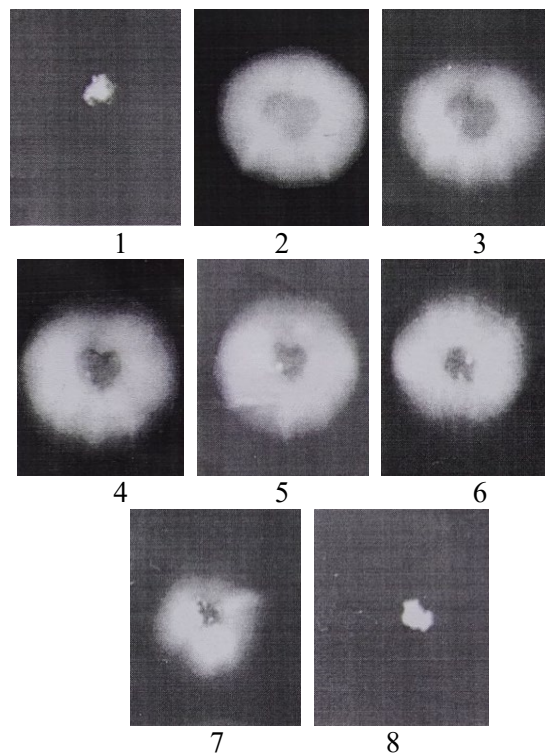


Рис. 2. Кінокадри мікрокінозйомки процесу дифузійного згоряння частинки магнію у середовищі газоподібних продуктів розкладання окиснювача ($T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па)[14].

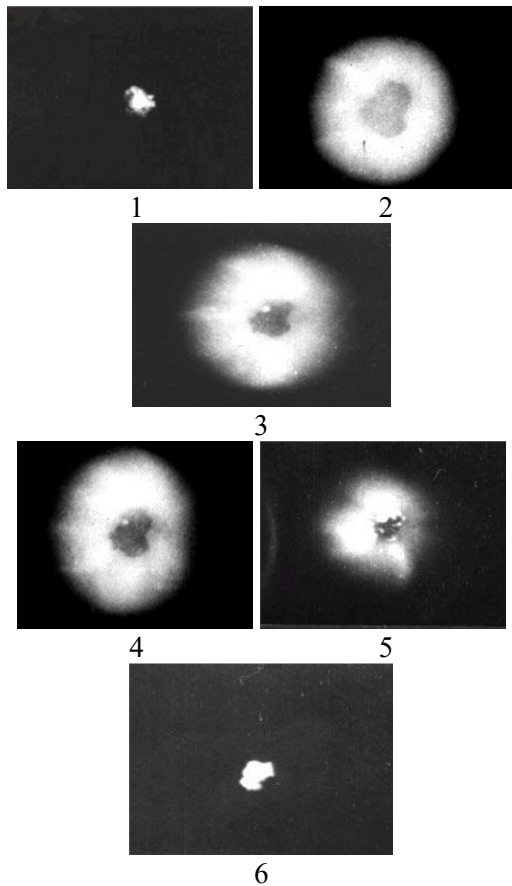


Рис. 3. Кінокадри швидкісної мікрозйомки процесу горіння частинок алюмінію у середовищі газоподібних продуктів розкладання окиснювача ($T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): 1, 2, 3, 4, 5, 6 – знімки для частинок металу розміром $d_m < 100 \dots 150$ мкм, що згоряють у газовому потоці [14].

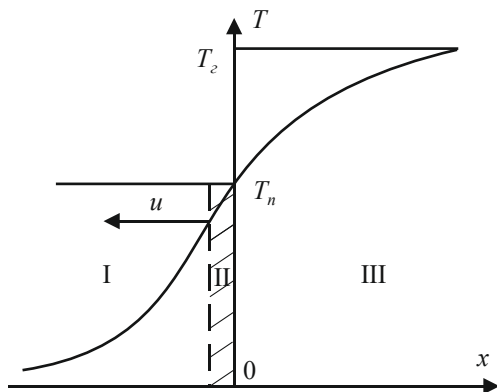


Рис. 4. Схематичне зображення розподілу температури поблизу поверхні горіння суміші.

Зона III – зона тепловиділення γ -фази. В цій зоні дисперговані частинки металевго пального згоряють в дифузійному режимі в потоці продуктів розкладання окиснювача, утворюючи продукти згорання з

температурою T_c . Тепло, що виділяється, передається у κ -фазу.

При вказаних вище основних припущеннях про механізм горіння розглядуваних сумішей, а також в припущенні відсутності тепловтрат в навколишнє середовище і зовнішніх сил розповсюдження фронту реакції горіння у κ -фазі вихідної суміші можна описати наступною відомою в теорії горіння системою рівнянь [5]:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_c \frac{dT}{dx} \right) - \rho_c c_c \frac{dT}{dx} - H_{OK} \rho_c u \zeta_{OK} \frac{d\psi_1}{dx} + H_M \rho_c \zeta_M u \frac{d\psi_2}{dx} = 0, \quad (3)$$

$$u \frac{d\psi_1}{dx} = K_1 e^{-\frac{E_1}{RT}}, \quad (4)$$

$$u \frac{d\psi_2}{dx} = K_2 \cdot C_{O_2}^l \cdot \rho_2^q e^{-\frac{E_2}{RT}}, \quad (5)$$

$$T = T_0, \psi_1 = \psi_2 = 0 \text{ при } x \rightarrow -\infty, \quad (6)$$

$$T = T_n, \psi_1 = \psi_{1n}, \psi_2 = \psi_{2n}$$

$$\lambda_c \frac{dT}{dx} = q_k \text{ при } x = 0, \quad (7)$$

Тут ρ_c , c_c , λ_c – густина (кг/м³), питома теплоємність (Дж/кг·К) і коефіцієнт теплопровідності (Вт/м·К) суміші; H_{OK} – тепловий ефект реакції розкладання окиснювача (Дж/кг); ψ_i , K_i та E_i ($i = \overline{1,2}$) – відносні ступені розкладання окиснювача та окиснення металевго пального (по масі) та їх кінетичні константи (с⁻¹, кДж/моль) відповідно; ζ_{OK} , ζ_M – відносні масові вмісти окиснювача та металевго пального в суміші відповідно; q_k – кондуктивний тепловий потік з зони полум'я, Вт/м².

Щоб отримати вирази для визначення швидкості горіння, систему (3) – (7) зручно звести до одного рівняння.

Проінтегрувавши рівняння (4) від $-\infty$ до x , отримаємо

$$\lambda_c \frac{dT}{dx} = \rho_c c_c u (T - T_0) - H_M \rho_c \zeta_M u \left(\psi_2 - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right), \quad (8)$$

Помножимо рівняння (4) на $\frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M}$ потім віднімемо їх з рівняння (5):

$$u \frac{d}{dx} \left(\psi_2 - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right) = K_2 C_{O_2}^m p_2^{n_2} e^{-\frac{E_2}{RT}} - K_1 \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} e^{-\frac{E_1}{RT}}, \quad (9)$$

Розділимо (9) на (8):

$$\frac{u}{\lambda_c} \cdot \frac{d}{dT} \left(\psi_2 - \frac{H_{OK}\zeta_{OK}}{H_M\zeta_{5M}} \psi_1 \right) = \frac{K_2 C_{O_2}^m p_e^n e^{-E_2/(RT)} - K_1 \frac{H_{OK}\zeta_{OK} e^{-E_1/(RT)}}{H_M\zeta_M}}{\rho_c c_u (T - T_0) - H_M \rho_c u \zeta_M \left(\psi_2 - \frac{H_{OK}\zeta_{OK}}{H_M\zeta_M} \psi_1 \right)}, \quad (10)$$

Для випадку $E_i \gg RT$ ($i=1,2$) розглядувані реакції розкладання окиснювача з утворенням газоподібних продуктів та окиснення в них частинок металу протікають, в основному, у вузькій реакційній зоні к-фази, що прилягає до поверхні горіння суміші, тобто практично при температурі T_n . Тоді згідно відомому “методу розкладання експоненти” [1]:

$$\frac{E_i}{RT} = \frac{E_i}{R(T_n + \Delta T)} = \frac{E_i}{RT_n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta T}{T_n}} \approx \frac{E_i}{RT_n} - \frac{E_i}{RT_n^2} \Delta T, \quad (11)$$

де $\Delta T = T - T_n$.

Тоді отримуємо, що

$$e^{-\frac{E_i}{RT}} \approx e^{-\frac{E_i}{RT_n}} \cdot e^{-\frac{E_i(T_n - T)}{RT_n^2}}, \quad (12)$$

Підставляючи (12) у (10), отримуємо

$$u \frac{d}{dx} \left(\psi_2 - \frac{H_{OK}\zeta_{OK}}{H_M\zeta_M} \psi_1 \right) = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot p_{r_2}^n \cdot e^{E_2/(RT_n)} \cdot e^{-\frac{E_2(T_n - T)}{RT_n^2}} - K_1 \cdot \frac{H_{OK}\zeta_{OK}}{H_M\zeta_M} \cdot e^{E_1/(RT_n)} \cdot e^{-\frac{E_1(T_n - T)}{RT_n^2}} \cdot [\rho_c c_u (T_n - T_0) - H_M \rho_c u \zeta_M \left(\psi_2 - \frac{H_{OK}\zeta_{OK}}{H_M\zeta_M} \psi_1 \right)]^{-1}, \quad (13)$$

Рівняння (13) повинне задовольняти граничним умовам

$$\psi_1 = \psi_2 \text{ при } T = T_0, \quad (14)$$

$$\psi_1 = \psi_{1n}, \quad \psi_2 = \psi_{2n} \text{ при } T = T_n, \quad (15)$$

В результаті інтегрування рівняння (13) з граничними умовами (14) та (15) отримуємо наступний вираз:

$$u^2 \left[\rho_c c_u (T_n - T_0) \left(\psi_{2n} - \frac{H_{OK}\zeta_{OK}}{H_M\zeta_M} \psi_{1n} \right) - \frac{H_M\zeta_{5M}\rho_c}{2} \left(\psi_{2n} - \frac{H_{OK}\zeta_{OK}}{H_M\zeta_M} \psi_{1n} \right) \right]^2 =$$

$$= \frac{\lambda_c K_2 C_{O_2}^m p_{O_2}^l R T_n^2}{E_2} e^{-\frac{E_2}{RT_n}} \left[1 - e^{-\frac{E_2(T_n - T_0)}{RT_n}} \right] - \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2 H_{OK} \delta_{ox}}{E_1 H_r \zeta_M} e^{-\frac{E_1}{RT_n}} \left[1 - e^{-\frac{E_1(T_n - T_0)}{RT_n}} \right], \quad (16)$$

Експериментальні дослідження та теоретичні оцінки вказують, що тепловиділення, яке виникає внаслідок окиснення частинок металевго пального окиснювачем, що газифікується, має мінімальний вплив на загальний тепловий баланс к-фази вихідної суміші. У першому наближенні цей фактор можна ігнорувати, оскільки відносна похибка оцінок не перевищує 2–4%. Водночас, виділене тепло є достатнім для забезпечення займання металевих частинок на поверхні горіння, що відіграє ключову роль у подальшому розвитку процесу горіння суміші. З рахуванням цього факту вираз (16) приймає наступний вигляд:

$$H_{OK}\zeta_{OK}\rho_c u^2 \left[c_c (T_n - T_0) \psi_{1n} + \frac{H_{OK}\zeta_{OK}}{2} \psi_{1n}^2 \right] = \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2 H_{OK}\zeta_{OK}}{E_1} e^{-E_1/(RT_n)} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1(T_n - T_0)}{RT_n}} \right], \quad (17)$$

При $x = 0$ з рівняння (8) отримуємо, що

$$\psi_{1n} = \frac{q_k \cdot \rho_c \cdot c_c \cdot u (T_n - T_0)}{H_{OK}\rho_c u \zeta_{OK}}, \quad (18)$$

Підставивши вираз (18) у (17), отримаємо для швидкості горіння наступне рівняння:

$$\rho_c^2 c_c^2 u^2 (T_n - T_0)^2 = q_k^2 + \frac{2c_c \rho_c K_1 H_{OK} \zeta_{5OK} R T_n^2}{E_1} e^{-\frac{E_1}{RT_n}} e^{-\frac{E_1(T_n - T_0)}{RT_n}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1(T_n - T_0)}{RT_n}} \right], \quad (19)$$

Далі, з отриманого спрощеного рівняння (3.78) випливає, що для розрахунку швидкості горіння сумішей необхідно знати параметри T_n, q_k .

Визначення T_n . Експериментальне визначення T_n існуючими методами є складним та достатньо наближеним [1, 2], а дослідження, які присвячені аналітичному визначенню T_n , в теперішній час обмежені. Тому, використовуючи систематизовані дані про кінетику термічного розкладання

розглядуваного окиснювача при температурах, властивих реакційній зоні к-фази суміші, величину T_n можна визначити, виходячи з припущення про те, що при $T = T_n$ відбувається повне розкладання окиснювача. Таким чином, з (17) при $\psi_{1n} = \psi_{2n} \approx 1$ для визначення T_n отримуємо наступні рівняння:

$$\rho_c^2 u^2 \left[c_c (T_n - T_0) + \frac{H_{ox} \zeta_{ox}}{2} \right] = \lambda_c K_1 R T_n^2 e^{-E_1/(RT_n)} \left[1 - e^{\frac{E_1(T_n - T_0)}{RT_n^2}} \right], \quad (20)$$

Таким чином, для розрахунку швидкості та температури поверхні горіння розглядуваних сумішей отримуємо наступну замкнуту систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \rho_c^2 u^2 c_c^2 (T_n - T_0)^2 = \\ = q^2 + \frac{2c_c \rho_c K_1 H_{ox} R T_n^2}{E_1} \cdot \left[1 - e^{\frac{E_1(T_n - T_0)}{RT_n^2}} \right], \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \rho_c^2 u^2 \left[c_c (T_n - T_0) + \frac{H_{ox} \zeta_{ox}}{2} \right] = \\ = \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2}{\rho_c} \left[1 - e^{\frac{E_1(T_n - T_0)}{RT_n^2}} \right], \end{aligned} \quad (22)$$

де $\zeta_{ox} = 1 - \zeta_m$.

Визначення q_k . Для наближеного аналітичного визначення q_k скористаємося відомим “методом теплового потоку” [1], а саме: істинне значення теплового потоку із зони тепловиділення г-фази замінимо його середнім значенням для цієї зони:

$$q_k = \lambda_z \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \bar{\lambda}_z \frac{T_z - T_n}{\Delta x}, \quad (23)$$

де $\bar{\lambda}_z$ – коефіцієнт теплопровідності газу при температурі $\bar{T} = (T_r + T_n)/2$; Δx – відстань від поверхні горіння до площини, на якій досягається температура T_z (температура T_z і відповідний їй склад продуктів згорання знаходяться в результаті термодинамічних розрахунків). При цьому величина Δx знаходиться з рівняння руху сферичної частинки металу радіусом r :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{3}{8} \cdot \frac{\bar{\rho}_z \cdot \bar{c}_x}{\rho_M \cdot r} (V - \dot{x})^2, \quad (24)$$

де $\bar{\rho}_z$ – густина газового потоку при температурі $\bar{T}$; $\bar{c}_x$ – коефіцієнт опору частинки, в кінцевий вираз якого входять параметри газового потоку при температурі $\bar{T}$; V – швидкість газового потоку.

Експериментальним шляхом було встановлено збіг коефіцієнта опору частинок сферичної форми металу, що горять і не горять при значеннях критерію Рейнольдса $Re < 10^3$. Під критерієм Рейнольдса тут розуміється відношення $Re = \frac{2r(V - \dot{x})}{\bar{v}_z}$, де $\bar{v}_z$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу при температурі $\bar{T}$. Тому у вказаному діапазоні зміни критерію Рейнольдса для коефіцієнта опору частинки металу можна брати його значення для сферичної частинки, що не горить.

Експериментальні дані про швидкість відтоку газоподібних продуктів розкладання показують, що швидкість їх відносного руху в межах зони тепловиділення г-фази складає $V_n = 1 \dots 10$ м/с. Це, у свою чергу, дає наступний діапазон зміни числа Рейнольдса $0,4 \leq Re \leq 850$ (для $P = 10^5 \dots 10^7$ Па).

У зв'язку з вищевикладеним прийемо для коефіцієнта опору частинки металу наступне його значення для сферичної частинки, що не горить:

$$\bar{c}_x = \pi(0,128 + 12,8/Re), \quad (25)$$

яке добре апроксимує експериментальну залежність $\bar{c}_x = f(Re)$ [1] в цікавому для нас діапазоні зміни критерію Рейнольдса.

Підставивши $\bar{c}_x$ з (25) у (24), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} = 0,15 \frac{\bar{\rho}_z (V - \dot{x})^2}{\rho_M r} + \\ + 7,52 \frac{\bar{\rho}_z \bar{v}_z (V - \dot{x})}{\rho_M r^2}, \end{aligned} \quad (26)$$

Враховуючи, що згідно експериментальним даним про швидкість відтоку газоподібних продуктів в межах зони тепловиділення полум'я $V \gg \dot{x}$ та практично не змінюється по її довжині (не більше 3...4% від значення при $T = T_n$), рівняння (26) можна переписати у вигляді

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = 0,15 \frac{\bar{\rho}_z \bar{V}_n^2}{\rho_M r} + 7,52 \frac{\bar{\rho}_z \bar{v}_z \bar{V}_n}{\rho_M r^2}, \quad (27)$$

Проінтегрувавши рівняння (27) з врахуванням початкових умов на поверхні горіння (при $t = 0$; $x = 0$, $\dot{x} = u$), знайдемо залежність зсуву частинки від часу:

$$\Delta x = u\tau_z + 0.15 \cdot \frac{\rho_z \cdot V_n^2}{\rho_M} \cdot \int_0^{\tau_z} \left[\int_0^t \frac{dt}{r(t)} \right] dt + 7.52 \cdot \frac{\rho_z \cdot V_z^2}{\rho_M} \cdot V_n \int_0^{\tau_z} \left[\int_0^t \frac{dt}{r^2(t)} \right] dt, \quad (28)$$

де τ_z – час горіння частинки металу при зміні її радіусу від $r_0 = \frac{d_M}{2}$ до $r_K = \frac{d_K}{2}$ (r_K (d_K) – радіус (діаметр) частинки металу в кінці зони тепловиділення полум'я).

Для знаходження τ_z скористаємося відомим рівнянням [1, 2]:

$$\left| \frac{dr}{dt} \right| = \frac{1}{2\rho_M r} \cdot \left(\frac{\lambda_z}{c_P} \right) \cdot \overline{Nu} \cdot \ln \bar{\eta}, \quad (29)$$

$$\bar{\eta} = \frac{1 + m_{ок} \left(\frac{H_M}{L} \right) + \left(\frac{c_P}{L} \right) (\bar{T} - T_K)}{\left(1 + \frac{m_{ок}^*}{\gamma^*} \right) \cdot (1 - m_{ок})^{1/\gamma^*}}, \quad (30)$$

де:

$$\overline{Nu} = 2 \left[1 - 0.08 \left(\frac{2r \cdot V_n}{\bar{v}_z} \right)^{2/3} \right], \quad (31)$$

$m_{ок}$ – відносна концентрація кисню в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача (згідно експериментальним даним по відтоку газоподібних продуктів [1] значення $m_{ок}$ вважається рівною її значенню при повному розкладанні окиснювача); γ^* – відношення масового потоку кисню до масового потоку пари металу; L , T_K – прихована теплота випаровування та температура кипіння металу; $\bar{\lambda}_z$, $\bar{c}_P$, $\bar{v}_z$ – параметри газового потоку, які беруться при середній температурі $\bar{T} = \frac{T_n + T_z}{2}$. Коефіцієнти $\bar{\lambda}_z$, $\bar{c}_P$, $\bar{v}_z$ можна представити у вигляді ($T_0^* = 293$ K, $P_a = 10^5$ Па та λ_z^0 , c_P^0 , v_z^0 – значення параметрів при T_0^* та P_a [2]:

$$\bar{\lambda}_z \approx \lambda_z^0 \left(\frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \right)^{1/2}, \quad (32)$$

$$\bar{c}_P \approx c_P^0 \left(\frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \right), \quad (33)$$

$$\bar{v}_z \approx v_z^0 \left(\frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{P_a}{P} \right), \quad (34)$$

Підставляючи вирази (30) – (34) у (29), отримуємо наступне рівняння для швидкості горіння частинки металу

$$\left| \frac{dr}{dt} \right| = \frac{\lambda_z^0}{\rho_M \cdot r \cdot c_P^0} \cdot \left(\frac{2T_0^*}{T_n + T_z} \right)^{1/2} \cdot$$

$$\cdot \left[1 - 0.16 \cdot \frac{T_0^*}{T_n + T_z} \cdot \left(\frac{2r \cdot \rho_c \cdot u \cdot l_c \cdot \alpha \cdot T_n}{v_z^0 \cdot \rho_z^0 (1 + l_c \cdot \alpha) \cdot T_0^*} \right)^{2/3} \right] \cdot \ln \left[\frac{1 + m_{ок} \cdot \left(\frac{H_M}{L} \right) + \frac{c_P^0}{L} \cdot \frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \cdot \left(\frac{T_n + T_z}{2} - T_K \right)}{\left(1 + \frac{m_{ок}^*}{\gamma^*} \right) \cdot (1 - m_{ок})^{1/\gamma^*}} \right], \quad (35)$$

Проінтегрувавши рівняння (35) з врахуванням наступних початкових та кінцевих умов:

$$r|_{t=0} = \frac{d_M}{2}, \quad (36)$$

$$r|_{t=\tau_z} = \frac{d_K}{2}, \quad (37)$$

отримаємо

$$\tau_z = \frac{3}{4a \cdot b^2} \cdot 2 \left(\left(\frac{d_M}{2} \right)^{2/3} - \left(\frac{d_K}{2} \right)^{2/3} \right) + b \left(\left(\frac{d_M}{2} \right)^{4/3} - \left(\frac{d_K}{2} \right)^{4/3} \right) - \frac{2}{b} \cdot \ln \left[\frac{1 - b \left(\frac{d_M}{2} \right)^{2/3}}{1 - b \left(\frac{d_K}{2} \right)^{2/3}} \right], \quad (38)$$

де a , b мають наступний вигляд:

$$a = \frac{\lambda_z^0}{\rho_M \cdot c_P^0} \cdot \left(\frac{2T_0^*}{T_n + T_z} \right)^{1/2} \cdot$$

$$\cdot \ln \left[\frac{1 + m_{ок} \cdot \left(\frac{H_M}{L} \right) + \frac{c_P^0}{L} \cdot \frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \cdot \left(\frac{T_n + T_z}{2} - T_K \right)}{\left(1 + \frac{m_{ок}^*}{\gamma^*} \right) \cdot (1 - m_{ок})^{1/\gamma^*}} \right], \quad (39)$$

$$b = 0.16 \cdot \frac{T_0^*}{T_n + T_z} \cdot \left(\frac{2 \cdot \rho_c \cdot u \cdot l_c \cdot \alpha \cdot T_n}{v_z^0 \cdot \rho_z^0 (1 + l_c \cdot \alpha) \cdot T_0^*} \right)^{2/3}, \quad (40)$$

Величину d_K визначимо через відносний масовий вміст неокисленого металу в продуктах згорання суміші [1, 2]:

$$g_{me}^K = \frac{P_{me}^K}{P_{me}^0 + P_{ок}} = \frac{P_{me}^K}{(1 + l_c \cdot \alpha) \cdot P_{me}^0}, \quad (41)$$

де P_{me}^K – масовий вміст неокисленого металевого пального в продуктах згорання; P_{me}^0 , $P_{ок}$ – масовий вміст у вихідній суміші відповідно металевого пального та окиснювача.

Далі (41) можна переписати у вигляді

$$g_{me}^K = \frac{1}{1 + l_c \cdot \alpha} \cdot \left(\frac{d_K}{d_M} \right)^3, \quad (42)$$

Звідси

$$d_k = d_m [(1 + l_c \cdot \alpha) \cdot g_{me}^k]^{1/3}, \quad (43)$$

Підставляючи (43) у (38), остаточно, отримуємо наступний вираз для τ_z :

$$\tau_z = \frac{3}{4a \cdot b^2} \cdot \left\{ 2 \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3} [1 - (1 + l_c \cdot \alpha)^{2/9} (g_{me}^k)^{2/9}] + b \left(\frac{d_m}{2} \right)^{4/3} [1 - (1 + l_c \cdot \alpha)^{4/9} (g_{me}^k)^{4/9}] - \frac{2}{b} \cdot \ln \left[\frac{1 - b \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3}}{1 - b \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3} \cdot (1 + l_c \cdot \alpha)^{2/9} (g_{me}^k)^{2/9}} \right] \right\}, \quad (44)$$

Проведені розрахунки по формулам (21) – (23), (28) та (44) з залученням усіх необхідних даних по сумішам та їх компонентам [1, 2] показують, що тепловий потік q_k найбільш сильно залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача та дисперсності металевго пального (рис. 5, 6): при збільшенні α від 0,5 до 3,0 значення q_k зменшуються від $5,79 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,31 \cdot 10^6$ Вт/м²; при збільшенні d_m від 74,5 мкм до 182 мкм значення q_k зменшується від $3,9 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,8 \cdot 10^6$ Вт/м².

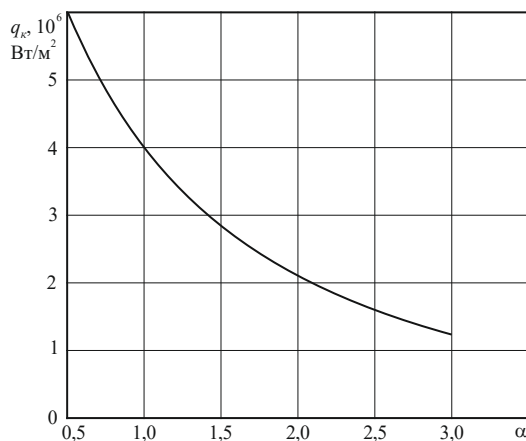


Рис. 5. Залежність величини теплового потоку q_k від коефіцієнта надлишку окиснювача для суміші Mg + Φ – 3 ($d_m = 74,5$ мкм; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па).

Визначення критичних діапазонів зміни швидкості горіння сумішей для різних значень технологічних параметрів з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій. Отримані вище вирази (21) – (23), (28) та (44) дозволяють розраховувати швидкість розвитку горіння розглядуваних сумішей u ,

температуру їх поверхні горіння T_n , а також швидкість горіння частинок металу у продуктах розкладання цих сумішей $\frac{dm(r_m)}{dt}$ та тепловий потік з г-фази сумішей q_k . З використанням необхідних значень фізико-хімічних параметрів сумішей та їх компонентів на ПК з використанням стандартного програмного забезпечення у вигляді пакетів прикладних програм по сучасним чисельним методам [1, 16] в режимі діалогу та реального часу було проведено розрахунки залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів (співвідношення компонентів, дисперсності металевго пального), а також основних параметрів зовнішніх термічних дій (температури нагріву, зовнішнього тиску) (рис. 7, 8). З результатів зіставлення розрахункових залежностей з експериментальними даними випливає, що між ними спостерігається повний якісний збіг, що відповідає запропонованому вище механізму горіння сумішей. Що стосується кількісних відмінностей між розрахунком та експериментом, то вони не перевищують 6...8 % (замість 10...12 % у існуючих моделей горіння піротехнічних металізованих сумішей [1, 2, 16]).

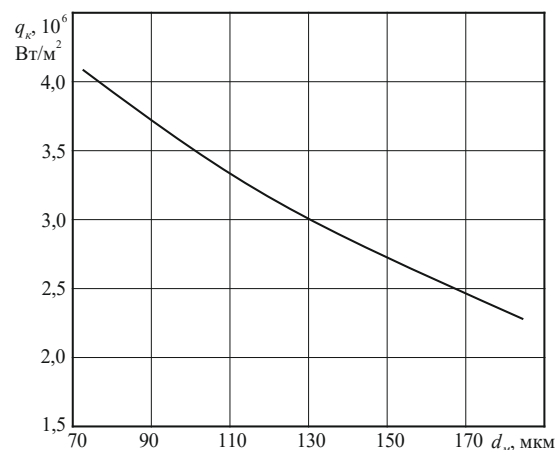


Рис. 6. Залежність величини теплового потоку q_k від дисперсності металевго пального для суміші Mg + Φ – 3 ($\alpha = 1,0$; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па).

Крім цього, в результаті проведених розрахунків було встановлено наступні критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей, перевищення яких призводить до нестабільного вибухонебезпечного розвитку процесу їх горіння або різкого його затухання в умовах зовнішніх термодій (табл. 1):

$$u_i^* \leq u \leq u_i^{**},$$

$$i = \overline{1,8}, \quad (45)$$

де індексу “ i ” відповідає конкретним умовам (див. рис. 7, 8).

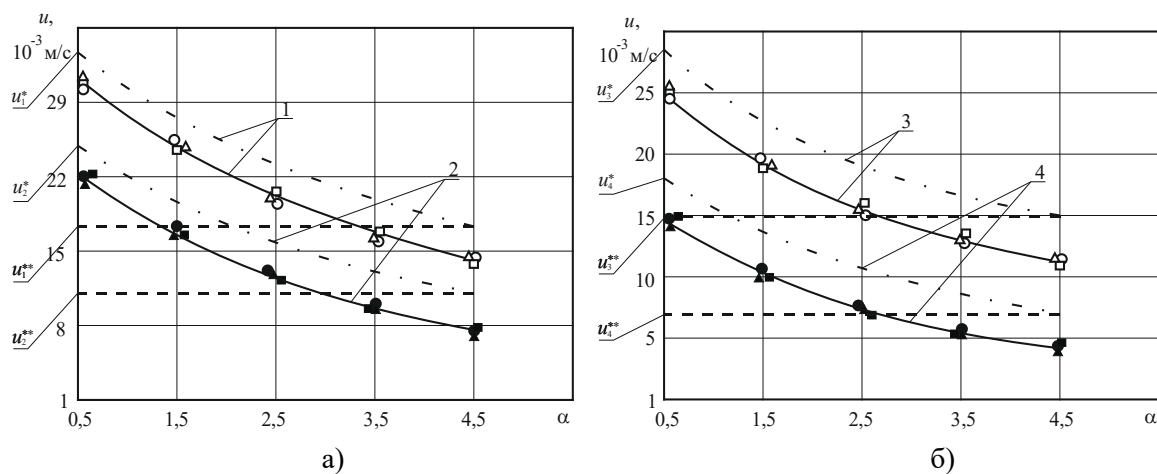


Рис. 7. Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші магній + $\Phi - 3$ від відносного вмісту металевих пального: а) – вплив T_0 (1 – $T_0 = 800$ К; 2 – $T_0 = 300$ К; $d_m = 74,5$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $P = 10^5$ Па); б) – вплив P (3 – $P = 10^7$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; $d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $T_0 = 300$ К): – $\square$ – $\square$ – розрахункова крива; — — експериментальна крива.

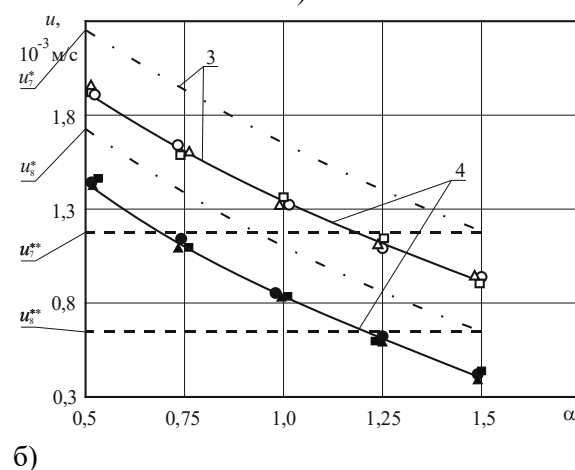
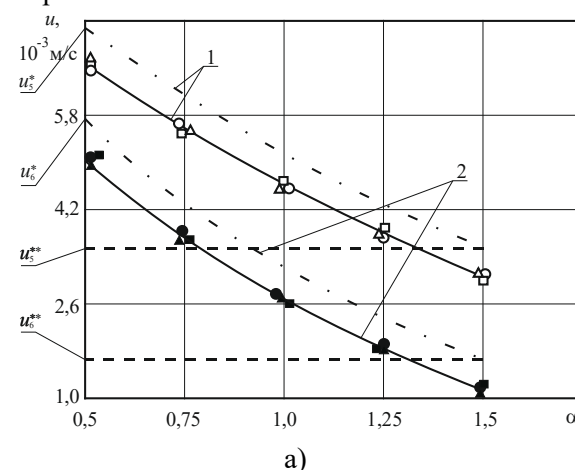
Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів u_i^* , u_i^{**} ($i = \overline{1,8}$)

Суміш Параметр	Mg + $\Phi - 3$				Al + $\Phi - 3$			
u_1^* , 10^{-3} м/с	31,3	—	—	—	—	—	—	—
u_1^{**} , 10^{-3} м/с	25,7	—	—	—	—	—	—	—
u_2^* , 10^{-3} м/с	—	23,8	—	—	—	—	—	—
u_2^{**} , 10^{-3} м/с	—	9,2	—	—	—	—	—	—
u_3^* , 10^{-3} м/с	—	—	23,8	—	—	—	—	—
u_3^{**} , 10^{-3} м/с	—	—	15,1	—	—	—	—	—
u_4^* , 10^{-3} м/с	—	—	—	19,4	—	—	—	—
u_4^{**} , 10^{-3} м/с	—	—	—	7,5	—	—	—	—
u_5^* , 10^{-3} м/с	—	—	—	—	7,3	—	—	—
u_5^{**} , 10^{-3} м/с	—	—	—	—	3,8	—	—	—
u_6^* , 10^{-3} м/с	—	—	—	—	5,7	—	—	—
u_6^{**} , 10^{-3} м/с	—	—	—	—	1,5	—	—	—

u_7^* , 10^{-3} м/с	—	—	—	—	—	2, 1	—	—
u_7^{**} , 10^{-3} м/с	—	—	—	—	—	1, 2	—	—
u_8^* , 10^{-3} м/с	—	—	—	—	—	—	1, 7	—
u_8^{**} , 10^{-3} м/с	—	—	—	—	—	—	0, 6	—

Таким чином, зовнішні термодії на поверхню корпусів виробів з зарядами розглядуваних сумішей в умовах їх зберігання, транспортування, можуть призводити до нагріву їх корпусів до рівня температур, що перевищують значення температури займання розглядуваних частинок металів у продуктах розкладання окиснювача в умовах підвищених температур нагріву. Це призводить, в кінцевому підсумку, до розвитку вибухонебезпечного процесу горіння заряду суміші в замкнутому об'ємі під корпусом виробу в умовах підвищених температур нагріву та тисків зовнішнього середовища, що є основною причиною прискорення процесу його горіння, передчасного спрацьовування виробу та його пожежонебезпечного руйнування. На етапі проектування та стендових випробувань виробів, які мають взаємодіяти з різними зовнішніми термічними впливами, надзвичайно важливим є проведення аналізу та моделювання відповідних процесів. Це дозволяє виявляти критичні значення таких параметрів, що можуть впливати на характеристики виробів. Особливу увагу слід приділяти технологічним параметрам, які визначають заряд суміші й мають прямий вплив на температуру займання частинок металів у газоподібних продуктах розкладання окиснювача. Перевищення зазначених критичних значень може призвести до передчасного спрацьовування виробів, створюючи ризики для їх надійності та безпеки. Таким чином, прогнозування параметрів зовнішніх термодій та технологічних характеристик має бути інтегрованою частиною всього циклу розробки, від проектування до тестування. При цьому збільшення T_z (наприклад, за рахунок використання більш дрібнодисперсних металевих порошків та окиснювачів з меншим вмістом кисню у продуктах розкладання) може призводити

до зростання критичних часів спрацьовування піротехнічних виробів в умовах вимушених зовнішніх термодій у декілька разів, тобто регулюючи технологічні параметри зарядів сумішей на стадії їх виготовлення можна у декілька разів підвищувати пожежобезпечність виробів.



б)

Рис. 8. Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші алюміній + Ф-3 від відносного вмісту металевих пального: а) – вплив T_0 (1 – $T_0 = 800$ К; 2 – $T_0 = 300$ К; $d_M = 54$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $P = 10^5$ Па); б) – вплив P (3 – $P = 10^7$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; $d_M = 310$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $T_0 = 300$ К); – □ – □ – □ – □ – розрахункова крива; — — — експериментальна крива.

Отже, вплив зовнішніх теплових чинників на корпуси виробів із зарядами досліджуваних сумішей у процесі їхнього зберігання, транспортування, пострілу чи польоту може призводити до значного нагрівання корпусів. Це, у свою чергу, спричиняє виникнення вибухонебезпечного процесу горіння заряду суміші, особливо за умов підвищених температур і зовнішнього тиску. Такий розвиток подій стає основним фактором прискорення процесу горіння, що може привести до передчасного спрацювання виробу та його пожежонебезпечного руйнування. Отже, на етапі проектування та проведення стендових випробувань виробів, що імітують вплив зовнішніх теплових чинників, особливо важливо вміти визначати критичні діапазони зміни швидкості розвитку горіння зарядів сумішей. Саме ці критичні межі стають вирішальним фактором для запобігання пожежовибухонебезпечному руйнуванню виробів за умов екстремальної експлуатації.

Такі дослідження дозволяють не лише підвищити безпеку виробів, але й забезпечити їхню стабільну роботу навіть в умовах підвищених температур чи тисків. Встановлення критичних меж є ключовим для розробки новітніх технологій, які мають знизити ризики передчасного спрацювання виробів та їхнього руйнування.

Висновки.

На основі проведених теоретико-експериментальних досліджень процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій отримано наступні нові результати.

З'ясовано механізм горіння сумішей, згідно з яким процеси перетворення вихідної твердої речовини на продукти згорання є стабільними, одновимірними та відбуваються у таких зонах:

- **перша зона** — прогрітий шар у к-фазі суміші, де хімічні реакції практично відсутні й можуть бути знехтувані.

- **друга зона** — реакційна область к-фази суміші, де тверда речовина перетворюється на газоподібні продукти, які містять окремі металеві частинки, що вступають у реакцію окиснення з продуктами розкладання окиснювача.

- **поверхня горіння (розділ фаз)** — межа, на якій суміш втрачає властивості твердої речовини, і більша частина

металевих частинок, які запалилися, диспергується у газову фазу (г-фазу).

- **третя зона** — зона полум'я (область тепловиділення г-фази), де дисперговані металеві частинки згорають у дифузійному режимі в потоці газоподібних продуктів розкладання окиснювача, утворюючи кінцеві продукти згорання.

Таке структурування дозволяє краще розуміти закономірності горіння сумішей і оптимізувати їх використання в різноманітних застосуваннях.

Створено модель горіння ущільнених двокомпонентних сумішей, що складаються з порошків металевих пальних і фторопластів. На відміну від існуючих моделей піротехнічних металізованих сумішей, ця модель враховує кінетичні параметри термічного розкладання окиснювача, а також процеси високотемпературного окиснення, займання і горіння металевих частинок у продуктах розкладання. Завдяки цьому вдалося досягти підвищеної точності розрахунків: похибка знижена до 6–8% порівняно з 10–15% у попередніх моделях.

Нова модель дозволяє деталізувати залежність швидкості горіння суміші від зовнішніх умов, таких як підвищені температури нагріву та атмосферний тиск, а також технологічних параметрів, серед яких співвідношення компонентів, дисперсність металевого пального, характеристики металу і окиснювача та інші. Це дає змогу визначати критичні діапазони зміни швидкості горіння в подібних умовах.

Перевищення таких критичних меж призводить до суттєвого прискорення процесу горіння сумішей, що може спричинити небезпечне руйнування піротехнічних виробів та підвищити ризики пожежовибухонебезпеки під час експлуатації.

Перспективи подальших досліджень.

У подальшому планується проведення теоретико-експериментальних досліджень з визначення механізму та розробки моделей горіння піротехнічних багатокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих пальних, фторопластів та добавок органічних та неорганічних речовин в умовах зовнішніх термоударних дій (надзвуковий обдув потоком повітря та

вісесиметричне обертання, ударні перевантаження та ін.), що реалізуються при запуску та польоті піротехнічних виробів.

Список літератури

1. H. Yaman, V. Çelik, E. Degirmenci, Experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid rocket propellants. 2014. Fuel 115, 794. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.033>
2. Uhlenhake, K.E.; Yehia, O.R.; Noel, A.; Terry, B.C.; Örnek, M.; Belal, H.M.; Gunduz, I.E.; Son, S.F.. On the Use of FluorineContaining Nano-Aluminum Composite Particles to Tailor Composite Solid Rocket Propellants. Propellants Explos. Pyrotech. 2022. №47. e202100370. <https://doi.org/10.1002/prep.202100370>
3. Skaggs, M.N., Hargather, M.J. & Cooper, M.A. Characterizing pyrotechnic igniter output with high-speed schlieren imaging. Shock Waves 2017. №27. P. 15–25. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0640-5>.
4. Uma Vellaisamy, Shelly Biswas,. Effect of metal additives on neutralization and characteristics of AP/HTPB solid propellants. Combustion and Flame, 2020. Volume 221. P. 326-337, ISSN 0010-2180, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.006>.
5. Yasmine Aly, Mirko Schoenitz, Edward L. Dreizin, Ignition and combustion of mechanically alloyed Al–Mg powders with customized particle sizes. Combustion and Flame. 2013 Volume 160. Issue 4, P. 835-842. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.12.011>.
6. Belikov, A., Shkoliar, Ie., Motrychuk, R., Tomenko, M. Combustion processes of aluminum powder in pyrotechnic mixtures. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*, 2024. №8(1), 122-130. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21888>
7. Daniel R. Guildenbecher, Marcia A. Cooper.. Walter Gill, Howard Lee Stauffacher, Michael S. Oliver, and Thomas W. Grasser, Quantitative, three-dimensional imaging of aluminum drop combustion in solid propellant plumes via digital in-line holography, 2014. № 39, P. 5126-5129. <https://doi.org/10.1364/OL.39.005126>.
8. Kyrychenko, O.V., Zemliansky, O.M., Motrychuk, R.B., Shkoliar, Ie.V., Kovbasa V.O. Thermodynamic calculations for determining the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*, 2023. №7(1), 191-201. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21883>
9. Діброва О.С., Кириченко О.В., Мотрічук Р.Б., Томенко М.Г., Мельник В.П. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. Technology Audit and Production Reserves. 2020. Том 1 №1 (51), С. 44–49. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.199252>
10. Кириченко О.В., Діброва О.С., Мотрічук Р.Б., Ващенко В.А., Колінько С.О.. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. №2(8), 81–85. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.81-85>
11. Кириченко О.В., Діброва О.С., Мотрічук Р.Б., Ващенко В.А., Колінько С.О. Цибулін В.В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. 2019. № 3, С. 56-67. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.176874>
12. Кириченко, Є., Гвоздь, В., Ващенко, В., Кириченко, О., Дядюшенко, О., Мельник, В.. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. №2(12), С. 111–121. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).111-121](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).111-121)
13. Кириченко, Є. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2021. №5(2), С. 37-51. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-37-50>
14. N. Kozyar, O. Kyrychenko, I. Romaniuk, Ya. Ballo, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar. Mathematical modelling of the combustion process of particles of two-component metal alloys in the decomposition products of pyrotechnic mixtures. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2024. №1(54), 50-62. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21894>
15. Н. Козяр, О. Кириченко, В. Ващенко, Є. Школяр, М. Куценко. Закономірності процесу горіння частинок металевих пального у продуктах розкладання піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2024. №2(55), 92-105 <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24568>
16. Кириченко Є.П., Ковалишин В.В., Гвоздь В.М., Ващенко В.А., Колінько С.О. Цибулін В.В. Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве пальне + оксид металу при зовнішніх термічних діях. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. 2021. № 4, С. 68-82. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.251602>

References

1. H. Yaman, V. Çelik, E. (2014). Degirmenci, Experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid rocket propellants. *Fuel* 115, 794. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.033>
2. Uhlenhake, K.E.; Yehia, O.R.; Noel, A.; Terry, B.C.; Örnek, M.; Belal, H.M.; Gunduz, I.E.; Son, S.F. (2022). On the Use of Fluorine-Containing Nano-Aluminum Composite Particles to Tailor Composite Solid Rocket Propellants. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 47, e202100370. <https://doi.org/10.1002/prep.202100370>
3. Skaggs, M.N., Hargather, M.J. & Cooper, M.A. (2017). Characterizing pyrotechnic igniter output with high-speed schlieren imaging. *Shock Waves* 27, 15–25. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0640-5>
4. Uma Vellaisamy, Shelly Biswas, (2020). Effect of metal additives on neutralization and characteristics of AP/HTPB solid propellants, *Combustion and Flame*, Volume 221, 326-337, ISSN 0010-2180, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.006>.
5. Yasmine Aly, Mirko Schoenitz, Edward L. (2013) Dreizin, Ignition and combustion of mechanically alloyed Al–Mg powders with customized particle sizes, *Combustion and Flame*, Volume 160, Issue 4, 835-842. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.12.011>.
6. Belikov, A., Shkoliar, Ie., Motrychuk, R., Tomenko, M. (2024). Combustion processes of aluminum powder in pyrotechnic mixtures. *Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety*, №8(1), 122-130. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21888>
7. Daniel R. Guildenbecher, Marcia A. Cooper, (2014). Walter Gill, Howard Lee Stauffacher, Michael S. Oliver, and Thomas W. Grasser, "Quantitative, three-dimensional imaging of aluminum drop combustion in solid propellant plumes via digital in-line holography," *Opt. Lett.* 39, 5126-5129. <https://doi.org/10.1364/OL.39.005126>.
8. Kyrychenko, O.V., Zemliansky, O.M., Motrychuk, R.B., Shkoliar, Ie.V., Kovbasa V.O. (2023). Thermodynamic calculations for determining the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. *Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety*, №7(1), 191-201. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21883>
9. Dibrova, O., Kyrychenko, O., Motrichuk, R., Tomenko, M., Melnyk, V. (2020). Fire Safety Improvement of Pyrotechnic Nitrate-Metal Mixtures under External Thermal Conditions. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (51)), 44–49. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.199252>
10. Kyrychenko, O.V., Dibrova, O.S., Motrichuk, R.B., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O. (2019). The research of ignition and combustion of aluminum and magnesium alloys in the products of decomposition of solid pyrotechnical fuels, *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, 2 (8), 81-85. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.81-85>
11. Kyrychenko, O.V., Dibrova, O.S., Motrychuk, R.B., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O., Tsybulin, V.V. (2019). Investigation of the influence of strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on fire safety of products on their basis, *Bulletin of the Cherkasy State Technological University*, 3, 56-67. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.176874>
12. Kyrychenko, E., Gvozdz, V., Vashchenko, V., Kyrychenko, O., Dyadushenko, O., Melnyk, V. (2021). Patterns of influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides. *Civil defense and fire safety*, 2(12), 111-121. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).111-121](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).111-121)
13. Kyrychenko, Y. (2021). Research of external heat shock processes for pyrotechnic metal oxide products in conditions of shooting and flight *Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety*, 5(2), 37-51. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-37-50>
14. N. Kozyar, O. Kyrychenko, I. Romaniuk, Ya. Ballo, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar. (2024). Mathematical modelling of the combustion process of particles of two-component metal alloys in the decomposition products of pyrotechnic mixtures. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, № 1(54), 50-62. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21894>
15. N. Kozyar, O. Kyrychenko, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar, Kutsenko M. (2024). Regularities of the combustion process of metallic fuel particles in the decomposition products of pyrotechnic multicomponent nitrate-metallized mixtures. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, №2(55), 92-105. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24568>
16. Kyrychenko Ye.P., Kovalyshyn V.V., Hvozdz V.M., Vashchenko V.A., Kolinko S.O., Tsybulin V.V. (2021). Doslidzhennia mekhanizmu ta rozrobka modeli rozvytku protsesu horinnia pirotekhnichnykh sumishei metaleve palne + oksyd metalu pry zovnishnikh termichnykh diakh. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. № 4, S. 68-82. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.251602>

Надійшла до редакції 18.03.2025

Рецензент канд. техн. наук, доц. Костянтин МИГАЛЕНКО

Ковбаса Вікторія Олегівна – ад'юнк, Національний університет цивільного захисту України, (18034, вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, Україна).

E-mail: kovbasa_viktoriia@nuczu.edu.ua

Кириченко Оксана В'ячеславівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри, Національний університет цивільного захисту України, (18034, вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, Україна).

E-mail: kyrychenko_oksana@nuczu.edu.ua

Куценко Марія Анатоліївна – кандидат економічних наук, доцент, докторант, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: kutsenko_mariia@chipb.org.in

Вашенко В'ячеслав Андрійович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри, Черкаський державний технологічний університет, (18006, бул. Шевченка, 460, м. Черкаси, Україна).

E-mail: kaf-physics@ukr.net

Березовський Андрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: berezovskyi_andrii@nuczu.edu.ua

Школяр Євгеній Володимирович – кандидат психологічних наук, викладач кафедри, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: shkolyar_87@ukr.net

Мотрічук Роман Борисович – доктор філософії в галузі пожежної безпеки, викладач кафедри, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: r.motrichuk@gmail.com

RESEARCH OF THE MECHANISM AND DEVELOPMENT OF MODELS FOR THE DEVELOPMENT OF THE COMBUSTION PROCESS OF TWO-COMPONENT PYROTECHNIC MIXTURES OF METAL FUELS WITH FLUOROPLASTS UNDER CONDITIONS OF EXTERNAL THERMAL INFLUENCES

Purpose. Establishing the combustion mechanism of two-component metal-compacted fuels and fluoroplastics, developing a model of their combustion to determine the critical ranges of changes in the burning rate of mixtures under the influence of external thermal effects.

Methods. For the research, well-known methods of physicochemical analysis were used, in particular contact and non-contact methods of temperature measurement, as well as high-speed microfilming of combustion processes. Methods of mathematical modeling, numerical analytical methods for solving heat and mass transfer equations, chemical kinetics, as well as methods of mathematical statistics were also used, using standard software for modern numerical methods. The relative error of measurements of the main characteristics of combustion of mixtures (temperatures of combustion products of mixtures, burning rate, etc.) under the specified conditions did not exceed 6...8%.

Results. External thermal effects on the surfaces of the bodies of products with charges of the studied mixtures during storage, transportation, firing and flight can lead to significant heating of their bodies. This heating causes the development of an explosive combustion process of the mixture charge at elevated temperatures and pressures of the external environment. This is the main reason for the acceleration of the combustion process, premature operation of the product and its fire-hazardous destruction. Therefore, at the design stage and bench tests that simulate these external thermal effects, it is important to determine the critical ranges of changes in the burning rate of the mixture charges, exceeding which leads to fire-explosive destruction of products in extreme operating conditions.

Scientific novelty. The combustion mechanism of two-component mixtures of metal fuel and fluoroplastic powders has been established, according to which the process of converting the initial mixture into combustion products is stationary, one-dimensional and occurs in three spatially separated zones: a heated layer in the condensed phase of the mixture; a reaction zone of the condensed phase of the mixture; a flame zone (heat release zone of the gas phase). A model of combustion of mixtures has been developed that takes into account the kinetic characteristics of thermal decomposition of fluoroplastics and high-temperature oxidation, ignition and combustion of metal particles in the decomposition products, which allows more accurately (relative error reduced to 6...8% instead of 10...12% in existing models) to determine critical ranges of changes in the burning rate of mixtures under conditions of external thermal effects, the excess of which leads to an acceleration of the combustion process of mixtures and fire-explosive destruction of pyrotechnic products based on them.

Practical significance. The results of theoretical and experimental research, obtained in the form of mathematical models and an experimental database, allow optimizing technological parameters (ratio of components, dispersion of metal fuel, nature of metal and oxidizer) at the stage of manufacturing products, increasing their ignition temperature and reducing the probability of fire and explosive destruction during storage and transportation. When launching products, optimizing the speeds and angles at which they are fired, it is possible to reduce the heating temperature of metal shells of mixture charges and reduce the number of premature explosive destructions during firing and flight.

Key words: fire safety, pyrotechnic metallized mixtures based on fluoroplastics, thermal effects, combustion processes, combustion models of condensed systems.

Kovbasa Viktoriia – Adjunct, National University of Civil Protection of Ukraine, (18034, 8 Onoprienko str., Cherkasy, Ukraine).

E-mail: kovbasa_viktoriia@nuczu.edu.ua

Kyrychenko Oksana – Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Chair, National University of Civil Protection of Ukraine, (18034, 8 Onoprienko str., Cherkasy, Ukraine).

E-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in

Kutsenko Mariia – PhD of economic sciences, docent, doctoral student, National University of Civil Protection of Ukraine, (Chernyshevskaya street, 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: kutsenko_mariia@chipb.org.in

Vaschenko Vyacheslav – Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Chair, Cherkasy State Technological University, (18006, 460 Shevchenko blvd., Cherkasy, Ukraine).

E-mail: kaf-physics@ukr.net

Berezovskyi Andrii – PhD in technical sciences, docent, head of the chair, National University of Civil Protection of Ukraine, (18034, Onoprienko street 8, Cherkasy, Ukraine).

E-mail: berezovskyi_andrii@nuczu.edu.ua

Ievhenii Shkoliar – PhD of Psychological Sciences, Lecturer of the Chair, National University of Civil Protection of Ukraine, (Onoprienka str., 8, Cherkasy, Ukraine, 18034).

E-mail: shkolyar_87@ukr.net

Motrichuk Roman – PhD in technical sciences, Lecturer of the Chair, National University of Civil Protection of Ukraine, (Onoprienka str., 8, Cherkasy, Ukraine, 18034).

E-mail: r.motrichuk@gmail.com