

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ім. І.І.Мечнікова

На правах рукопису

ШОШИН ЮРІЙ ЛЕОНІДОВИЧ



ЛАМІНАРНЕ ПОЛУН'Я У ГАЗОЗАБІСАХ: ШВИДКІСТЬ ТА СТРУКТУРА

01.04.17 - хімічна фізика, в тому числі фізика горіння та вибуху

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико - математичних наук

Одеса - 1993

11520.127
Роботу виконано в Одеському державному університеті
ім. І.І. Мечникова

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
академік АН України, професор ЗОЛУТКО А.Н.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор АСЛАНОВ С.К.
кандидат фізико-математичних наук
ЛЕГЕНДА Г.А.

Керівна організація: Інститут технічної теплофізики АН України

Захист дисертації відбудеться "22" жовтня 1993 р.
в "___" годин на засіданні Спеціалізованої ради по спеціальності
Д 068.24.03 - хімічна фізика, в тому числі фізика горіння та
вибуху, в Одеському державному університеті ім. І.І.Мечникова
(270100, м.Одеса, вул. Петра Великого, 2)

З дисертацією можливо ознайомитися в науковій бібліотеці
Одеського державного університету

Автореферат розіслано "21" вересня 1993 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради
кандидат фізико-математичних наук,

ст. наук спів.

С.В. Маргандук

С.В.Маргандук



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Порошкоподібні паливі широко вживаються у різних галузях промисловості. Металеві порошки використовуються як основний енергоносіє у деяких типах ракетних двигунів, для теплового і оптичного накачування автономних лазерів. Унікальні властивості конденсованих продуктів згорання газозавісів - хімічна чистота, вузький фракційний склад, субмікронні розміри часток - роблять перспективним їх застосування у техніці і технології. Вивчення закономірностей горіння газозавісів важливо також з точки зору пожежовибухобезпеки пов'язаних з порошками виробництв.

Ламінарне полум'я у газозавісу має складну "мікроструктуру" обумовлену локалізацією хімічних реакцій на поверхні або навколо поверхні часток. Це ускладнює як експериментальну діагностику такого полум'я, так і створення теоретичних моделей. За теперешнього часу далекі від рішення такі важливі питання, як можливість застосування одного з основних понять у теорії горіння - нормальної швидкості полум'я - до реального полум'я у газозавісах, роль радіаційної теплопередачі у малооб'ємному полум'ї. Для вирішення цих проблем, а також для експериментального вивчення структури фронту полум'я необхідна розробка і використання нових безконтактних діагностичних методів.

В існуючих теоретичних моделях ламінарного полум'я у газозавісах використовується континуальний підхід. Для зрозуміння закономірностей розповсюдження полум'я у газозавісах швидкогорючих матеріалів потрібне створення моделей враховуючих дискретну природу завісу.

При розповсюдженні полум'я у газозавісу можливі два асимптотично-граничних режими реагування часток - дифузійний і кінетичний. На практиці варьовання початкових параметрів завісу може призводити до зміни режиму реагування часток у зоні горіння. Викликає зацікавленість дослідження характеристик фронту полум'я в області проміжних, кінетично-дифузійних режимів.

Мета даної роботи полягає у теоретичному і експериментальному дослідженні характеристик фронту полум'я у газозавісу, обумовлених особливостями тепловиділення у зоні горіння, експериментальній перевірці можливості застосування поняття нормальної швидкості до реального полум'я у газозавісах, а також у розробці і застосуванні необхідних для таких досліджень безконтактних методів вимірів.

Наукова новина роботи. Уперше для дослідження структури фронту полум'я у газозавісу були застосовані нові безконтактні оптичні методи вимірів - голографічної інтерферометрії і "спектрального зрізу".

Було одержано пряме експериментальне підтвердження застосованості до малооб'ємних ламінарних пламен у газозавісах нормальної швидкості полум'я.

Уперше одержано самопогоджений розв'язок для дискретної моделі ламінарного полум'я у газозавісу. Визначені основні закономірності розповсюдження полум'я, обускладнені дискретною природою завісу.

При допомозі численної моделі уперше були досліджені характеристики фронту полум'я у газозавісу в області проміжних кінетично-дифузійних режимів реагування часток.

Були експериментально досліджені закономірності розповсюдження полум'я у газозавісу цирконія. При допомозі дискретної моделі дано пояснення одержаної аномальної залежності швидкості полум'я від концентрації окислювача.

Уперше експериментально визначені залежності швидкості полум'я від початкової температури завісу і досліджена структура фронту полум'я у газозавісах алюмінію в азот-кисневому і гелій-кисневому середовищах.

Апробація роботи. Матеріали дисертації докладались на IX Всесоюзнім симпозіумі з горіння та вибуху (м.Чорногородка, 1989р.), XIII Всесоюзнім семінарі з електрофізики горіння (Чебоксари, 1989), III Міжнароднім семінарі з структури полум'я (Алма-Ата, 1989р.), III Всесоюзній школі-семінарі з макроскопічної кінетики, хімічної і магнітної гідродинаміки (Красноярск, 1990р.), XXIII Міжнароднім симпозіумі з горіння (Орлеан, Франція, 1990р.), III Міжнароднім семінарі з спеціальних питань ракетних двиг (Лампольдхаузен, Німеччина, 1991), XIII Міжнароднім colloquium з динаміки вибуху і реакційних систем (Нагоя, Японія, 1991)

Публікації. За результатами дисертації мається 11 опублікованих робіт, список котрих приведено у кінці автореферату.

Структура і об'єм роботи Дисертація складається з вступу, чотирьох глав, висновків, і списку літератури. Загальний об'єм дисертації 103 сторінки, включаючи 42 малюнки і 2 таблиці, плюс 1 укладка. Бібліографія содерже 43 найменування.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність і практична цінність розглядаємої у дисертаційній роботі проблеми, сформульована мета дослідження.

У першій главі подано огляд літератури, присвячений теоретичним і експериментальним дослідженням ламінарних двофазних пламен, сформульовані задачі дослідження.

У другій главі приведена схема експериментального пристрою для створення ламінарного двофазного факелу і дано опис безконтактних оптичних методів, застосованих для вивчення структури фронту полум'я у газозавісах.

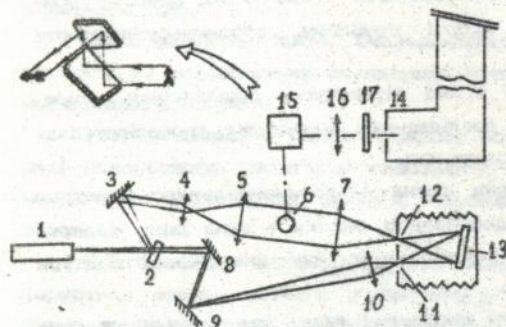
Ламінарний бунзенівський двофазний факел створювався на спеціальному пилевому пальнику забезпечуючим рівномірну подачу одного завісу протягом 5+7 хвилин.

Пальник обладнували вихідним охолодженим конічним соплом з кільцевим пропан-кисневим стабілізатором. Використання сопла дозволяло запобігти пресококу полум'я в систему подачі і зриву полум'я із зрізу пальника. Для проведення експериментів по залежності швидкості полум'я від початкової температури завісу передбачався підігрів завісу за допомогою трубчатої електроніки.

Для визначення температурного поля газової фази факелу був використаний метод голографічної інтерферометрії. Оптична схема знімання інтерферограм, створена на базі імпульсного голографічного пристрою УГ-ІМ, наведена на малюнку 1. Інтерферограми знімалися методом двох експозицій у смугах нескінченної ширини. Для захисту голограми від потужного випромінювання факелу і фільтрації розсіяного на частках випромінювання лазера використовувались оптичні фільтри об'єktiv-діафрагма (7,10,11,12). За одержаними інтерферограмами при допомозі зворотних перетворень Абеля численно розраховувалось поле показника заломлення i , після, з використанням співвідношення Гладстона-Дейла і закону ідеального газу - температурне поле факелу.

Для визначення розподілу температур конденсованої фази і концентрацій реагуючих речовин у фронті полум'я був розроблений і застосований метод "спектрального зрізу" - мал. 1. Зображення факелу б поверталось системою дзеркал 15 на 90° і об'єktivом 17 фокусувалось на щіль спектрографу 14. Таким чином, кожна спектральна лінія на спектрограмі являла собою монохроматичне зображення вирізаного шлілю перерізу факелу. Несхідні для розрахунків раді-

Мал. 1. Оптична схема реєстрації інтерферограм і "спектрально-го зрізу" факела



1 - рубіновий лазер;
 2 - напівпрозоре дзеркало;
 3,8,9 - глухі дзеркала;
 4,5,7,10,16 - об'єктиви;
 6 - факел;
 11,12 - діафрагми;
 13 - голограма;
 14 - спектрограф;
 15 - поворотна система дзеркал;
 17 - фотозагальф.

альні розподіли об'ємної монохроматичної інтенсивності розраховувались за розподілами інтенсивності уздовж спектральних ліній за допомогою зворотних перетворень Абеля.

У третій главі наведені результати експерименту, демонструючого можливість застосування поняття нормальної швидкості до малооб'ємних пламен у газозавісу, проведено теоретичний аналіз закономірностей розповсюдження ламінарного кондуктивного фронту полум'я у газозавісу, обумовлених дискретною природою теплових джерел і зміною режиму реагування часток у фронті пламени з дифузійного на кінетичний.

У теоретичних роботах, присвячених ламінарному пламені у газозавісах, як правило, розглядається фронт горіння, характеристики якого не залежать від початкових і межових умов, тобто розповсюджуються з нормальною швидкістю. Характеристики такого фронту (автохвилі) визначаються, головним чином, механізмом передачі тепла і якість функції тепловиділення.

Передача тепла у фронті полум'я у газозавісу може відбуватися за двома механізмами: молекулярної теплопроводності (кондуктивний) і випромінювання (радіаційний). Експериментально стаціонарне полум'я з радіаційною теплопередачею, видимо, не спостерігалось. Важкість його здійснення пов'язана з тим, що характерні розміри пристрою повинні значно перевершувати довжину вільного пробігу фотону у газозавісу. Але при розповсюдженні пламені по таким об'ємам горіння переходить у турбулентний режим зі швидкістю фронту значно перевершуючою завбачену радіаційним механізмом.

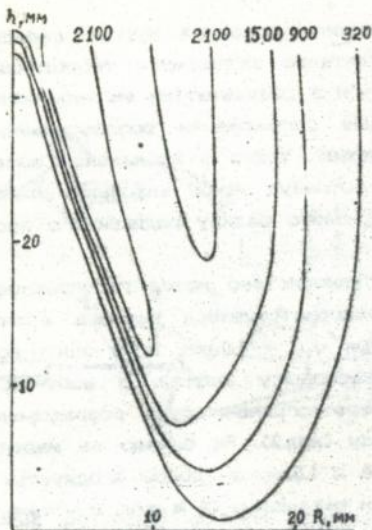
У малооб'ємних ламінарних пламенах основний механізм передачі тепла - кондуктивний. Для коректного зіставлення теоретичних моделей кондуктивного фронту полум'я з результатами експериментів повинні бути прямі експериментальні підтвердження розповсюдження фронту горіння у автохвильовому режимі, тобто з нормальною швидкістю. Експериментальної перевірки потребує також виконання необхідної для цього умови - нехтучи малого впливу радіаційного прогріву на швидкість полум'я.

Для вирішення даної проблеми використано метод голографічної інтерферометрії. В експериментах використовувався порошок алмінію АСД-4 з середнім розміром часток $d_{10} = 6.0\text{мкм}$. Були зняті голографічні інтерферограми факелу газозавісу алюмінію в азот-кисневих сумішах. За одержаними інтерферограмами було розраховано поле температур газової фази факелу (мал.2). Як бачимо на малюнку, ширина зони прогріву складає $\Delta \approx 1.5\text{мм}$, що добре згоджується з величиною завбаченою кондуктивним механізмом ($\Delta \approx a/v$, a - температуропровідність, v - швидкість полум'я). Температура вихідного завісу по всій висоті факелу виявилась практично рівною комнатній впритул до зони молекулярної теплопроводності. Це говорить про відсутність радіаційного прогріву завісу перед зоною горіння, тобто механізм розповсюдження полум'я - суто кондуктивний.

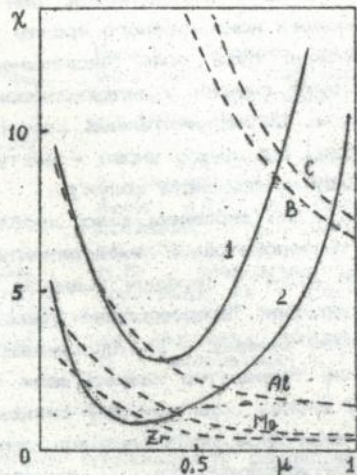
За вимірюваним профілем швидкості плинущавісу на зрізі пальника $V(R)$ і за формою твірної фронту полум'я $h(R)$ визначені профілі локальної швидкості полум'я $v(R) = V(R)\cos\arctg\left(\frac{dh}{dR}\right)$. Твірною фронту полум'я бралися в одному разі лінія максимальної засвітки на фотографії факелу, у другому - ізотерма відповідна середині зони прогріву, розрахована за інтерферограмою.

На профілі локальної швидкості, розрахованому за інтерферограмою присутнє широке плато, відповідне, очевидно нормальній швидкості полум'я. Відсутність плато на профілі швидкості, визначеному за допомогою фотографії, пояснюється, як і у випадку аналогічних вимірів для гомогених пламен, значним скривленням ліній току в зоні горіння.

Основні особливості полум'я з молекулярною теплопроводністю визначаються власт зостями функції тепловиділення. Найважливіша властивість теплових джерел у фронті полум'я у газозавісу - їх дискретність. Загальноприйнятим підходом для опису процесу розповсюдження полум'я у газозавісах є приближення укладених континуумів. У цьому приближенні кожна точка середовища характеризується скінченною усередненою щільністю джерел. Під словом "точка"



Мал. 2



Мал. 3

розуміється об'єм середовища, який містить велике число часток, але малий у порівнянні з характерними масштабами фронту - його тепловою $l_T = a/\nu$ і хімічною $l_X = \nu t_{\Gamma}$ (t_{Γ} - час горіння часток) шириною. Можливо припустити, що приближення суцільного середовища не буде справедливим, коли відстань між джерелами порівняно з характерними розмірами хвилі горіння.

Розглянемо просту модель фронту полум'я у газозавісній дифузійно-горючій частці. Припустимо, що частки, які складають регулярну решітку зі стороною l запалюються при деякій фіксованій температурі T_1 і горять з постійним тепловиділенням фіксований час горіння t_{Γ} . Температура T_1 чергового спалахуючого шару часток досягається за рахунок адитивної дії горячих або згорівших до моменту спалахнення шару часток. Виходячи з цього запишемо вираження зв'язуюче швидкість полум'я ν з температурою спалахнення часток (у безрозмірних перемінних):

$$\chi \mu = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{\left(\frac{i}{2} - \chi\right)}^{\frac{i}{2}} \frac{e^{-\frac{i^2}{4\tau}}}{2\sqrt{\pi\tau}} d\tau \cdot \theta\left(\frac{i}{2} - \chi\right) \quad (1)$$

де $\mu = \overline{c_p}(T_1 - T_0)/BQ$; $\chi = 4at_r/L^2$; $\tau = 4at/L^2$; $x = lv/4a$; $\overline{c_p}$ - середня об'ємна теплоємність завісу; T_0 - початкова тем. ратура завісу, B - масова концентрація часток, Q - тепловий ефект реакції, $\theta(\dots)$ - функція Хевісайда.

Коли $x\chi \rightarrow 0$ (час горіння часток малий) рівняння (1) спрощується:

$$\mu = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{e^{-i\chi} \sqrt{\chi}}{\sqrt{i\pi}} \quad (2)$$

і не залежить від часу горіння джерел. У цьому випадку швидкість полум'я не повинна залежити від концентрації окислювача. Континуальна модель у тих самих припущеннях передбачає залежність $v \sim \sqrt{c_{ок}}$.

Швидкість, розрахована за дискретною моделлю завжди нижче, ніж за моделлю суцільного середовища. Різниця у швидкостях росте зі зменшенням параметру χ - безрозмірного часу горіння. При $x\chi = 4t_r/v \rightarrow 0$ швидкість полум'я у моделі суцільного середовища прямує до нескінченності, а у дискретній моделі - до кінчної границі, визначеної рівнянням (2).

На мал.3 в координатах χ - μ показані умовні границі реалізації континуальної моделі і різниця у швидкостях, розрахованих за двома моделями скл. має 10% на кривій 1 і 30% на кривій 2 і зменшується по мірі віддалення уверх від границі $\chi = 0$.

При будь-яких значеннях χ різниця, яку дають дві моделі найбільш велика при $\mu \rightarrow 0$ і $\mu \rightarrow 1$. У першому випадку $\chi \leq 1$ і теплова ширина полум'я стає порівняною з відстанню між частками ($\tau/v \leq D$). У другому випадку $x\chi \leq 1$ і τ - відстанню між частками стає порівняною з хімічною товщиною полум'я ($vt_r \leq D$).

На мал.3 приведено також зв'язок між параметрами μ і χ для газозавісів деяких елементів. Як бачимо з малюнка, для завісів швидкопалючих металів (Mg, Zr) різниця між швидкостями, розрахованими за двома моделями може бути значною.

В області параметрів, де для опису ламінарного кондуктивного полум'я у газозавісах може бути застосоване континуальне приближення, структура і швидкість фронту визначаються, головним чином, режимом реагування часток. За допомогою чисельної моделі були досліджені характеристики фронту полум'я в області проміжних кінетично-дифузійних режимів. Вирішувалась система з чотирьох рівнянь, яка описує розповсюдження полум'я у газозавісу гетерогено реагуючих часток з реакцією першого порядку за окислювачем. Система включала рівняння теплопровідності, дифузії окислювача, про-

гріву і вигорання часток. Варіюваними параметрами вибрали початковий радіус часток r_0 і масову концентрацію завісу B .

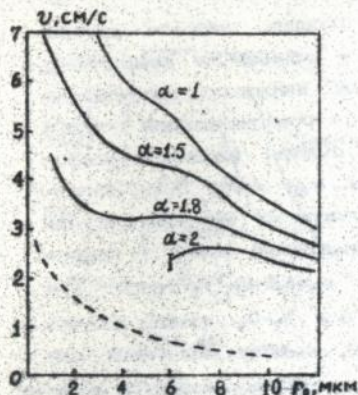
При малих значеннях коефіцієнту надміру окислювача α (для завісу з вибраними параметрами - $\alpha \leq 1$) перехід від дифузійного до кінетичного режиму реагування при поступовому зменшенні початкового радіусу часток r_0 відбувається поступово, в широкій області параметрів. Відповідно, монотонно росте швидкість полум'я і "плавно" змінюється структура фронту горіння, не перетворюючи різких змін. При $1.5 \leq \alpha \leq 2$ на залежності $v(r_0)$ виникає плато (мал. 4), ширина якого росте із збільшенням α . В області плато зріст потужності тепловиділення у фронті полум'я зв'язаний із зростанням питомої поверхні реагування ($S \sim 1/r_0^2$) компенсується спадом швидкості гетерогенної реакції через зменшення температурного відриву часток від газу. При $\alpha \geq 2$ з поступовим зменшенням початкового радіусу часток швидкість полум'я також виходить на плато, але потім при досягненні деякого критичного значення $r_0^{кр}$ відбувається стрибкоподібний перехід до кінетичного режиму реагування. Стрибкоподібне перестроювання структури фронту полум'я супроводжується спадом швидкості полум'я до величин, не реалізуємих у експерименті. Таким чином, можна говорити про існування не зв'язаної з теплоутратами концентраційної границі розповсюдження пламени.

Четверта глава присвячена експериментальному дослідженню ламінарного полум'я у газозавісах цирконію в азот-кисневих сумішах і у газозавісах алюмінію в азот-кисневих і гелій-кисневих сумішах.

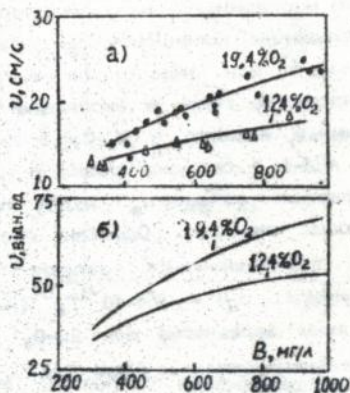
Експериментальні дослідження закономірностей розповсюдження полум'я у газозавісу цирконію окрім практичної викликає також і наукову цікавість, оскільки при горінні цього металу повинні виявлятися ефекти, обускладнені дискретною природою завісу (мал.3).

В експериментах використовувався порошок цирконію з розміром часток менш 5мкм. Аналіз фронту полум'я методом "спектрального зрізу" показав, що в дослідженому діапазоні концентрацій 10 кисню (<23%) відсутні газоподібні окисли, тобто частки горять гетерогенно. За описаною вище методикою були зняті голографічні інтерферограми факелу газозавісу цирконію і розраховане температурне поле газової фази. Одержана ширина зони прогріву (~ 1.5 мм) відповідає молекулярному переносу тепла від зони горіння.

На мал. 5а показані визначені експериментально залежності швидкості полум'я від масової концентрації металу при двох значеннях концентрації кисню. З малюнку видно, що при нітьких концен-



Мал. 4



Мал. 5 а,б

траціях металу швидкість полум'я не залежить від концентрації окислювача. Континуальні моделі полум'я у газозавісї дифузійно горящих часток предбачають залежність $v \sim t_{\Gamma} \sim \sqrt{C_{ок}}$. Спостеріганий ефект пояснюється дискретною природою теплових джерел у газозавісї. У дискретній приближенні при $\alpha \chi = v t_{\Gamma} \ll 1$ швидкість полум'я не залежить від часу горіння часток. Для газозавісів цирконію при масовій концентрації металу $B = 300$ мг/л і концентрації окислювача $C_{O_2} = 19.4\%$ розрахункове значення $\alpha \chi$ не перевищує 0.2. Розраховані за рівняннями (1) залежності швидкості полум'я від концентрації завісу цирконію при двох значеннях концентрації кисню наведені на мал. 5б. Як видно з малюнку, спостерігається хороша якісна згода розрахованій за дискретною моделлю залежності з експериментальною.

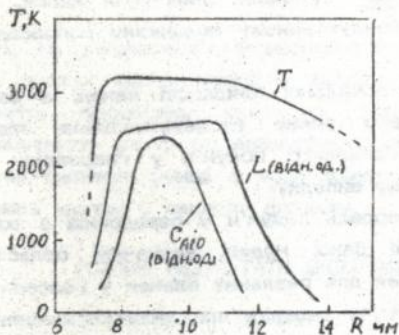
Процес розповсюдження полум'я у газозавісї часток алюмінію може бути описаний за допомогою континуального підходу в усій практично цікавій області параметрів (мал.3). У рамках такого приближення швидкість і структура полум'я у газозавісї визначається поперед всього режимом реагування часток у зоні горіння. При постійному хімічному складі пального і окислювача очевидно, що перехід від дифузійного режиму до кінетичного можливий тільки за рахунок змінення величини коефіцієнту массообіна $\beta = Nu_D D/d$. Можливість змінення режиму реагування прийнято зв'язувати зі змінням вихідного розміру часток, але для газозавісів алюмінію, необхідне для кінетичного режиму зменшення розмірів часток опинилося

за межами експериментально доступного. Можливо вибрати другий шлях збільшення коефіцієнту масообміна - збільшення коефіцієнту дифуз. кисню при зміні у газовій суміші інертного газу-розріджувача азоту на гелій. В експериментах по розповсюдженню полум'я у газозавісу алюмінію в N_2-O_2 і $He-O_2$ сумішах використовувався порошок АСД-4 з середнім розміром часток $d_{10} = 6$ мкм. Були досліджені залежності швидкості горіння від початкової температури завісу в обох випадках. Одержані експериментальні криві з доброю точністю апроксимуються залежностями $v_H = 6.5 \cdot 10^{-6} T_0^2$ (м/с) для $He-O_2$ суміші і $v_H = 4.4 \cdot 10^{-5} T_0^{1.4}$ (м/с) для N_2-O_2 суміші. Значно більш сильну залежність для $He-O_2$ суміші, подібну аналогічній для углеводнево-повітряних сумішей ($v_H \sim T_0^2$) можливо пояснити кінетичним режимом реагування часток у цьому випадку.

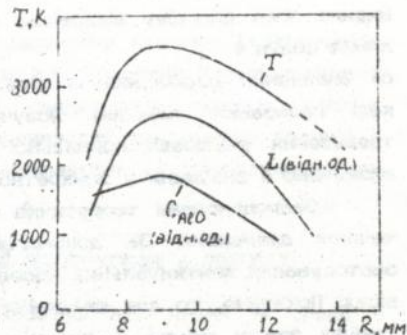
Для оцінки ефективної енергії активації можливого кінетичного процесу був використаний термодинамічний розрахунок температури горіння алюмінію в $He-O_2$ суміші і експериментально визначена залежність швидкості полум'я від масової концентрації завісу. Получені у результаті обробки серії точок, нанесені у координатах $\ln v - 1/T$, добре апроксимуються двома прямими. Злом залежності відбувається при $T \approx 3200$ К. Прямі при $T < 3200$ К відповідають слабоактивованій реакції з енергією активації 3180 кал/моль, при $T > 3200$ К енергія активації 17750 кал/моль. Збільшення енергії активації при $T > 3200$ К можливо зв'язано з випаруванням значної долі алюмінію у передполум'яній зоні (температура кипіння алюмінію $T_k = 2730$ К). Швидкість полум'я у цьому випадку контролюється кінетикою газозавісних реакцій. При більш низьких температурах частки, можливо, реагують в проміжному, дифузійно-кінетичному режимі, і ефективна енергія активації цього процесу невелика.

Для вивчення структури фронту полум'я у газозавісу алюмінію в N_2-O_2 і $He-O_2$ сумішах був використаний метод "спектрального зрізу". За суцільним спектром були розраховані розподіли у фронті полум'я температури конденсованої фази $T(R)$, а за інтегральною інтенсивністю молекулярної полоси $AlO \nu' = 1 \rightarrow \nu'' = 0$ (перехід $v^2 \Sigma - X^2 \Sigma$) - розподіли відносної концентрації недоокислу AlO . Розраховані розподіли а також профілі інтегральної інтенсивності видимої частини суцільного спектру $L(R)$ наведені на мал. 2, б. На залежностях $T(R)$ і $L(R)$ для азотної суміші присутнє плато, обумовлене, видимо, випромінюванням мікросплайнів дифузійно горящих часток.

Більш різкий спад відносної концентрації недоокислу AlO в кінці зони горіння у порівнянні з профілем $T(R)$ і $L(R)$ можна по-



Мал. 6а.



Мал. 6б.

яснити таким чином. Як показує розрахунок рівноважного складу продуктів згорання при коефіцієнті надміру окислювача $\alpha = 0.7$, як у нашому досліді, концентрація Al_2O_3 складає 1%, а при $\alpha = 1$ зростає більш ніж на порядок. У початковій стадії горіння кисень і алюміній надходять у мікропламена в стехіометричному співвідношенні, а в кінці зони горіння, коли кисню вже не залишується, з алюмінію продовжує надходити з поверхні часток, енергетично корисним стає утвір Al_2O_3 із Al_2O і Al ; концентрація Al_2O_3 падає.

На розподілах $T(R)$ і $L(R)$ у фронті полум'я в $He-O_2$ суміші (мал. 6б) плато відсутнє, що узгоджується з припущенням про кінетичний режим реакування часток у цьому випадку. Висока відносна концентрація недоокислу Al_2O у початку зони горіння, видимо, обумовлена випаруванням значної долі алюмінію в предплазменній зоні і окисленням його в газовій фазі. Слабійший спад концентрації Al_2O у кінці зони горіння можна пояснити більшим значенням коефіцієнту надміру окислювача у даному випадку.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблені і застосовані безконтактні оптичні методи вимірів температур газової і ж-фази і концентрацій реагуючих речовин у фронті полум'я у газозавісах - голографічної інтерферометрії і "спектрального зрізу". За допомогою методу голографічної інтерферометрії:

а) виміряні поля температур газової фази ламінарних факелів газозавісів алюмінію і цирконію. Показано, що радіаційний прогрів за-

вису перед фронтом полум'я в обох випадках знехтуючи малий, а ширина зони прогріву відповідає кондуктивному механізму розповсюдження полум'я.

б) Знайдений радіальний профіль локальної швидкості паєні в факелі газозавісу алюмінію. Получено пряме експериментальне підтвердження реалізації нормальної швидкості полум'я у газозавісу і визначено її значення у конкретному випадку.

2. Запропонована теоретична модель полум'я у середовищі з точечними джерелами. За допомогою даної моделі визначені області застосування континуальних моделей для реальних пламен у газозавісах. Показано, що для швидкогорючих речовин при низьких концентраціях завісу швидкіс ь полум'я нечутлива до змінення концентрації окислювача. Цей ефект підтверджено в експерименті по розповсюдженні полум'я у газозавісу цирконію.

3. За допомогою чисельної моделі дослідженні закономірності змінення характеристик фронту полум'я, обумовлені зміною режиму реагування часток з дифузійного на кінетичний при поступовому зміненні параметрів завісу. Показано, що при значеннях коефіцієнту надміру окислювача α вище критичного, визначеного параметрами завісу зменшення початкового радіусу часток приводить до стрибкоподібного змінення режиму реагування часток. При цьому також стрибком змінюється структура фронту полум'я, а швидкість полум'я зменшується до значень, які не реалізуються в експерименті. Фактично це означає існування не зв'язаної з теплотратами концентраційної границі розповсюдження полум'я. При значеннях $\alpha < \alpha_{кр}$ швидкість і структура полум'я плавно змінюються із зміненням розміру часток.

4. Одержані експериментальні залежності швидкості полум'я від початкової температури у газозавісу алюмінію в N_2-O_2 і $He-O_2$ середовищі. Сильна залежність ($v \sim T_0^2$), одержана для газозавісу алюмінію в $He-O_2$ середовищі дозволяє припустити, що в цьому випадку процес розповсюдження полум'я контролюється кінетикою. За експериментальною залежністю швидкості полум'я від масової концентрації завісу і розрахункової термодинамічної температури горіння оцінені ефективні енергії активації можливого кінетичного процесу.

5. За допомогою методу "спектрального зрізу" виміряні радіальні розподіли інтегральної інтенсивності суцільного спектру, температури конденсованої фази і відносної концентрації AlO у фронті полум'я у газозавісах алюмінію в N_2-O_2 і $He-O_2$ середови-

шах. На залежностях інтенсивності суцільного спектру і температури к-фази від координати фронту в азот-кисневій суміші присутнє плато, відповідне, очевидно, зоні дифузійного горіння часток. Відсутність плато на аналогічних залежностях для фронту полум'я в гелій-кисневій суміші є додатковим аргументом за кинетичне реагування часток у данному випадку.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ

1. Шошин Ю.Л., Горошин С.В., Золотко А.Н. Пламя в среде с дискретными источниками // ДАН СССР.- 1986.- т.291, №1.- С.162-166.

2. Ageev N.D., Goroshin S.V., Zolotko A.N., Pseletayev N.I., Shoshin Yu.L. Определение скорости пламени предварительно перемешанной с окислителем газозвеси алюминия // В сб.: Горение гетерогенных и газовых систем. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. - Черногоровка, 1989. - С.83-85.

3. Шошин Ю.Л., Горошин С.В. Исследование структуры ламинарного факела газозвеси методами голографической интерферометрии и "спектрального среза" // В сб.: Электрофизика горения. Материалы XIII Всесоюзного семинара. - Чебоксары, 1990. - С.95.

4. Goroshin S.V., Ageyev N.D., Shoshin Yu.L. The Premixed Aluminium Dust Laminar Flame // Twenty-Third International Symposium on Combustion. Abstracts of Symp. Papers.- Orleans, France, 1980, p.137.

5. Шошин Ю.Л., Горошин С.В., Безродных А.К. Режимы горения частиц скорость пламени в газозвесах // В сб.: Макроскопическая кинетика, химическая и магнитная гидродинамика. Материалы Всесоюзной школы-семинара. - Томск: ТГУ. - 1990. - С.200-201.

6. Горошин С.В., Шошин Ю.Л., Золотко А.Н. Режимы горения частиц и скорость пламени в газозвесах // ДАН СССР. - 1991. - т.321, №3. - С.548-551.

7. Goroshin S.V., Shoshin Yu.L., Ageyev N.D., and Poletayev N.I. The Premixed Aluminium Dust Laminar Flame Structure // Flame Structure. - Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1991., - v.1.-p.213-217.

8. Ageyev N.D., Vovchuk Ja.I., Goroshin S.V., Zolotko A.N., Poletayev N.I., Shoshin Yu.L. The Structure of Diffusion Two Phase Flame // Flame Structure. - Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1991., - v.1.-p.184-188.

9. Goroshin S.V., Shoshin Yu.L., Zolotko A.N. Flame Propagation in a Medium with a Diskrete Heat Sources // 13th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Abstracts and Informations. Nagoya, Japan: Nagoya International Center, 1991 - p.152.

10. Goroshin S.V., Ageyev N.D., Shoshin Yu.L., Shewchuk V.G. The Premixed Laminar Flame in the Boron Dust Clouds // Second International Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion: Combustion of Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels. Book of Abstracts. Lampoldshausen, Germani, 1991.

11. Шосин Ю.Л., Горошин С.В., Золотко А.Н. Газодисперсный синтез оксида циркония // В сб: Горение. Материалы X Симпозиума по горению и взрыву. - Черноголовка, 1992. - С.55-57.

Полп.к печати 2.9.93г. Формат 60x84 1/16.

Объем 0,7уч.изд.л. I, Оп.л. Заказ № 1556 Тираж 100экз.

Гертипография Одесского управления по печати, цех №3.

Ленина 49.

463551

AB 28.124

AB 28.124