

На правах рукопису

ПОЛЕТАЄВ Микола Іванович

УДК 536.46

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЛАМІНАРНОГО ДИФУЗИЙНОГО  
ДВОХФАЗНОГО ФАКЕЛУ

Спеціальність 01.04.17 - Хімічна фізика, в тому числі  
фізика горіння та вибуху

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Одеса . - 1993 .

Робота виконана в Одеському державному університеті  
ім. І. І. Мечнікова.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00810714 (L)

Науків керівники: кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Вовчук Я. І.

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент Флорко О. В.

Науків опоненти: доктор технічних наук, професор  
Христич В. А.

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Чмель В. М.

Матеріальна організація - відділення високотемпературного перетворення енергії Інституту проблем енергозбереження АН України (ІПЕ, м. Київ).

Захист дисертації відбудеться "26" листопада 1993 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої ради Д 068.24.03 з фізико-математичних наук (фізика) в Одеському державному університеті (270100, Одеса, вул. Петра Великого, 2).

З дисертацією можливо ознайомитися у науковій бібліотеці Одеського державного університету.

Автореферат розіслано "20" жовтня 1993 року.

Вчений секретар

спеціалізованої ради, кандидат

фізико-математичних наук, доцент

С. В. Маргашук

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні десятиріччя в структурі пального, яке використовується в теплоенергетиці, авіаційній та ракетній техніці, нових областях хімічної технології все більшу питому вагу отримують порошкоподібні тверді палива. Ця обставина, а також питання забезпечення пожеже- та вибухобезпечності технологічних процесів та виробництв, що використовують порошкоподібні матеріали, потребує поглибленого розвитку теоретичних уявлень про горіння дисперсних систем і, зокрема, теорії дифузійних двофазних факелів, як найбільш поширеного в енергетиці способу організації спалювання диспергованого в газі рідкого або твердого порошкоподібного палива.

Потреба в дослідженні ламінарних дифузійних двофазних факелів (ЛДФ) у значній мірі пов'язана з технологічними застосуваннями горіння, наприклад, методу прямого отримання оксидів різних металів в ламінарному двофазному факелі. Цей метод, який названо газодисперсним синтезом (ГДС), дозволяє в безперервному режимі отримувати унікальні за своїми властивостями порошки оксидів будь-яких металів, для яких можливо створити ламінарний двофазний факел. Причому, як і в теплоенергетиці, найбільш перспективним для технологічних цілей є використання хімічного реактору на основі ЛДФ, тому що дифузійний принцип спалювання пального забезпечує максимальну безпеку та надійність технічних пристроїв.

Зараз ЛДФ дисперсного пального вивчений дуже мало. Відсутні надійні експериментальні дані про структуру ЛДФ та її залежність від параметрів газозавису та окислюючого газу, немає теоретичних моделей, які враховують особливості дисперсних систем, відсутня інформація про структуру зони горіння ЛДФ твердого пального, немає достовірних знань про можливість застосування добре розвинутої теорії газових факелів для аналізу горіння дисперсних систем.

Таким чином, запити практики спалювання твердого диспергованого пального як в існуючих так і у перспективних енергетичних пристроях, розробка нових типів протічних двофазних реакторів, які працюють у верхньому температурному режимі, настійно потребують більш детального вивчення ЛДФ. Тому проведення теоретичних та експериментальних досліджень в цьому напрямку є актуальною задачею як в прикладному, так і в науковому відношеннях.

Мета роботи полягала у виявленні головних фізичних закономірностей горіння газозавису твердих часток пального, що попередньо

не перемішаний з окислювачем в двофазному факелі, теоретичному та експериментальному дослідженні структури ЛДДФ дисперсного пального, тобто довжини та форми факелу, радіальних та аксіальних розподілів температури та концентрацій конденсованої і газової фаз і вивченні процесів, що протікають в зоні хімічної реакції факелу, а також у встановленні зв'язку між макропараметрами хімічного реактору на основі ЛДДФ і характеристиками конденсованих продуктів горіння.

Наукова новизна. Методом голографічної інтерферометрії вперше отримана кількісна інформація про структуру ЛДДФ, виявлено і пояснено наявність плато на радіальних розподілах температури газової фази. Вперше показано, що в зоні горіння ЛДДФ дрібні частки алюмінію ( $d \sim 5$  мкм) горять індивідуально в дифузійному режимі. Визначені температури конденсованої та газової фаз в зоні горіння. Запропонована математична модель ЛДДФ, яка враховує головну особливість горіння газозавису у факелі - відсутність дифузії пального на зустріч окислювачу газу. Вперше проведені експериментальні дослідження впливу режимних параметрів хімічного реактору на основі ЛДДФ на властивості конденсованих продуктів горіння Al та показана стабільність характеристик цільового продукту по відношенню до варіації цих параметрів.

Практична цінність. Отримані експериментальні та теоретичні результати можуть бути використані для розрахунків різних технічних пристроїв, що застосовують дифузійний принцип спалювання дисперзованого в газі порошкоподібного пального. На їх основі розроблено лабораторний технологічний регламент отримання методом ГДС ультрадисперсного порошку оксиду алюмінію. Створена експериментальна установка використовується як лабораторний варіант технологічної установки (продуктивністю біля 1 кг/год), яка дозволяє нарощувати для випробувань, атестації та маркетингу дослідні партії високочистих, ультрадисперсних оксидів металів сферичної форми, і в цій якості може використовуватися у дослідному виробництві.

В дисертації автор захищає:

1. Створений експериментальний стенд для одержання і діагностики ламінарних двофазних пламен дисперсного пального і нарощування дослідних партій оксидів металів.
2. Теоретичні результати дослідження впливу основних параметрів газозавису часток пального та пального на структуру ЛДДФ - довжину і форму факелу, поєдінку характерних величин у радіальних та аксіальних перетинах факелу, основні характеристики зони горіння.

3. Результати експериментальних досліджень теплової структури ЛДДФ і детальної структури його зони горіння.

4. Результати роботи по виявленню впливу параметрів хімічного реактору на базі ЛДДФ на дисперсні та фазові властивості оксиду алюмінію.

Апробація роботи. Результати роботи доповідались та обговорювались на I і III Міжнародних семінарах по макроскопічній кінетиці та хімічній газодинаміці (м. Алма-Ата, 1984, 1989), X Міжнародному симпозіумі по горінню та вибуху (Черноголовка, 1992), Другому Міжнародному симпозіумі по спеціальним паливам (Лампольдхаузен, Німеччина, 1991), Міжнародній конференції по горінню (Москва-Санкт-Петербург, 1993).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 5 робіт.

Об'єм та структура дисертації. Дисертація загальним об'ємом 165 машинописних сторінок складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, який включає 86 найменувань, 5 таблиць та 42 рисунки.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовані актуальність та практична цінність розглянутої в роботі проблеми, сформульована мета досліджень.

У першому розділі приведено літературний огляд, присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням ламінарних газових і двофазних пламен, викладаються головні задачі досліджень.

Другий розділ присвячено опису експериментального комплексу для отримання та дослідження двофазних факелів дисперсного пального, методик вимірів головних параметрів реагентів та характеристик продуктів горіння, голографічної та спектральної апаратури для діагностики полум'я.

Головні елементи експериментального комплексу приведені на рисунках 1-3.

Установка "пиловий" палик (рис. 1) дозволяє отримувати стаціонарні ламінарні двофазні факели і складається із двох встановлених вертикально коаксіальних трубок (1, 2) діаметрами 0.05 м і 0.024 м, відповідно. По внутрішній трубці подавалось дисперговане в інертному газі паливо, а по кільцевому проміжку між трубками - окислюючий газ необхідного складу. Рухомою трубкою (3) з молібденового скла захищала факел від зовнішніх збурень під час фото- і кінореєстрації та спектральних досліджень.

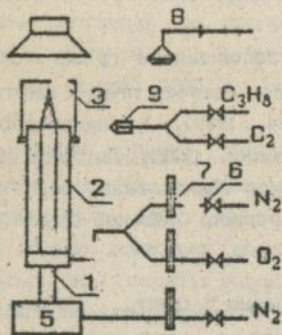


Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки "пилівий" пальник.

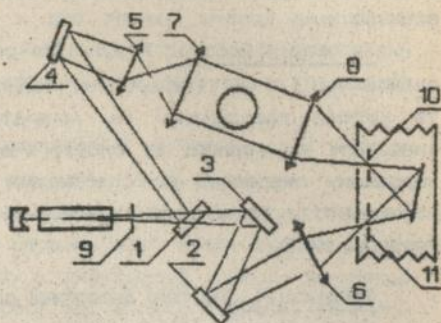


Рис. 2. Принципова схема голографічного інтерферометра.

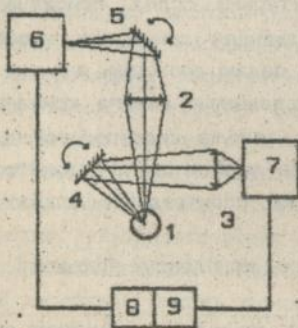


Рис. 3. Блок-схема спектрального комплексу.

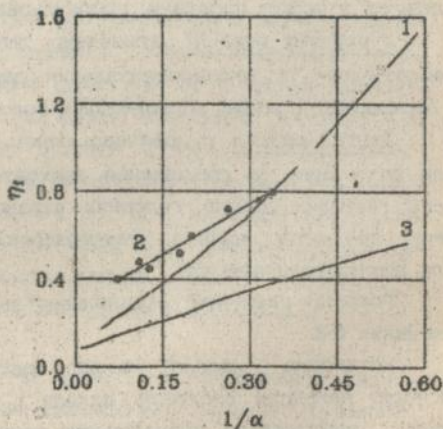


Рис. 4. Довжина ламінарного дифузійного факелу: 1 - ЛДФ; 2 - експеримент; 3 - ЛДФ.

Стационарний потік газозавису створювався розробленою оригінальною системою подачі та розпилю порошку (5), яка дозує та дезагрегує частки пального в широкому діапазоні розмірів ( $1 + 30$  мкм) практично необмежаний час і забезпечує постійну витрату газозавису з масовою концентрацією металу від 0,05 до 0,8 кг/м<sup>3</sup>.

Як пальне використовувався промисловий порошок алюмінію марки АСД-4 (основні моменти розподілу по розмірам часток  $Al: \langle d \rangle = 4,8$  мкм,  $\langle d^2 \rangle^{1/2} = 5,24$  мкм,  $\langle d^3 \rangle^{1/3} = 5,74$  мкм) і фракція порошку алюмінію  $\langle d \rangle = 14,6$  мкм. Об'ємні витрати газозавису і окислюючого газу регулювались кранами (6) и контроль зались стандартними ротаметрами (7). Масова концентрація пального визначалась методом аспірації порошку на фільтр (8). Пропан-кисневий пальник (9) правив для стабілізації факелу в початковий момент.

На рис. 2 наведено принципову схему голографічного інтерферометра, який використовувався для визначення температурного поля ЛДДФ алюмінію. Схема зібрана на базі серійної імпульсної голографічної установки УГ-1М і забезпечувала отримання інтерферограм фазових об'єктів з методом двох експозицій.

Для створення віток опорного і предметного пучків використовувались серійні діелектричні дзеркала (1-4), лінзи (5, 6), фотооб'єктиви (7, 8) і діафрагми (9-11), які забезпечували робоче поле інтерферометра  $\sim 50$  мм. Для реєстрації інтерферограм використовувалася чутлива голографічна фотоплівка ФГ-690.

Спектральні дослідження ЛДДФ алюмінію проводились по неперервному, атомарним та молекулярним спектрам. Блок-схема спектрального комплексу приведена на рис. 3. Атомарні і молекулярні спектри випромінювання реєструвались приладом (7), що був виготовлений по схемі Черні-Турлера (тип МСД), який дозволяв реєструвати випромінювання в діапазоні довжин хвиль  $\lambda = (0,25-0,8)$  мкм з спектральним розділенням  $R = 5000-10000$ . Необхідна область спектру уставлялася поворотом дифракційної решітки (1200 шт/мм). Ширину скануємої області можливо було змінювати в діапазоні довжин хвиль  $\lambda = (5-200) \text{Å}^\circ$ , а частоту слідування - до 100 спектрів в секунду.

Прилад (6) на базі інтерференційних клинів використовувався для діагностики факелу за неперервним спектром в діапазоні довжин хвиль  $\lambda = (0,4-1,1)$  мкм. Оберткові інтерференційні клини дозволяли реєструвати до 100 спектрів у секунду з спектральним розділенням  $R = 20-60$ . Запис радіальних розподілів світлових потоків факелу здійснювався за допомогою дзеркал (4,5), що коливались за пилкоподібним законом. Реєстрування спектрів з екранів осцилографів (8,9)

здійснювалося з допомогою кінокамери та фотоапарату.

Для вловлення к-фази продуктів горіння використовувалася комбінація інерційного (циклон) и фільтраційного (суцільний фільтр) пиловловлювачів. Таке сполучення забезпечує практично 100% вловлення пилу і можливість фракціонування відбирасмої проби.

У третьому розділі приведені система рівнянь теоретичної моделі реактора радіального перемішування, метод її рішення, результати теоретичного аналізу та числових розрахунків структури ЛДД.

Для запису системи рівнянь використані наступні основні спрощуючі припущення:

1. Вважалось, що швидкості супутних потоків рівні і постійні по перетину і вздовж факелу; густини газів, коефіцієнти бінарної дифузії газів і температуропровідності рівні, постійні і не залежать від температури і складу газової фази, і, крім цього, частки повністю захоплюються потоком.

2. Частки пального реагують гетерогенно, макроскопічна швидкість реакції на їх поверхні залежить як від кінетичного, так і дифузійного факторів; число молів газу під час реакції не змінюється; температура продуктів горіння дорівнює температурі газу.

3. Полум'я теплоізольоване; випромінюванням від часток можна знехтувати. Система "газ-частки" описується в двохтемпературному наближенні.

З урахуванням цих припущень система рівнянь, що описує стаціонарне горіння двофазного струменя, має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(yu\rho_{ox}) &= \frac{\partial}{\partial y}(yD_g \frac{\partial \rho_{ox}}{\partial y}) - SW\rho_{ox} \\ \frac{\partial}{\partial x}(yuC_g) &= -fSW\rho_{ox} \\ \frac{\partial}{\partial x}[yu(\rho_g + C_k)c_p T_g] &= \frac{\partial}{\partial y}(y\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y}) + \alpha S(T_p - T_g)y + c_p T_p fSW\rho_{ox} \\ \frac{\partial}{\partial x}(yuC_g c_p T_p) &= fqSW\rho_{ox} - \alpha S(T_p - T_g)y - c_p T_p fSW\rho_{ox} \end{aligned} \quad (1)$$

з крайовими умовам:

$$\begin{aligned} x = 0: \quad 0 \leq y < R_1 \quad \rho_{ox} &= 0; \quad C_g = C_g^0; \\ R_1 \leq y \leq R_2 \quad \rho_{ox} &= \rho_{ox}^0; \quad C_g = 0; \\ T_g &= \varphi(y); \quad T_p = T_g; \\ \varphi(y) &= T_g^0 + T_g^* \exp\left[-\left(\frac{y-R_1}{2\sigma R_2}\right)^2\right]; \quad \sigma = 0.005 + 0.01 \end{aligned}$$

$$x > 0; \quad y = 0; \quad u = R_2;$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{O}_2}}{\partial y} = \frac{\partial C_f}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial T_g}{\partial y} = \frac{\partial T_p}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

Тут:  $y, x$  - радіальна і аксіальна координати;  $u$  - швидкість газозависло потоку;  $C_f, \rho_{\text{O}_2}, C_k$  - масові концентрації пального, окислювача і  $k$ -фази продуктів горіння;  $T_p$  і  $T_g$  - температура дисперсної фази і газу;  $S = 4\pi r_p^2 \cdot N$  - поверхня одиниці об'єму газозавису;  $N$  - число часток в одиниці об'єму газозавису;  $r_p$  - радіус часток пального;  $W = k \cdot \beta / (1 + \beta)$  - константа макроскопічної швидкості хімічної реакції;  $k = k_0 \cdot \exp(-E/RT_p)$  - константа швидкості хімічної реакції на поверхні часток;  $\beta = D_g / r_p$  і  $\alpha = \lambda_g / r_p$  - коефіцієнти масообміну і теплообміну для часток;  $D_g$  - коефіцієнт бінарної дифузії окислювача в інертному газі;  $\rho_g$  - густина газу,  $R_1, R_2$  - радіуси внутрішньої і зовнішньої трубок пальника;  $c_p$  - питома теплоємність газу і  $k$ -фази;  $q$  - тепловий ефект хімічної реакції;  $f$  - масовий стехіометричний коефіцієнт. Функція  $\varphi(y)$  задає гауссів профіль температури газу на зрізі пальника, необхідний для ініціювання процесу горіння.

Система рівнянь (1) перед рішенням приводилась до безрозмірного вигляду. Як безрозмірні залежні змінні було вибрано наступні величини:

$$C_{\text{O}_2} = \frac{\rho_{\text{O}_2}}{\rho_{\text{O}_2}^0}, \quad V_f = \frac{C_f}{C_f^0}, \quad \theta_g = \frac{T_g - T_g^0}{T_{\text{ад}} - T_g^0}, \quad \theta_p = \frac{T_p - T_p^0}{T_{\text{ад}} - T_g^0} \quad (3)$$

де  $T_{\text{ад}} = T_g^0 + q C_f^0 / [C_f^0 + \rho_g (1 + C_f^0 / f \rho_{\text{O}_2}^0)]$  - адиабатична температура горіння стехіометричної суміші окислюючого газу і газозавису часток пального в інертному газі;  $\xi = y/R_1$  і  $\eta = x D_g / R_1^2 u$  - безрозмірні радіальні і аксіальні координати, відповідно.

Система рівнянь (1) з крайовими умовами (2) розв'язувалася чисельним методом.

Розрахунки показали, що вигорання газозавису відбувається у зовнішньому дифузійному режимі. При цьому інтегральні характеристики факелу (довжина, форма), його теплова і концентраційна структура (за виключенням тонкої зони горіння) не залежать від режиму горіння (дифузійного або кінетичного) та розміру індивідуальних часток пального, дійсної кінетики хімічної реакції. Довжина факелу при відсутності газодинамічних ефектів є функцією тільки концентрацій реагентів ( $\rho_{\text{O}_2}, C_f$ ) та розмірів пальника ( $R_2/R_1$ ). Залежність безрозмірної довжини ЛДВ ( $\eta_f = h_f D_g / R_1 u$ ) від вказаних параметрів наведена на рис. 4, де  $\alpha = f \rho_{\text{O}_2} / C_f [(R_2/R_1)^2 - 1]$  - коефіцієнт надлишку

окислювача для реактора радіального перемішування. Із рисунка видно, що в області значень  $\lambda > 3+4$  довжина факелу (крива 1)  $\eta_f \sim 1/\alpha$ , а для  $\alpha < 3$  спостерігається відхилення від цієї залежності, що пояснюється вигоранням окислювача в реакторі. Слушність модельних розрахунків підтверджується наявним експериментальними даними (крива 2). Оскільки для газових дифузійних пламен (ЛДФ) сумарний потік реагентів до зони горіння більший, чим в випадку ЛДФ з аналогічними параметрами, то довжина ЛДФ може значно перевищувати довжину ЛДФ (крива 3).

Основні відмінності між ЛДФ і ЛДФ зумовлені відсутністю дифузії диспергованого пального назустріч газоподібному окислювачу. Для ЛДФ масова концентрація пального усередині факелу не змінюється до повного вигорання газозавису, що, як це наявно з рис. 5, призводить до значного росту температури зони горіння ( $\theta_w$ ) вздовж факелу (крива 1), у той час як для ЛДФ  $\theta_w$  практично не змінюється вздовж факелу (крива 2). З тієї ж причини об'ємна швидкість тепловідділення у зоні горіння ЛДФ, яка визначається тільки дифузійним потоком окислювача до зони горіння, мало змінюється вздовж факелу, у той час як для газових пламен її значення зменшується практично до нуля у вершині факелу.

Структура зони горіння ЛДФ - її ширина, розподіл температурних і концентраційних полів газової та конденсованої фаз у ній - істотно залежить від режиму горіння окремих часток і характеристики дисперсного пального. Для часток, які горять дифузійно, їх температура у зоні горіння помітно перевищує температуру газової фази, а концентрація окислювача поблизу поверхні часток наближується до нуля, тобто зона горіння такого факелу складається з окремих мікропламен, які мають власні концентраційні та температурні поля. Для кінетично реагуючих часток їх розігрів відносно газу практично відсутній, а концентрація окислювача біля поверхні часток і у навколишньому середовищі близькі і зона горіння в цьому випадку більш однорідна.

Як для дифузійного, так і для кінетичного режимів горіння часток, протяжність зони горіння визначається відношенням швидкості дифузійного підведення окислювача і макроскопічної швидкості хімічної реакції. Масштабом ширини зони реагування факелу, як впливає з рис. 6, може служити величина глибини проникнення окислювача  $Y_0$ , що задається у вигляді:

$$Y_0^d = r_{p0} \sqrt{\frac{\rho_p}{3C_f^0}} \quad ; \quad Y_0^k = \sqrt{\frac{\rho_p D_g r_{p0}}{3C_f^0 k_p}} \cdot \exp\left(\frac{E}{2RT_p}\right)$$

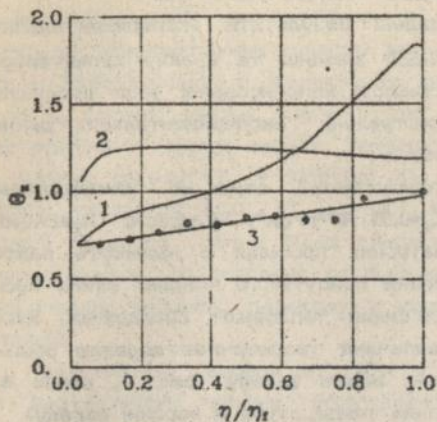


Рис. 5. Максимальна температура в зоні горіння ЛДДФ (криві 1,3) і ЛДФ (крива 2).

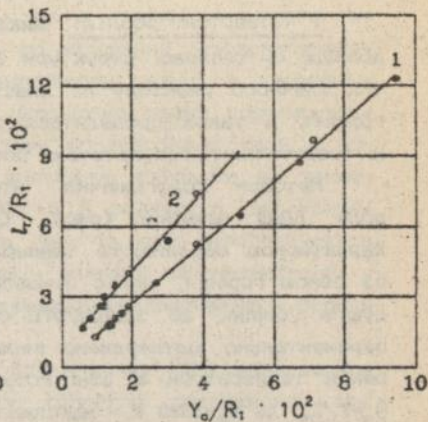


Рис. 6. Залежність відносної ширини зони горіння від глибини проникнення окислювачу.

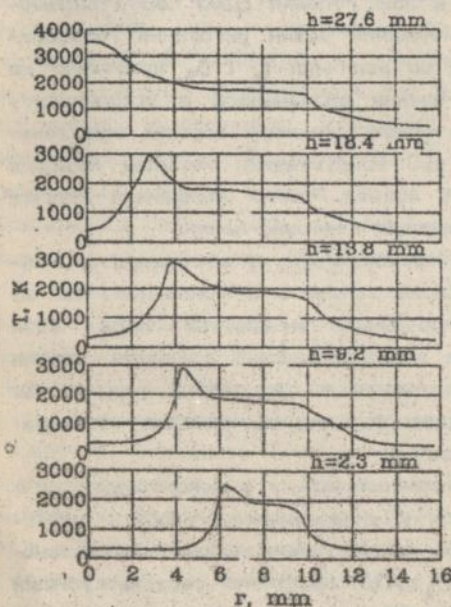


Рис. 7. Радіальні розподіли температури газової фази для ЛДДФ алюмінію.

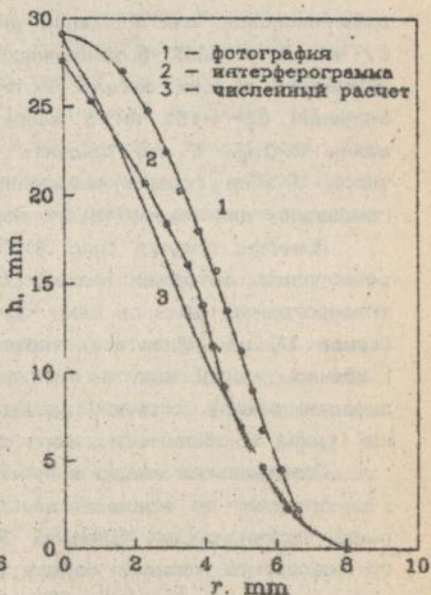


Рис. 8. Форма поверхні голун'я ЛДДФ.

для дифузійного і кінетичного режимів горіння, відпо: дно.

У четвертому розділі викладені результати експериментальних досліджень теплової структури ЛДДФ алюмінію та впливу характеристик хімічного реактору на властивості конденсованої фази продуктів горіння, а також провадиться зіставлення експериментальних даних із теоретичними результатами роботи.

Методом голографічної інтерферометрії отримано температурне поле ЛДДФ алюмінію (рис. 7,  $C_p = 0.35 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ ,  $R_1 = 0.8 \text{ см}$ ,  $R_2 = 1.4 \text{ см}$ ). Характерною особливістю температурних профілей є наявність плато за зоною горіння, яке є зумовленим присутністю конденсованих продуктів горіння, що збільшують об'ємний тепловміст середовища. Експериментально підтверджено передбачене теоретичною моделлю збільшення температури в зоні горіння вздовж факелу (рис. 4, крива 3,  $\theta_x = T/T_m$ , де  $T_m = 3520 \text{ K}$  - максимальна температура у вершині факелу).

За радіальними профілями температур визначені протяжності зон горіння ( $l_r$ ) и прогріву ( $\delta_p$ ) ЛДДФ алюмінію. Отримане значення  $l_r = (110.3) \text{ мм}$  добре згоджується з розрахунковим (з врахуванням теплового розширення газозавису в зоні горіння  $l_r \approx 0.7 \text{ мм}$ ) і підтверджує висновок про зовнішній дифузійний режим вигорання газозавису часток в ЛДДФ. Було встановлено, що величини  $l_r$  і  $\delta_p$  практично не змінюються вздовж факелу. Зіставлення визначеного з експерименту значення  $\delta_p = (1-1.5) \text{ мм}$  з характерною довжиною пробігу випромінювання ( $1/\sigma n_p \approx 5 \text{ см}$ ) свідчить про кондуктивний механізм передачі тепла з зони горіння усередину факелу, тобто радіаційний прогрів газозавису для факелу такого масштабу є зовнішньо малим.

Поверхні полум'я (рис. 8), які визначено з синхронної з інтерферограмою фотографії факелу (зона конденсації, крива 1) і за інтерферограмою, як поверхні максимальної температури газової фази (крива 2), не збігаються, тобто зони конденсації продуктів горіння і хімічної реакції можуть бути рознесені в просторі. В той же час поверхні факелу, отримані за інтерферограмою та числових розрахунків (крива 3) збігаються досить добре.

Спектральний аналіз випромінювання факелу у неперервному спектрі показав, що основний внесок у випромінювання вносять субмікронні частки оксиду алюмінію. За результатами вимірів спектрального коефіцієнта чорноти факелу  $\epsilon_\lambda = f(\lambda)$  визначено середньокубичний розмір часток оксиду  $\langle r^3 \rangle^{1/3} = 0.05 \text{ мкм}$ . Цей результат добре згоджується з даними дисперсного аналізу  $\langle r^3 \rangle^{1/3} = 0.08 \text{ мкм}$ .

За радіальними розподілами світності неперервного спектру ( $\lambda = 8000 \text{ \AA}$ ) вивчено вплив на ширину зони горіння ЛДДФ алюмінію  $l_r$  ос-

новних характеристик газозавису - масової концентрації і розміру часток пального. Отримані результати задовільно апроксимуються залежністю  $L_p \sim r_{p0} \sqrt{C_g}$ , що перебуває в згоді з теорією, і служить ще одним експериментальним доказом того, що вигорання газозавису часток в ЛДДФ протікає в зовнішньому дифузійному режимі, а пропорційність  $L_p$  розміру часток свідчить про дифузійний режим горіння часток алюмінію у фронті факелу. Температура конденсованої фази в зоні горіння факелу ( $T_k = 3150 \pm 100$  К) виявилась близькою до температури утворення  $Al_2O_3$  ( $T_{Al_2O_3} = 3253$  К), а її залежність від концентрації пального значно більш слабкою, чим та яка передбачується термодинамікою, що пояснено стабілізуючим впливом на температуру у зоні горіння фазового переходу з утворенням конденсованого оксиду алюмінію.

Температура газової фази ( $T_g$ ) в зоні горіння ЛДДФ визначалася за результатами вимірів інтегральної світності резонансної лінії алюмінію ( $\lambda = 3944.01 \text{ \AA}$ ) і відносної інтенсивності кантів полос  $AlO$ . Виміри проводились для факелу газозавису часток алюмінію розміром  $r_{p0} = 2.4$  мкм і масовій концентрації пального  $C_g = 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ . Отримані значення інтегральної світності резонансної лінії  $Al$  можуть бути пояснені лише у припущенні, що пари алюмінію в зоні горіння локалізовані між поверхнею і фронтом горіння індивідуальної частки. Це дозволило зробити висновок, що частки пального в зоні реакції горять індивідуально, утворюючи мікропламена радіусом, що дорівнює 2-3 радіусам часток пального. У цих умовах температура газової фази поблизу горячої краплі металу дорівнює  $T_g^{Al} = (3290 \pm 250)$  К. Температура газової фази, яка визначена по кантам полос молекулярного спектру  $AlO$  склала  $T_g^{AlO} = (3240 \pm 100)$  К.

Вперше проведені систематичні дослідження впливу основних характеристик газозавису - масової концентрації і розміру часток пального, концентрації окислювача в несучому і обдувачному газі, виду несучого газу - на дисперсний і фазовий вміст оксиду алюмінію. Є встановленим, що у всіх випадках більшість 90% продуктів горіння  $Al$  складають субмікронні сферичної форми частки  $Al_2O_3$ . Їх функція розподілу по розмірам підлягає логарифмічно нормальному закону, а фазовий склад на 90-95% складається з  $\gamma$ -модифікації  $Al_2O_3$ . Вплив перерахованих макропараметрів ЛДДФ на дисперсний вміст  $Al_2O_3$  виявився достатньо слабким і зводиться головним чином до зміни ширини (дисперсії) функції розподілу при практично незмінному положенні її максимуму ( $d_m = 0.05 \pm 0.06$  мкм). Залежність середнього розміру часток оксиду від параметрів газозавису якісно

передається залежністю  $\langle d \rangle \sim C_{\text{O}_2}^0 / \Gamma_{\text{PO}} C_{\text{O}_2}$ , де  $C_{\text{O}_2}$  - концентрація первісного кисню в несучому газі.

Показано, що ефективним способом впливу на дисперсний склад продуктів горіння є введення в вихідний газозавис спеціально підібраних домішок, які впливають на концентрацію зародків конденсованої фази. Це підтверджують результати дисперсного аналізу продуктів горіння ЛДДФ, що показані на рис.9, для чистого алюмінію (криві 1, 2) і механічної суміші порошоків алюмінію і вуглецю (криві 3, 4).

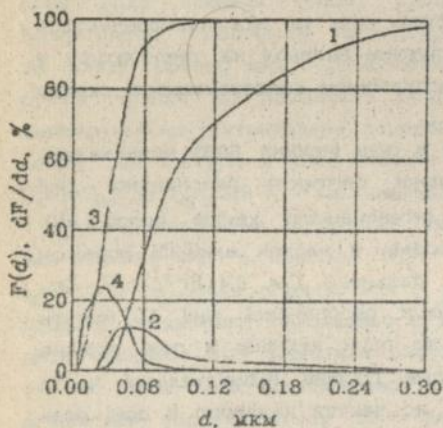


Рис. 9. Розподіл часток оксиду по розмірам для чистого Al і при наявності домішок.

інтегральні розподіли:

1 - 100%Al; 3 - 95%Al+5%C.

диференційні розподіли:

2 - 100%Al; 4 - 95%Al+5%C.

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Основні підсумки досліджень і результати розрахунків, що виконані в дисертаційній роботі, можна узагальнити в наступних висновках:

1. Розроблена теоретична модель ламінарного дифузійного двофазного факелу, яка враховує дискретність зони горіння.

а) Структура ЛДДФ визначається процесом дифузійного змішування реагентів - газозавис вигорас в зовнішньому дифузійному режимі. Відсутність дифузії диспергованого пального назустріч газоподібному окислювачу веде до значного росту температури в зоні горіння вздовж факелу, що перебуває в добрій згоді з експериментальними даними. Режим горіння індивідуальних часток пального в ЛДДФ практично не впливає на залежність температури зони горіння від аксіальної координати, довжину і форму факелу. Довжина факелу визначається тільки коефіцієнтом надлишку окислювача  $\alpha$ , який є функцією

концентрацій реагентів і відношення характерних розмірів пальника ( $R_2/R_1$ ).

б) Структура зони горіння ЛДД у значній мірі залежить від режиму горіння індивідуальних часток пального. Ширина зони горіння є функцією параметрів, які визначають макроскопічну швидкість реагування, не змінюється вздовж факелу і не залежить від концентрації окислювача. Масштабом ширини зони реагування факелу є величина глибини проникнення окислювача, що задається тільки характеристиками дисперсного пального при дифузійному контролі швидкості хімічної реакції на поверхні часток, а також кінетичними константами - при кінетичному.

2. Розроблено і створено експериментальний комплекс, що забезпечує отримання і безконтактну діагностику стаціонарного ламінарного факелу газозавису часток різних металів.

а) Експериментально, зтодом голографічної інтерферометрії, визначено температурне поле ізольованого ЛДД алюмінію. Для радіальних профілей температури газу є характерним плато в області течії за зоною горіння факелу. зумовлене наявністю в потоці конденсованих продуктів горіння.

б) Передача тепла із зони горіння в зону прогріву дисперсного пального, ширина якої в умовах досліду складає  $\delta_p = (1.0-1.5)$  мм здійснюється кондукцією, радіаційний прогрів газозавису усередині факелу радіусом  $R_f \leq 1$  см нехтивніс малий.

в) Температура зони горіння, ототожнена з максимальними значеннями в температурному полі, росте вздовж факелу від  $T_f = 2600$  К поблизу зрізу пальника до  $T_f = 3520$  К в вершині факелу, що підтверджує передбачення теоретичної моделі. Близькі значення дають і спектральні методи вимірювання температури:  $T_k = (2900-3200)$  К,  $T_g^{Al} = 3290$  К,  $T_g^{AlO} = 3240$  К. Координати зони горіння, які визначені за інтерферограмою та ін. онізованою з нею прямою фотограією факелу не збігаються - це дозволяє припустити, що зони хімічної реакції і конденсації продуктів горіння в ЛДД алюмінію роз'єсені в просторі.

3. Спектральний аналіз випромінювання конденсаційного окису, резонансної лінії Al ( $\lambda = 3944 \text{ \AA}$ ) і каналів потіс молекулярного спектру AlO ( $\lambda = 4600 \text{ \AA} - 5400 \text{ \AA}$ ) показав, що в зоні горіння факелу краплі алюмінію горять індивідуально, та утворюють мікропламена ( $r_p/r_p = 2+3$ ).

4. Ширина зони горіння, яка визначена за даними голографічної інтерферометрії і із аналізу радіальних розподілів локальної інтенсивності к перерв'яго спектру випромінювання -  $r_k = (1.0 \pm 0.3)$  мм для  $C_f = 0.4 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup> і  $r_p = 2.4$  мкм - багато менше характерних розмірів

пальника, що свідчить про зовнішній дифузійний режим вигорання газозавису часток алюмінію в ЛДДФ.

5. Дисперсний, хімічний і рентгенофазний аналізи ультрадисперсних порошоків оксиду алюмінію показали, що характеристики газозавису і окислюючого газу - дисперсність і концентрація часток пального, вміст кисню в супутному потоці (при  $\alpha > 5$ ) - практично не впливають на дисперсний та газовий склад продуктів горіння, що досить важливо з точки зору технологічності методу ГДС-синтезу оксидів.

Запропоновано метод регулювання розмірів часток продуктів горіння шляхом введення в вихідний порошок спеціально підібраних домішок, які впливають на величину концентрації зародків  $\alpha$ -фази в зоні горіння ЛДДФ. Пиловий палик, що входить до складу експериментального комплексу, може бути використаний як установка для отримання цільового продукту - ультрадисперсного порошку  $Al_2O_3$ .

Основні результати дисертації викладені в наступних роботах:

1. Стационарное горение газозвесей твердых горючих. Ламинарный диффузионный факел / Ageev N. D., Vovchuk Y. I., Zolotko A. N., Goroshin S. V., Poletayev N. I. // Физика горения и взрыва. - 1990. - т.26, №6. - С. 54-62.

2. Vovchuk Y. I., Poletayev N. I. A Simplified Model for the Boron Laminar Diffusion Flame // Abstracts. International Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion: Combustion of Boron-based Solid Propellants and Solid Fuels. - Lampoldshausen, Germany, 1991.

3. The Premixed Aluminium Dust Flame Structure / Ageev N. D., Goroshin S. V., Shoshin Yr. L., Poletayev N. I. // Flame structure. - Novosibirsk: Nauka, 1991. - v.1. - P. 213-218.

4. The Structure of Diffusion Two-Phase Flame / Ageev N. D., Vovchuk Y. I., Zolotko A. N., Poletayev N. I., Shoshin Yr. L. // Flame structure. - Novosibirsk: Nauka, 1991. - v.1. - P.184-188

5. Спектральные исследования структуры пламени ламинарного диффузионного двухфазного факела / Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Полежаев Н. И., Руденя Ю. А., Флорко А. В. // В сб.: Горение. Материалы X Международного симпозиума по горению и взрыву. - Черногловка, 1992.

Подп. к печати 4.10.93г. Фс мат 60x84 I/16.  
Об'ем 0,7уч, ил. л. I, Сп. л. Заказ № 1726. Гираж 8Сэкз.  
Гортипография Одесского управления по печати, цех №3.  
Ленина 49



U611na

AB 28.376  
**AB 28.376**