

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ім. І. І. Мечникова

На правах рукопису

КАЛІНЧАК ВАЛЕРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ТЕПЛОМАСООБМІН,
КРИТИЧНІ ЯВИЩА ПРИ ФАЗОВИХ ТА ХІМІЧНИХ
ПЕРЕТВОРЕННЯХ В ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМАХ

Спеціальність 01.04.14 — теплофізика та молекулярна фізика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук

ОДЕСА — 1995

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00755645 (W)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. І.І.МЕЧНИКОВА

На правах рукопису

КАЛІНЧАК ВАЛЕРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ТЕПЛОМАСООБМІН,
КРИТИЧНІ ЯВИЩА ПРИ ФАЗОВИХ ТА ХІМІЧНИХ
ПЕРЕТВОРЕННЯХ В ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМАХ

Спеціальність 01.04.14 - теплофізика та молекулярна фізика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук

ОДЕСА - 1995

AB 33.005

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеському державному університеті

ім. І.І.Мечникова

- Офіційні опоненти :
- доктор Фізико-математичних наук,
професор Золотко Андрій Миконович,
 - доктор технічних наук,
професор Воїнов Олександр Петрович,
 - доктор Фізико-математичних наук,
професор Шут Микола Іванович.

Провідна організація - Інститут проблем енергозбереження
НАН України, м.Київ.

Захист відбудеться " 26 " січня 1996 р. о " 14⁰⁰ " год.
на засіданні спеціалізованої Ради Д.06.01.06 Одеського
державного університету ім. І.І.Мечникова (270100, м.Одеса, вул.
Пастера, 27, Велика фізична аудиторія).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Одеського
державного університету ім.І.І.Мечникова.

Автореферат розіслано " 25 " грудня 1995 г.

Вчений секретар спеціалізованої Ради,
кандидат Фізико-математичних наук,
доцент

Селюк

С.В.МАРГАШУК

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Формування та стійкість високотемпературних станів компонент дисперсної системи (частинок, крапель та газової фази) визначається ефектами взаємодії різних механізмів тепломасообміну та кінетики хімічних реакцій, які насамперед пов'язані з розмірами та відносними швидкостями руху частинок.

Дослідження цих явищ являється джерелом найважливішої інформації щодо ролі фізичних та хімічних факторів, без знання яких неможливо намірено здійснювати керування високо- та низькотемпературними режимами тепломасообміну в хімічно реагуючих дисперсних системах.

В зв'язку з цим актуальною задачею, яка вперше вирішується в наших роботах, є побудова аналітичних моделей, що дозволяють в явному вигляді визначити умови та часові характеристики переходу з низькотемпературного в високотемпературний стан та навпаки, в залежності від розміру і швидкості руху частинки (краплі) в процесах: запалення газової суміші розжареною рухомою частинкою; спалахування частинки при протіканні на її поверхні фазових перетворень (плавлення, випаровування); зрив та відновлення полум'я на лобовій точці краплі; спалахування, горіння та потухання частинки при протіканні на її поверхні паралельних реакцій. Визначення часу запалювання газової суміші рухомою розжареною частинкою (фрикційною іскрою) має прикладне значення для вироблення надійних критеріїв забезпечення пожежної безпеки при перевозці та зберіганні рідин, що легко спалахують.

Актуальними являються теоретичні та експериментальні дослідження механізму виникнення та існування високотемпературних станів, які визначають процеси стійкого горіння краплі в газовому потоці. Розв'язок цієї задачі розкриває нові можливості керування процесами випаровування та горіння диспергованих рідких палив шляхом зміни їх складу та режимних умов.

Важливим питанням, що вперше розв'язується в дисертаційній роботі, є визначення умов та механізму гістерезисної поведінки температури частинок (крапель) і зв'язаних з нею теплових та масових потоків, швидкостей фазових та хімічних перетворень при зміні параметрів системи. На сьогодні також недостатньо вивчено механізм спонтанного переходу з високотемпературного режиму теп-

ломасообміну на низькотемпературний режим, що пов'язано із зміною діаметру та швидкості руху частинки (краплі) в процесі її горіння при незмінних зовнішніх умовах.

Мало вивченими являються питання, які розглядаються в роботі, про вплив випромінювання, схеми хімічних реакцій, фазових перетворень, температурної залежності властивостей газу на характеристики високотемпературних станів, критичні параметри спалахування та затухання частинки. В роботі також роз'ясується раніше невивчені задачі про визначення критичних та стійких режимів тепломасообміну частинки з газуватим окислювачем з врахуванням стефанівської течії, внутрішньої дифузії, нагрівання частинки лазерним випромінюванням.

Мета роботи. Розвиток нового наукового напрямку в теплофізиці хімічно реагуючих дисперсних систем, який полягає в з'ясуванні механізму виникнення та існування високотемпературних станів, критичних умов та гістерезису тепломасообміну частинок і крапель при фазових та хімічних перетвореннях.

При цьому ставилися задачі:

- розробка нових методологічних підходів дослідження ролі та взаємовпливу різних механізмів тепломасообміну, кінетики фазових та хімічних перетворень в гістерезисних явищах, процесах здійснення стійких високо- та низькотемпературних станів компонент хімічно реагуючої дисперсної системи (частинки (краплі) - газ);
- вивчення механізму високотемпературного режиму протікання гомогенної хімічної реакції при попаданні в середовище розжареної частинки; аналіз нестационарного запалювання газової суміші розжареною частинкою, яка рухається; аналітичний опис залежності часу затримки запалювання від розміру та швидкості руху частинки;
- аналітичний опис стійких та критичних режимів тепломасообміну, які визначають горіння і затухання крапель індивідуальних рідин та їх бінарних сумішей в потоці повітря на основі теоретичних та експериментальних досліджень; визначення критичних умов естафетного спалахування аерозависі крапель;
- дослідження механізму взаємодії кінетики гетерогенної хімічної реакції, тепломасообміну, теплообміну випромінюванням в процесі спалахування частинки, яка рухається, при протіканні на її поверхні фазових переходів; отримання аналітичних виразів для

періоду індукції та критичних умов спалахування частинки, яка рухається з урахуванням її плавління, випаровування та теплообміну випромінюванням із стінками реакційної установки;

- розкриття механізму гістерезису тепломасообміну та кінетики паралельних гетерогенних хімічних реакцій на поверхні частинки та визначення умов його існування; вивчення механізму спонтанного затухання частинки;
- знаходження часу виходу частинки на високотемпературний режим тепломасообміну, часу і температури горіння; аналітичний опис характеристик гетерогенного горіння частинки в залежності від режимних умов при протіканні на її поверхні паралельних хімічних реакцій та врахуванні теплообміну випромінюванням між частинкою і стінками реакційної установки;
- з'ясування ролі випромінювання, кінетики гетерогенних хімічних реакцій (одна, дві реакції), внутрішньої дифузії, стефанівської течії на характеристики спалахування, горіння, спонтанного та вимушеного затухання частинки; визначення умов виродження критичних режимів гетерогенного спалахування і затухання частинки;
- встановлення закономірностей горіння та затухання монодисперсної і двофракційної газозависі частинок при протіканні на їх поверхні паралельних реакцій та врахуванні теплообміну випромінюванням із стінками реакційної установки.

Наукова новизна результатів, отриманих в роботі, полягає в тому, що в ній вперше:

- вивчено вплив різних механізмів тепломасообміну, кінетики фазових та хімічних перетворень компонент дисперсної системи (частинки, краплі - газ) на процеси формування високотемпературних станів та їх стійкість;
- отримано аналітичні вирази для залежності часу запалювання газозових сумішей від діаметру та швидкості руху розжареної частинки;
- виявлено механізм та встановлено умови гістерезисної поведінки температури, швидкостей фазових та хімічних перетворень крапель (частинок) в залежності від їх діаметру та швидкості руху; визначено критичні умови естафетного спалахування ланцюжка крапель;
- запропонована методика дослідження та визначення характеристик

стійких та критичних високотемпературних режимів тепломасообмінної частинки, яка рухається, при фазових та хімічних перетвореннях на її поверхні;

- встановлено роль плавлення та випаровування, масопереносу, теплообміну випромінюванням в процесі гетерогенного спалахування частинки; отримано аналітичні вирази для критичних умов спалахування та періоду індукції;
- вивчено механізм та проведено аналітичний опис впливу теплообміну випромінюванням, масопереносу, стефанівської течії, внутрішнього реагування на процеси спалахування, горіння, спонтанного та вимушеного потухання частинки при протіканні на її поверхні паралельних хімічних реакцій; встановлено закономірності впливу випромінювання та схеми гетерогенних реакцій на гістерезисну залежність температури частинки від її діаметру та швидкості руху, температури газу та концентрації окислювача в ньому.

Практичне значення роботи. Розвинуті в дисертації елементи теорії та методики дослідження є важливим внеском в теплофізику хімічно реагуючих дисперсних систем та практичну теорію горіння. Отримані в дисертації результати дозволяють виявити нові можливі шляхи керування високо- та низькотемпературними режимами тепломасообміну, фазовими і хімічними перетвореннями в дисперсних системах за допомогою раціонального вибору інтервалу розмірів частинок (крапель), їх початкових температур та зовнішніх умов.

Аналітичні вирази для часу запалювання хімічно реагуючої газової суміші частинкою можуть бути використовані для визначення пожежної безпеки фрикційних іскр при перевозці рідин, які легко спалахують.

Відкритий нами механізм гістерезису швидкостей фазових та хімічних перетворень частинок та крапель в залежності від їх розміру і швидкості руху, розроблений метод дослідження та проведені оцінки характеристик горіння являють собою практичну цінність для раціонального використання диспергованих рідких та твердих палив в енергетичних установках.

Достовірність та обґрунтування отриманих в дисертації результатів забезпечується використанням сучасних методів дослідження високо- та низькотемпературних станів дисперсних систем та обґрунтуванням відповідних наближень та припущень. Результати

з'ясування власних розрахунків з тими, що є в літературі та власними ж експериментальними даними, свідчать про правильність модельних підходів, які запропоновано в роботі.

Особистий вклад автора дисертації. В дисертації наведено результати самостійних багаторічних досліджень автора. Безпосередньо автору належать постановка та обґрунтування задач досліджень, розв'язання питань експериментальних та теоретичних досліджень, аналіз та пояснення отриманих результатів.

Співавторами статей виконувався комплекс завдань, пов'язаних з розрахунками на ЕОМ, налагодженням та удосконаленням експериментальних установок для дослідження процесів горіння крапель і частинок.

На захист виносяться наступні основні положення.

1. Теорія нестационарного теплообміну рухомої розжареної частинки з реагуючим газом.
2. Механізм гістерезису кінетики фазових та хімічних перетворень, теплообміну рухомої частинки (краплі).
3. Модель спалахування рухомої частинки, на поверхні якої відбуваються фазові перетворення (плавлення, випаровування).
4. Механізм спонтанного потухання частинки (краплі).
5. Комплексний метод визначення характеристик стійких та критичних режимів теплообміну частинки і кінетики гетерогенних хімічних реакцій.
6. Стійкі та критичні режими протікання гетерогенних хімічних реакцій з урахуванням теплообміну випромінюванням, стефанівської течії та внутрішнього реагування частинки.
7. Аналітичні моделі, які дозволяють визначити критичні умови часові характеристики спалахування та горіння частинки з урахуванням протікання на її поверхні двох паралельних хімічних реакцій та тепловтрат випромінюванням на стінки реакційної установки.

Апробація роботи. Результати дисертації доповідалися та обговорювалися на XIII Всесоюзній конференції з питань випаровування, горіння та газової динаміки (Одеса, 1979); XIV Всесоюзній конференції з актуальних питань веродисперсних систем (Одеса, 1986); III Всесоюзній конференції по пожежній безпеці виробничих процесів в металургії (Москва, 1987); XV Всесоюзній конференції з фізики веродисперсних систем (Одеса, 1989); I Міжнародному форумі з

тепломасообміну (Мінськ, 1988); Міжнародній школі- семінарі з теплофізики та реофізики нерівноважних систем (Мінськ, 1991); II Міжнародному форумі з тепломасообміну (Мінськ, 1992); XIII Міжнародній конференції з фізики горіння та вибуху (Чорноголовка, 1992); XVI конференції країн СНД з питань випаровування, горіння та газової динаміки дисперсних систем (Одеса 1993); на семінарі, який проводився Інститутом проблем енергозбереження (Київ, 1993) "Проблеми перетворення енергії і раціонального використання органічного палива в енергетиці"; 12 Міжнародному Симпозиумі з питань горіння (Польща, Краків, 1993); 13 Міжнародному Конгресі по застосуванню лазерів та електронної оптики (США, Орlando, 1994); науково - практичній конференції "Проблеми пожежної безпеки" (Київ, 1995); 21 Міжнародному піротехничному семінарі (Москва, 1995); Європейській аерозольній конференції (Фінляндія, Хельсинки, 1996).

Публікації. По матеріалам дисертації опубліковано 47 робіт в міжнародних та регіональних виданнях, основні з яких наведено в кінці автореферату.

Структура роботи. Робота складається із вступу, п'яти розділів та висновків, загальний об'єм текстового матеріалу 318 стор., список літератури містить 196 найменувань.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі аналізується теплофізика нестационарного тепломасообміну (ТМО) розжареної частинки з газовим середовищем, в якому протікають гомогенні хімічні реакції. Практична націленість цієї задачі - визначення часу запалювання та критичних умов ТМО розжареної частинки (фрикційна іскра), яка потрапляє в газову суміш пального та окислювача.

Задача розв'язується з використанням моделі приведеної плівки та термічного шару. Радіус приведеної плівки зростає в міру зменшення швидкості руху частинки і є нескінченним при нульовій швидкості. Термічний шар формується біля поверхні розжареної частинки поблизу області хімічної реакції і з часом заповнює всю приведену плівку. Потім відбувається її нагрівання в регулярному режимі по всій товщині.

Біля поверхні розжареної частинки нагрівання газової су-

міші здійснюється миттєво і тепловий потік із цієї зони визначається із розв'язку рівняння стаціонарної теплопровідності для газового середовища, в якому протікає екзотермічна гомогенна хімічна реакція. Для невеликих швидкостей руху частинки з числами Рейнольдса $0 < Re < 1.52[(r_g/r_m)-1]^2$ залежність часу запалювання від радіуса розжареної частинки має вигляд:

$$t_3 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\sqrt{Z}}{|\theta_\infty|} - \frac{1}{\xi_a} \right]^{-2} \quad \text{или} \quad t_3 = \frac{1}{\pi \alpha_2} \left[\frac{1}{r_m} - \frac{1}{r_g} \right]^{-2} \quad (1)$$

де $t_3 = t_3/t_a$ - безрозмірний час запалювання; r_m - радіус частинки; $r_m = |\theta_\infty| x_a / \sqrt{Z}$ - критичний радіус частинки; $t_a = c_2 RT_a^2 \exp(E/RT_a) / (\alpha k_p n_r E)$ - масштаб часу; $\xi_a = r_g / x_a$ - безрозмірний радіус іскри; $x_a = \sqrt{\alpha_2 t_a}$ - масштаб координати; α_2 - коефіцієнт теплопровідності газу; T_a - температура іскри; n_r - концентрація горючого компонента; $\theta_\infty = E(T_\infty - T_a) / (RT_a^2)$ - безрозмірна температура; T_∞ - температура газової суміші; c_2 - питома теплоємність; E - енергія активації; k_p - передекспоненційний множник.

Час запалювання монотонно зменшується з ростом радіуса іскри, асимптотично наближуючись до значення $t_3 = \theta_\infty^2 / 2\pi$, яке було отримано Я.Б.Зельдовичом для часу запалювання газової суміші розжареною стінкою.

При зменшенні радіуса частинки збільшуються тепловтрати від зони хімічної реакції, в результаті чого зростає час запалювання.

З наближеного розв'язку задачі запалювання для $Re > 1.52[(r_g/r_m)-1]^2$ отримано наступну залежність для часу запалювання від умов та фізико-хімічних властивостей газу

$$t_3 = \frac{r_g^2}{3\alpha_2(Nu-2)} \ln \left[2 \sqrt{e} \frac{Nu-2}{2r_g/r_m - Nu} \right] \quad (2)$$

де Nu - критерій Нусельта. Критичний радіус рухомої іскри можна отримати з умови $t_3 = \infty$ у вигляді $r_{z,kr} = r_m Nu/2$.

Таким же шляхом проведено аналіз можливості запалювання сталеними частинками сумішей з повітрям таких легкоспалахуючих рідин: сірнистого вуглецю, бензолу, диетилового ефіру та етанолу. Результати розрахунків вказують на необґрунтованість постановки в один ряд таких легкоспалахуючих рідин, як сірнистий вуглець та диетиловий ефір, оскільки суміш сірнистого вуглецю з повітрям можна підпалити фрикційними іскрами, а суміш

диетилового ефіру - неможливо.

В другому розділі розглядаються результати експериментальних та теоретичних досліджень з кінетики горіння та зриву полум'я з крапель індивідуальних рідин та їх бінарних сумішей в повітряному потоці. Теплофізичні характеристики горіння, форма та розміри полум'я при горінні краплі в потоці газуватого окислювача тісно пов'язані з його швидкістю. Виявлено гістерезисну поведінку розташування полум'я відносно лобової точки краплі в залежності від її швидкості. Це пов'язано з існуванням двох критичних швидкостей потоку: перша критична швидкість потоку визначається максимальним значенням швидкості потоку, при якому полум'я ще знаходиться на лобовій точці краплі; друга характеризує відновлення полум'я на лобовій точці під час руху його із сліду краплі.

Експерименти, проведені нами в області $10 < Re < 300$, показали що, стаціонарним значенням швидкостей потоку в інтервалі від нуля до величини, рівної швидкості зриву $U_{зр}$, відповідають стаціонарні положення полум'я і величини сталих швидкостей горіння. З підвищенням швидкості потоку $U > U_{зр}$ полум'я переміщується в слід краплі, а стала швидкості горіння зменшується. Якщо після цього зменшити швидкість потоку, то полум'я поновлюється на лобовій точці при меншому її значенні, тобто $U = U_a < U_{зр}$. Це приводить до гістерезисного впливу швидкості потоку на сталу швидкості горіння (рис.1), яка пов'язана з температурою краплі та координатою полум'я.

Після різкої зміни швидкості потоку від нуля $U=0$ до $U_{зр}$ полум'я затухає в лобовій точці краплі протягом часу $t_з$, який зменшується з ростом швидкості потоку і збільшується з ростом діаметру краплі. Координата полум'я h , яка вимірюється відносно лобової точки краплі, з часом змінюється немонотонно: досягає максимальної величини, потім зменшується і далі залишається незмінною. Процес відновлення полум'я на лобовій точці краплі протікає майже в три рази довше, ніж затухання.

В роботі показано, що для проведення теоретичного аналізу критичних умов існування полум'я на всій поверхні краплі необхідно враховувати дію природної конвекції. Затухання полум'я в лобовій точці краплі при швидкості потоку $U=U_{зр}$, яка обумовлена спільною дією вимушеної та природної конвекцій, зв'язано з

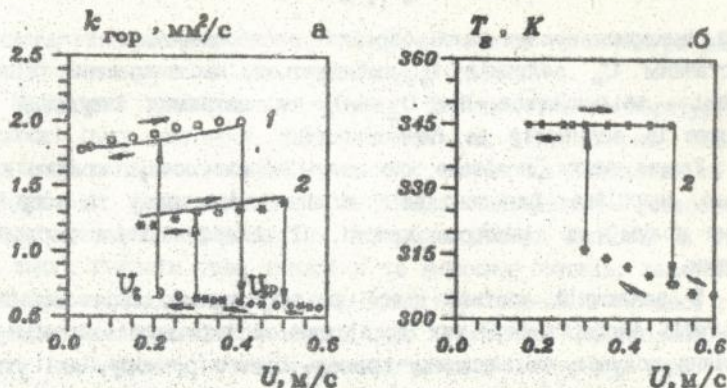


Рис.1. Залежність сталої швидкості горіння (а) та температури (б) краплі від швидкості потоку повітря. 1 - ацетон, 2 - етанол; \circ - \bullet - експериментальні результати, — розрахунки.

виконанням рівності між тепловим потоком, що йде на випаровування краплі та нагрівання її парів, і тепловиділенням в результаті хімічної реакції в стехіометричній суміші.

Використовуючи умову зшивки теплових потоків на межі зони активного хімічного реагування з виділенням тепла і холодної зони поблизу краплі, отримано критичні умови зриву полум'я в лобовій точці краплі у вигляді відношення швидкості зриву полум'я до діаметру краплі

$$\frac{U_{зр}}{d} \approx v_2 \left[\frac{B}{2b_{гг}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\delta}{Bd}} \right) \right]^2, \quad (3)$$

$$B = U_{гг} c_2 (T_{гор} - T_{гг}) / \alpha_2 [L + c_2 (T_{гор} - T_{гг})] \ln \left[1 + \frac{c_2 (T_{гор} - T_{гг})}{L} \right],$$

де $U_{зр}$ - нормальна швидкість поширення полум'я в стехіометричній суміші; v_2 - коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, L - питома теплота пароутворення; $T_{гор}$, $T_{гг}$ - відповідно температури полум'я та краплі; $b_{гг} = 1.08$.

Час затримки затухання полум'я на лобовій точці краплі t_3 для $U_{гг} > U_{зр}$ визначається виразом

$$Ho = \frac{t_3 U_{зр}}{d} = \frac{B_{гор,з}}{b_{гг}^2 (1 + B_{гор,з}) \ln(1 + B_{гор,з})} \left[1 - \sqrt{\frac{Re_{зр}}{Re_{гг}}} \right]^{-1}, \quad (4)$$

який використовували для обробки експериментальних даних. Із зростанням U_{*} величина t_{*} зменшується, а з ростом діаметру краплі - збільшується. При $U_{*} \rightarrow U_{*c}$ час затримки затухання різко зростає (в асимптоті до безмежності).

Таким чином, показано, що полум'я, яке оточує краплю вуглеводню, інерційне. Виявлено зв'язок швидкості зриву та часу затухання полум'я з діаметром краплі, її теплофізичними характеристиками.

В заключній частині цього розділу проводиться аналіз результатів експериментальних досліджень естафетного механізму поширення полум'я по ланцюжку крапель одного розміру, які утворюються генератором монодисперсного аерозоля. З ростом відстані l між краплями швидкість естафетного поширення полум'я U_{*} зменшується. Естафетний механізм для етилового спирту та ацетону спостерігається навіть при великих відстанях між краплями. Для визначення критичної відстані, для якої $U_{*} = 0$, експерименти проводилися з розчинами спирт - вода та ацетон - гас, для яких тиск насичених парів менший, ніж для етилового спирту та ацетону. Експерименти показали, що для суміші 80% етилового спирту і 20% води $U_{*} = 0$ при $l/d = 6.5$, а для суміші 10% ацетону та 90% гасу $U_{*} = 0$ при $l/d = 7$. Порівняння U_{*} для крапель досліджуваних рідин показало, що при заданій відстані ($l/d = \text{const}$) швидкість полум'я для крапель ацетону $U_{*} = 0.58$ м/с більша, ніж для етилового спирту, $U_{*} = 0.42$ м/с. Характерна особливість естафетного механізму - його дискретність: полум'я через період індукції спалахування $t_{iнд}$ перекидається з палаючої краплі на краплю, яка не горить. Величина періоду індукції визначається концентрацією парів над поверхнею непалаючої краплі і температурою в зоні горіння. Оскільки температури полум'я рідин мало відрізняються між собою, то при $l/d = \text{const}$ можна вважати, що $t_{iнд}$ пропорційний концентрації насичених парів і в результаті $U_{*} \sim n_{п.г}$. Із збільшенням відстані між краплями період індукції наближується до часу повного згорання одиночної краплі. Для критичної відстані, коли $U_{*} = 0$, вони рівні.

В третьому розділі розв'язується маловивчена задача про вплив руху частинки з урахуванням її плавлення та випаровування на характер часової залежності температури частинки та умови переходу на високотемпературний режим тепломасообміну та кінетики хімічної реакції. Об'єктом дослідження було взято

магній, який відноситься до класу речовин з температури плавлення та кипіння нижчими ніж температура горіння.

Проведені дослідження часових залежностей температури та швидкості руху частинки, теплових потоків (молекулярно- конвективного та випромінюванням), теплових затрат на плавлення та випаровування, тепловиділення та сталої швидкості гетерогенної хімічної реакції, коефіцієнтів тепломасообміну частинки з газом дали змогу виявити роль теплових та масових потоків, теплообміну випромінюванням, фазових та хімічних перетворень в процесі гетерогенного спалахування частинки, що рухається прискорено, для різних її діаметрів, початкових швидкостей і температур газу.

Показано, що для частинок магнія $d < 200$ мкм урахування дифузійної області протікання хімічної реакції не приводить до значного впливу на критичні параметри спалахування та період індукції. Вплив випаровування необхідно враховувати для дрібних частинок $d < 40$ мкм. Наприклад, період індукції частинки $d = 10$ мкм при врахуванні випаровування в 5,5 раз більший. Для частинок $d > 2$ мм теплові потоки молекулярно-конвективний та випромінюванням рівні.

Спостерігається різний вплив відносної швидкості руху U на період індукції t_{ind} дрібних і великих частинок. В області дрібних частинок, діаметр котрих знаходиться близько критичного значення d_c , період індукції для прискореної частинки ($U(t)$) більший, ніж для нерухомої ($U=0$), і менший t_{ind} частинки, що рухається з постійною швидкістю ($U=const$) (рис.2).

Мінімум на кривих $t_{ind}(d)$ можна пояснити виходячи із уявлення про стадійний характер протікання процесу спалахування частинки. Перша стадія визначається тепловим нагріванням частинки, під час якого зневажається хімічним енерговиділенням. Слідуюча- друга стадія - характеризується конкуренцією між тепловиділенням за рахунок гетерогенної реакції та тепловідводом від частинки теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. В області малих розмірів $d_c < d < d_{min}$ (d_{min} - діаметр, при якому період індукції має мінімальне значення) тривалість першої стадії значно менша, ніж другої. Збільшення діаметру частинки приводить до зменшення тепловитрат молекулярно-конвективним механізмом і, відповідно, до зменшення часу виходу на високотемпературний режим. В області великих розмірів, $d > d_{min}$, збільшення діаметру частинки приводить до росту тривалості

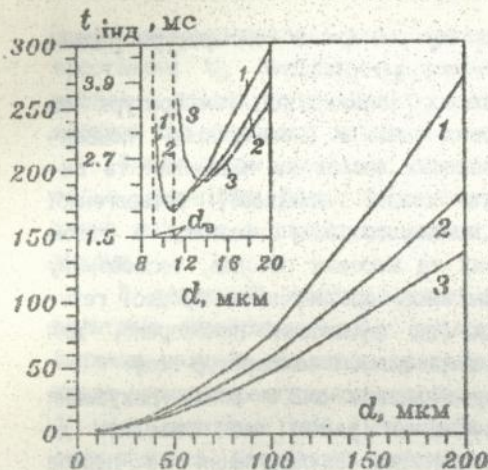


Рис.2. Залежність періоду індукції від діаметру частинки при $T_2=1173\text{K}$;
 1 - $U=0$, 2 - $U(u)$,
 3 - $U=\text{const}=\delta\text{M/с}$.

першої стадії, яка являється основною для періоду індукції. Аналогічним механізмом пояснюється наявність мінімуму на кривій залежності періоду індукції від швидкості частинки.

Виходячи із проведеного в дисертації аналізу, та використовуючи наближення Франк-Каменецького, для періоду індукції та критичних умов гетерогенного спалахування частинки при фазових перетвореннях на II поверхні отримано вирази

$$t_{i,пл} = \frac{c_1 \rho_1 d^2}{6\lambda_2 (Nu+B)} \left\{ \ln \left[\frac{T_{*} - T_{*k}}{RT_{*}^2} E \right] + \left[\frac{\delta_{пл}}{Nu+B} - \mu_{пл} \right]^{-1} + \right. \\ \left. + \pi \sqrt{\frac{2}{e} / \left[\frac{\tau_{\alpha}}{\tau_x} - \frac{\tau_{\alpha}}{\tau_{вип}} \exp(\gamma_{вип} - 1) - \frac{1}{e} \right]} \right\}, \quad (5)$$

де

$$T_{*} = T_2 - \frac{E_0(T_2^4 - T_{ст}^4)}{\alpha_{эф}}, \quad \delta_{пл} = \frac{c_1 \rho_2 n_{ок} d k_0}{\lambda_2 L_{пл}} \exp \left[-\frac{E}{RT_{пл}} \right], \quad \mu_{пл} = \frac{c_1(T_{пл} - T_{*})}{L_{пл}}$$

$$B = \frac{4\epsilon\sigma T_2^3 d}{\lambda_2}, \quad \tau_\alpha = \frac{c_1 \rho_1 d}{6\alpha_\beta \phi}, \quad \alpha_\beta \phi = \alpha + 4\epsilon\sigma T_2^3, \quad \tau_x = \frac{c_1 \rho_1 d (RT_M^2/E)}{6qK_0 \rho_2 n_{ок}}, \quad \exp\left[\frac{E}{RT_M}\right],$$

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{LM_1}{E}, \quad \tau_{\text{вип}} = \frac{c_1 \rho_1 d (RT_M^2/E)}{6L\beta\rho_2 n_{п.м}}, \quad n_{п.м} = \frac{M_1}{M_2} \exp\left[\frac{LM_1}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{вип}}} - \frac{1}{T_M}\right)\right];$$

$$\left(\frac{\tau_\alpha}{\tau_x}\right)_{кр} \cdot \left[1 - \left(\frac{\tau_x}{\tau_{\text{вип}}}\right)_{кр} \exp\left[\tau_{\text{вип}}^{-1}\right]\right] = \frac{1}{e}. \quad (6)$$

Тут c_1 - питома теплоємність частинки; ρ_1, ρ_2 - густини частинки та газу; q - тепловий ефект реакції, розрахований на одиницю маси окислювача; α, β - коефіцієнти тепло- та масообміну частинки; $L_{пл}$ - питома теплота плавлення; $T_{\text{вип}}, T_{\text{пл}}$ - температури кипіння і плавлення магнію; $T_2, T_{ст}$ - температури газу та стінок реакційної установки; ϵ - коефіцієнт чорноти частинки; M_1, M_2 - молярні маси магнію та повітря; $n_{ок}, n_{п.м}$ - відносні масові концентрації окислювача і парів магнію.

З формули (5) випливає, що в області малих діаметрів і великих швидкостей руху частинки ($T_M = T_2$) зменшення d або збільшення U викликає зменшення величини τ_α/τ_x і, відповідно, ріст періоду індукції. При наближенні d і U до критичних значень (виконується умова (6)) період індукції різко зростає (рис.2).

В четвертому розділі розвинутий нами метод дослідження ролі та взаємовпливу процесів тепломасообміну і кінетики хімічних перетворень застосовується для аналізу стійких та критичних високотемпературних станів, які характеризують горіння, спонтанне та вимушене потухання частинки, на поверхні якої протікають паралельні хімічні реакції. Детально досліджується явище гістерезису тепломасообміну та кінетики хімічних реакцій на поверхні частинки, критичні умови його існування в залежності від початкових температури та діаметру частинки, температури газу та концентрації окислювача в ньому.

Розкривається механізм впливу випромінювання, кінетичного та дифузійного факторів на критичні умови та часові характеристики горіння частинки.

Характеристики гетерогенного спалахування, горіння та затухання частинки вишукуються аналізом та розв'язанням рівнянь

теплого, масового балансів та кінетики паралельних хімічних реакцій $C+O_2=CO_2$ (I), $2C+O_2=2CO$ (II), $C+CO_2=2CO$ (III):

$$\frac{1}{\delta} c_1 \rho_1 d \frac{dT_1}{dt} = q_x - q_r, \quad q_r = q_{m,k} + q_n, \quad T_1(t=0) = T_m; \quad (7)$$

$$n_{ок,с} = n_{ок} \left[\sum_{i=1}^2 \frac{k_i}{\beta} + 1 \right]^{-1}, \quad q_x = \left[\sum_{i=1}^2 k_i q_i \right] \rho_2 n_{ок,с} \alpha_1, \quad \alpha_1 = 1 - \frac{q_3 k_3 k_1}{\sum_{i=1}^2 (q_i k_i) (k_3 + \beta)};$$

$$k = \sum_{i=1}^2 k_i = \sum_{i=1}^2 k_{oi} \exp(-E_i/RT_1), \quad k_3 = k_{o3} \exp(-E_3/RT_1); \quad \beta = DNu/d;$$

$$\frac{d(d)}{dt} = -\frac{2\rho_2}{\rho_1} \left[\sum_{i=1}^2 \Omega_i k_i \right] n_{ок,с} \alpha_2, \quad d(t=0) = d_n, \quad \alpha_2 = 1 + \frac{\Omega_3 k_3 k_1}{\left(\sum_{i=1}^2 \Omega_i k_i \right) k_3 + \beta}, \quad (8)$$

де T_1 - температура частинки, q_x - потужність хімічного енерговиділення, що припадає на на одиницю поверхні частинки; $q_{m,k}$, q_n - теплові потоки молекулярно-конвективний та випромінюванням, віднесені до одиниці поверхні частинки; D - коефіцієнт дифузії; $i=1$ - реакція (I), $i=2$ - реакція (II); k_1 , k_2 , k_3 - сталі швидкостей реакцій (I), (II) і (III); Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 - відносні масові стехіометричні коефіцієнти.

Початок виходу з низькотемпературного на високотемпературний режим характеризується мінімумом на кривій $dT_1/dt(t)$ (т.В, рис.3в). На низькотемпературній стадії процес гетерогенних хімічних реакцій протікає в кінетичній області ($k_1 < \beta$, $k_2 < \beta$, $k_3 < k_1$, $q_x \ll |q_r|$) (рис.3г). Період індукції $t_{інд}$ знаходиться як час переходу на квазістаціонарний високотемпературний режим, за який позитивне значення часової похідної температури частинки досягає максимального значення, тобто $d^2T_1/dt^2=0$ і $d^3T_1/dt^3 < 0$ (т.В"). При цьому сумарна стала швидкості реакції зрівнюється з коефіцієнтом масообміну. Температура горіння в режимі квазістаціонарного тепломасообміну спочатку зростає, проходить через максимум (т.М), потім спадає. Під час горіння частинки швидкість реакцій велика, $k_1 > \beta$, $k_2 > \beta$, $k_3 > k_1$, $q_x \approx q_r$ (рис.3г). В результаті зменшення діаметру та температури горіння частинки і досягнення критичних значень d_n , T_{1n} в момент часу t_n (т.П), коли негативна по-

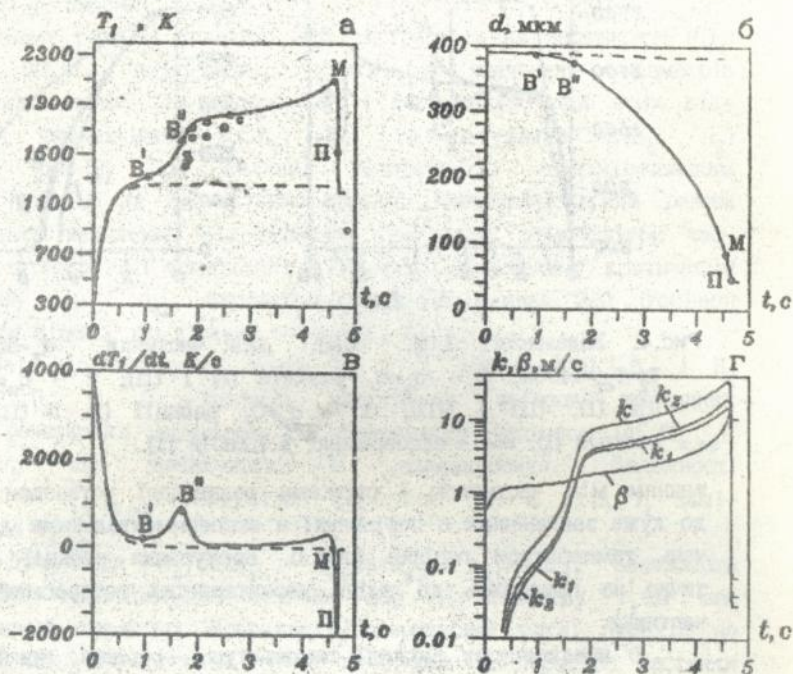


Рис.3. Залежності $T_1(t)$, $d(t)$, $dT_1/dt(t)$, $k(t)$, $k_1(t)$, $k_2(t)$, $\beta(t)$ для $T_2=T_{ст}=1200K$, $d_n=390 \mu m$; — реакції (I) і (II), - - - реакція (I), \circ —експеримент В.І.Бабія [1].

хідна dT_1/dt приймає мінімальне значення ($d^2T_1/dt^2=0$ і $d^3T_1/dt^3>0$ (рис.3в)), здійснюється спонтанний перехід на квазістаціонарний низькотемпературний режим - потухання частинки.

Час горіння $t_{гор}$ знаходиться як тривалість стадії квазістаціонарного високотемпературного режиму тепломасообміну ($t_{гор} = t_n - t_{нд}$). Для випадку протікання тільки реакції (II) при тих же умовах вихід на високотемпературний режим не відбувається (рис.3). Для випадку більш високих температур газу спалахування частинки здійснюється в припущені протікання на II поверхні тільки реакції (I) (рис.4). Знехтування реакцією (II) веде до збільшення часу горіння та критичного діаметру частинки, який визначає II спонтанне потухання. Для випадку двох реакцій (I) і (II) час горіння менший, ніж для однієї. Знехтування теплообміном з середовищем веде до збільшення часу горіння.

ЛІВІЙ М. В. Степанюк
ІІІІ ІІІІ ІІІІ

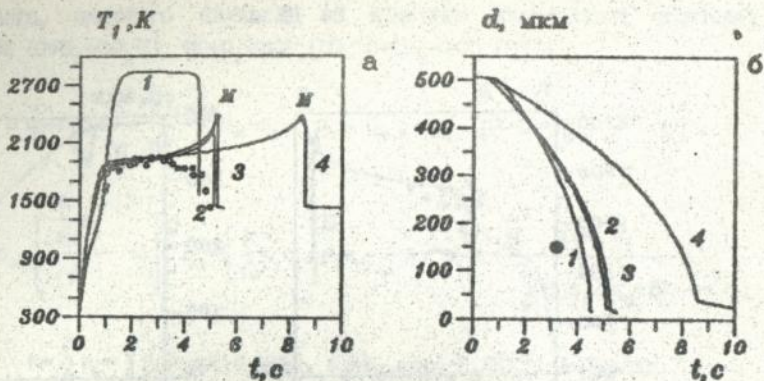


Рис.4. Залежності $T_1(t)$, $d(t)$ для частинки $d_0=505$ мкм, $T_2=T_{cr}=1400$ К. 1 - $q_H=0$, реакція (I) і (II); 2 - $q_H \neq 0$, реакції (I), (II) і (III); 3 - $q_H \neq 0$, реакції (I) і (II); 4 - $q_H \neq 0$, реакція (I); ∞ - експеримент В.І.Бабія [1].

ванням між частинкою і стінками реакційної установки приводить до дуже завищених в порівнянні з експериментальними даними значень температури горіння (рис.4). Врахування реакції (III) практично не приводить до зміни характеристик гетерогенного горіння частинки.

В аналітичному вигляді температура горіння, критичні діаметри, які визначають спалахування та спонтанне (вимушене) потухання частинки, знаходяться в результаті дослідження стаціонарних режимів тепломасообміну та їх стійкості. Із умови стаціонарності ($q_x=q_r$) залежність діаметру, коефіцієнтів тепло- та масообміну від температури частинки, що описує стаціонарні стійкі та критичні II стани, має вигляд

$$d = \frac{\lambda_2 Nu}{\alpha} = \frac{D Nu}{\beta} = \frac{\lambda_2 Nu (T_1 - T_2)}{\left[A \pm \sqrt{A^2 - B} \right] \left[\sum_{i=1}^n K_i q_i \right] \rho_2 n_{ок}}, \quad (9)$$

$$A = 0,5(1 - A_1 - A_2), \quad B = A_1 \cdot A_2,$$

$$A_1 = \frac{c_2 (T_1 - T_2) \left[\sum_{i=1}^n K_i \right]}{\left[\sum_{i=1}^n K_i q_i \right] \rho_2 n_{ок}}, \quad A_2 = \frac{\epsilon \sigma (T_1^4 - T_{cr}^4)}{\left[\sum_{i=1}^n K_i q_i \right] \rho_2 n_{ок}}.$$

Знак мінус перед корнем в (9) визначає ефекти, які пов'язані з теплообміном випромінюванням частинки з холодними стінками реакційної установки.

В цьому розділі показано, що екстремуми на залежності $d(T_1)$ ($\alpha(T_1)$, $\beta(T_1)$) визначають критичні значення діаметрів (коефіцієнтів тепло- та масообміну) і температур, при яких відбувається спалахування ($t.V_1, V_2$) та потухання ($t.P_1, P_2$) частинки (рис.5). При великих тепловтратах випромінюванням ($T_{ст} < T_2$) перехід на високотемпературний квазістаціонарний режим здійснюється незалежно від значення початкової температури частинки в інтервалі II початкових діаметрів, обмеженому критичними значеннями d_{b1} і d_{b2} . Високотемпературний режим ТМО (горіння) описується віткою, що з'єднує точки Π_1 і Π_2 .

Криві, що з'єднують точки V_1 і P_1 (рис.5а,б,в), V_2 і P_2 (рис.5б), Π_1 і Π_2 (рис.5г) ілюструють зв'язок критичних значень початкових діаметрів та температур частинок ($d_{b1}^*(T_{н.кр.})$, $d_{b2}^*(T_{н.кр.})$), що визначають II спалахування. Залежності $d_{b1}^*(T_{н.кр.})$ і $d_{b2}^*(T_{н.кр.})$ описуються формулою (9), в якій T_1 замінюється на $T_{н.кр.}$.

В інтервалах $d_{n1} < d < d_{b1}$, $d_{b2} < d < d_{n2}$, $d_{n1} < d < d_{n2}$ залежність стаціонарної температури частинки від II діаметру $T_1(d)$ має гістерезисний характер. Всередині гістерезисної петлі перехід на вітку горіння здійснюється, якщо початкова температура частинки вище критичного значення. Критичні значення початкових температур знаходяться в інтервалах $T_{1b1} < T_{н.кр} < T_{1n1}$, $T_{1b2} < T_{н.кр} < T_{1n2}$, $T_{1n2} < T_{н.кр} < T_{1n1}$. В області великих розмірів $d_{b2} < d < d_{n2}$ з ростом діаметру відбувається збільшення початкової температури частинки. Це зв'язано із зменшенням молекулярно-конвективного теплового потоку, який нагріває частинку при $T_{н.кр} < T_2$, і зменшенням хімічного тепловиділення в результаті падіння масового потоку окислювача при $T_{н.кр} > T_2$. При малих тепловтратах випромінюванням збільшення діаметру в інтервалі $d_{n1} < d < d_{b1}$ приводить до зменшення критичної початкової температури частинки. Характер цієї залежності визначається тепловтратами теплопровідністю. При збільшенні температури стінок та наближенні II до температури газу відбувається виродження гістерезисної петлі в інтервалі діаметрів частинок $d_{b2} < d < d_{n2}$ (рис.5б).

З урахуванням тепловтрат випромінюванням температура горіння при зменшенні діаметру частинки зростає і приймає макси-

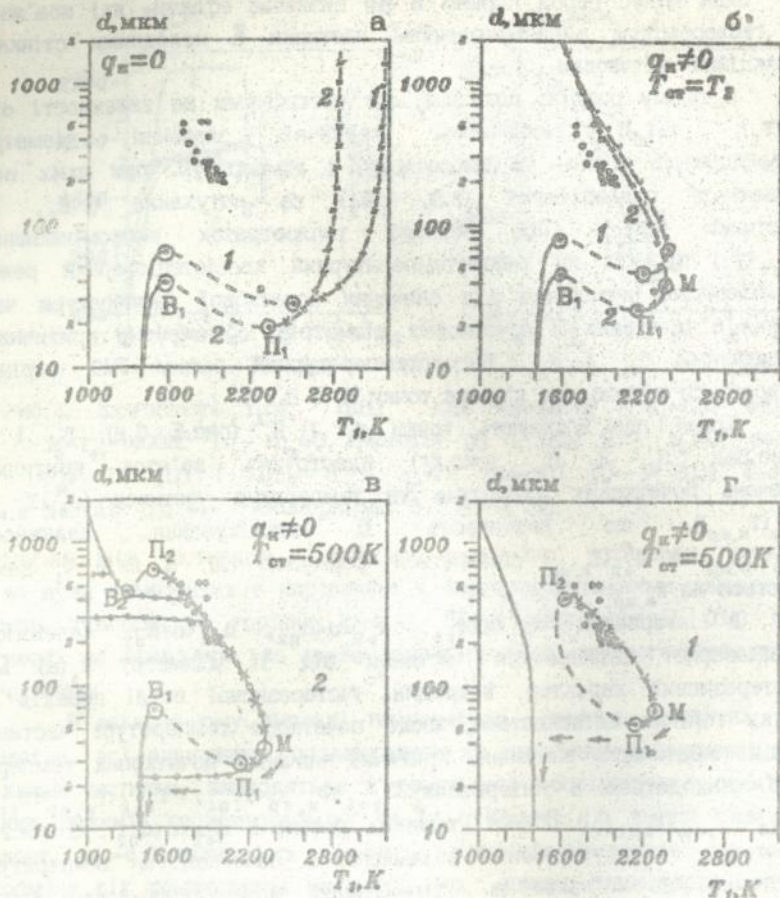


Рис.5. Залежність $d(T_1)$. Вплив теплообміну випромінюванням та кількості хімічних реакцій на стійкі та критичні стани вуглецевої частинки при $T_2=1400\text{K}$. 1 - реакція (I), 2 - реакції (I) і (II); $\circ\circ\circ$ - експеримент В.І.Бабія [1]. $\times\times\times$ стійкі високотемпературні стани (горіння); — стійкі низькотемпературні стани (окислення); - - - нестійкі стани (залежності $d_{B1}^M(T_{n,кр})$, $d_{B2}^M(T_{n,кр})$); \dashrightarrow розрахунки по нестационарній моделі (7)-(8) для $d_n=300\text{ мкм}$ і $d_n=600\text{ мкм}$, $T_n=300\text{K}$. - т. B_1 , B_2 - спалювання; т. Π_1 , Π_2 - потування; т. М - горіння, максимальна температура та відповідний їй діаметр частинки.

мальне значення (т.М, рис.Бб,в,г, рис.3, рис.4), яке в результаті застосування умови $\partial q_x / \partial d = \partial q_r / \partial d$ описується виразом:

$$T_{гор.м} = T_2 + \frac{\left(\sum_{i=1}^n K_i q_i \right) n_{ок}}{c_2 \left(\sum_{i=1}^n K_i \right)} \left[1 - \sqrt{\frac{60(T_{гор.м} - T_{ст})^2}{\left(\sum_{i=1}^n K_i q_i \right) n_{ок} \rho_2}} \right] \quad (10)$$

Коли температура горіння і діаметр частинки досягають критичних значень T_{in1} і d_{n1} (показано стрілкою на рис.5), відбувається спонтанний перехід на низькотемпературний режим - потухання частинки.

Врахування тепловтрат випромінюванням та протікання на поверхні частинки двох паралельних реакцій дає хороший збіг між розрахунками залежності $T_{гор}(d)$ по формулі (9), в якій $T_1 = T_{гор}$ змінюється в інтервалі (T_{in2}, T_{in1}) , і величини $T_{гор.м}$ по формулі (10) з чисельним рішенням по нестационарній моделі ТМО та експериментальними даними В.І.Бабія (рис.4, рис.5).

Граничні значення температури горіння T_{in1} , T_{in2} та відповідні критичні діаметри $(d_{n1}$ і $d_{n2})$, критичні параметри, які визначають гетерогенне спалахування частинки, знаходяться із умови екстремума на залежностях режимних параметрів $(d, T_2, n_{ок}, U, T_{ст})$ від стаціонарної температури частинки, що еквівалентно умові дотику кривих $q_x(T_1)$ і $q_r(T_1)$.

На рис.6 наведено залежності критичних діаметрів частинки від температури газу $d_n(T_2)$, $d_n(T_2)$. Зменшення критичних діаметрів d_{n1} та d_{n2} з ростом температури газу пов'язано із збільшенням тепловтрат теплопровідністю. При $q_x \neq 0$ і $T_{ст} < T_2$ зростання критичних діаметрів частинки d_{n2} , d_{n2} , які визначають її спалахування та потухання, при збільшенні температури газу зв'язано з тепловтратами випромінюванням та зменшенням тепловиділення за рахунок хімічної реакції в результаті падіння масового потоку окислювача до поверхні частинки. При збільшенні температури газу зростає різниця між d_{n1} та d_{n1} , d_{n2} та d_{n2} . При $T_2 = T_{2г1}$ та $T_2 = T_{2г2}$ відбувається виродження критичних умов спалахування та потухання, тобто $d_{n1} = d_{n1} = d_{г1}$, $d_{n2} = d_{n2} = d_{г2}$ (рис.6).

Нами показано, що параметри виродження критичних умов знаходяться із рішення системи рівнянь

$$q_x = q_r, \quad \partial q_x / \partial T_1 = \partial q_r / \partial T_1, \quad \partial^2 q_x / \partial T_1^2 = \partial^2 q_r / \partial T_1^2.$$

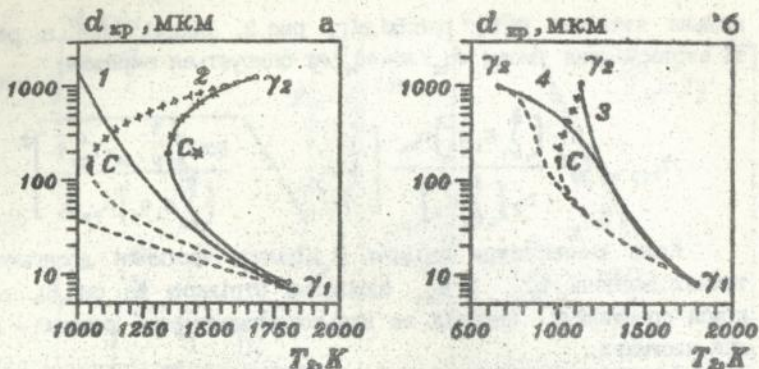


Рис.6. Залежність $d_{кр}(T_{кр})$ при протіканні на поверхні вуглецевої частинки паралельних реакцій (I) і (II). 1 - $q_n=0$; 2 - $q_n \neq 0$, $T_{ст}=500K$; 3 - $q_n \neq 0$, $T_{ст}=T_2$; 4 - $q_n \neq 0$, $T_{ст}=1300K$. - - - $d_{м1}$; + + + $d_{н2}$; — $d_{м1}$; - - - $d_{н2}$; $T_{γ1}$, $T_{γ2}$ характеризують виродження критичних умов, т.С_м, С -граничні параметри для спалахування та потування.

В припущенні протікання тільки реакції (I) параметри виродження для $d_{γ1}$ можуть бути наближено описані в аналітичному вигляді

$$\left[\frac{\kappa}{\beta} \right]_{T_{γ1}} = \frac{E - 2RT_{γ1}}{E + 2RT_{γ1}}; T_{γ1} = \frac{E}{2R} \sqrt{\frac{\bar{q}n_{ок}}{1 + \bar{q}n_{ок}}}; \bar{q} = \frac{qR}{c_2 E};$$

$$T_{2γ1} = \frac{E}{2R} \bar{q}n_{ок} \left[\sqrt{\frac{\bar{q}n_{ок} + 1}{\bar{q}n_{ок}}} - 1 \right].$$

Величина $(\kappa/\beta)_{T_{γ1}} \approx 0.5$, що являється характерним і для виродження критичних умов, при $d_{γ2}$ в припущенні протікання на поверхні частинки двох паралельних реакцій.

Тепловтрати випромінюванням обумовлюють існування двох граничних температур газу T_{2C} і T_{2C_m} (т. С і С_м на рис.6), які являються точками мінімуму на залежностях критичних температур газу від діаметру частинки.

Для $T_2 > T_{2C_m}$ і $d_{н1}(T_2) < d_{н2}(T_2)$ перехід на високотемпературний режим здійснюється при будь-яких початкових температурах частинки. В інтервалах $d_{м1}(T_2) < d_{н1}(T_2)$ і $d_{н2}(T_2) < d_{н1}(T_2)$ спалахування відбувається, якщо початкова температура частинки перевищує критичне значення, обмежене відповідно температурами

$$T_{1n1} < T_{н,кр} < T_{1n2} < T_{н,кр} < T_{1n2}$$

При температурах газу $T_2 < T_2 < T_{2Cн}$ та початковому діаметрі частинки $d_{n1}(T_2) < d_n < d_{n2}(T_2)$ перехід на високотемпературний режим можливо здійснити при умові, якщо початкова температура частинки вище критичного значення, яке лежить в інтервалі $T_{1n2} < T_{н,кр} < T_{1n1}$. При температурах газу $T_2 < T_{2Cн}$ перехід на високотемпературний режим неможливо здійснити ні при яких початкових діаметрах та температурах частинки. Параметри, які характеризують т.С та $C_{н}$, визначаються наступними еквівалентними критеріями

$$\frac{\sigma(T_{1кр}^4 - T_{ст}^4)}{\left(\sum_{i=1}^2 K_i q_i\right) \rho_2 n_{ок}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^2 K_i}{\beta} + 1 \right]^{-2}, \quad \frac{\lambda_2 Nu (T_{1кр} - T_2)}{\sigma(T_{1кр}^4 - T_{ст}^4) d} = \frac{\sum_{i=1}^2 K_i}{\beta}$$

Виходячи з того, що виконується умова $\sum_{i=1}^2 K_i / \beta < 1$, з якої випливає, що критична температура частинки дорівнює температурі газу, отримуємо критерії для визначення граничних параметрів

$$\frac{\sigma(T_{2Cн}^4 - T_{ст.Сн}^4)}{\left(\sum_{i=1}^2 K_i q_i\right) \rho_2 n_{ок.Сн}} = 1, \quad K_i = K_{oi} \exp\left[-\frac{E_i}{RT_{2Cн}}\right], \quad (11)$$

$$K_{н} = \frac{\sigma c_{н} T_{2Cн}^2}{\lambda_2 Nu R \sum_{i=1}^2 K_i q_i} \left[1 - \frac{T_{ст.Сн}^4}{T_{2Cн}^4} - \frac{4RT_{2Cн} \sum_{i=1}^2 K_i q_i}{\sum_{i=1}^2 K_i q_i E_i} \right] = 1.$$

Якщо діаметр частинки задовольняє умові $K_{н} < 1$, то він вважається малим. В протилежному разі діаметр частинки вважається великим.

Наш аналіз залежності критичних значень k/β від температури газу показав, що при спалахуванні $k/\beta < 0.5$. В припущенні Фрэнк-Каменецького отримано наближені формули для критичних умов та періоду індукції гетерогенного спалахування частинки при врахуванні теплообміну випромінюванням частинки із стінками реакційної установки та протікання на її поверхні двох паралельних реакцій

$$\left[\frac{\tau_{\alpha}}{\tau_{x1}} + \frac{\tau_{\alpha}}{\tau_{x2}} \exp(\gamma - 1) \right]_{кр} = \frac{1}{e}, \quad \gamma = \frac{E_2}{E_1}, \quad (12)$$

$$\tau_{x1} = \frac{c_1 \rho_1 d (RT_{н}^2 / E_1)}{6q_1 K_{o1} \rho_2 n_{ок}} \exp\left[-\frac{E_1}{RT_{н}}\right], \quad \tau_{x2} = \frac{c_1 \rho_1 d (RT_{н}^2 / E_1)}{6q_2 K_{o2} \rho_2 n_{ок}} \exp\left[-\frac{E_2}{RT_{н}}\right]$$

$$t_{инд} = \frac{c_1 \rho_1 d^2}{6\lambda_2 (Nu+B)} \left\{ \ln \frac{T_m - T_n}{RT_m^2} E_1 + \pi \sqrt{\frac{2}{e}} \sqrt{\left[\frac{\tau_\alpha}{\tau_{x1}} + \frac{\tau_\alpha}{\tau_{x2}} \exp(\gamma-1) \right]} \right\}. \quad (13)$$

Аналіз $t_{инд}$ (d) по Формулі (13) показує, що тепловтрати випромінюванням до стінок реакційної установки ($T_{ст}, T_2$) приводять до різкого збільшення періоду індукції при наближенні діаметру частинки до $d_{к2}$.

В цьому ж розділі проведено аналіз впливу кількості частинок на характеристики високо- та низькотемпературних режимів ТМО для монодисперсної та двофракційної газозависі частинки при протіканні на Іх поверхні однієї та двох хімічних реакцій. При зростанні кількості частинок в нещільній газозависі (коефіцієнт надлишку повітря більше одиниці), критичний діаметр частинки, при якому відбувається II спонтанне потухання, зменшується незначно. Дослідження стаціонарних режимів ТМО дали змогу отримати в аналітичному вигляді критичні параметри гетерогенного спалахування та спонтанного потухання газозависі частинки. Встановлено, що найбільш оптимальні умови для спалювання газозависей спостерігаються при масових концентраціях частинок 30-50 г/м³, які відповідають коефіцієнтам надлишку повітря близьких до одиниці. При таких умовах квазістаціонарний високотемпературний режим протікає з виродженням різкого переходу на низькотемпературний стан.

В п'ятому розділі проводиться аналіз та розкривається механізм впливу стефанівської течії, внутрішнього реагування та нагрівання частинки лазерним випромінюванням на характеристики стійких та критичних режимів тепломасообміну частинки з одночасним врахуванням II теплообміну випромінюванням з холодними стінками реакційної установки. На основі розв'язання рівнянь теплопровідності та дифузії в роботі отримано аналітичні вирази для швидкості стефанівської течії, теплового потоку та потужності хімічного тепловиділення в результаті протікання реакцій (I) і (II) при врахуванні стефанівської течії:

$$U_{ст} = P_{ст} \frac{\beta n_{ок}}{K_1 + K_2 + \beta + P_{ст} n_{ок}} \cdot P_{ст} = \frac{M_c}{M_{O_2}} (K_1 + 2K_2);$$

$$q_{мх} = \alpha \left[(T_1 - T_2) + \frac{U_{ст}}{\beta} \frac{T_1 + T_2}{2} \right], \quad q_x = \frac{\left[\sum_{i=1}^s q_i K_i \right] \rho_2 n_{ок} \beta}{\sum_{i=1}^s K_i + \beta + P_{ст} n_{ок}}$$

Тут $U_{ст}$ - швидкість стефанівської течії, M_{CO} , M_{O_2} - молярні маси C і O_2 відповідно.

Показано, що наявність стефанівської течії приводить до зуження інтервалу розмірів частинки, в якому здійснюється її спалахування (зростання $d_{в1}$, $d_{п1}$ та зменшення $d_{в2}$, $d_{п2}$); збільшення граничних температур газу T_{2C} і $T_{2Cм}$; зменшенню температур газу, при яких настає виродження критичних умов спалахування та потухання $T_{2\gamma_1}$, $T_{2\gamma_2}$ (табл.). Ці ефекти пов'язані із зменшенням хімічного тепловиділення та зростанням тепловтрат до газу в результаті впливу стефанівської течії. Виведено критерій для визначення граничної температури газу $T_{2Cм}$ (та зв'язаних з нею параметрів $p_{ок, Cм}$, $T_{ст, Cм}$) у вигляді:

$$\frac{p_{ок, Cм} \left[\sum_{i=1}^n q_i K_i - \alpha_2 T_{2Cм}^2 p_{ст} \right]}{80(T_{2Cм}^4 - T_{ст, Cм}^4)} = 1,$$

$$K_1 = K_{O_1} \exp(-E_1/RT_{2Cм}), \quad K_2 = K_{O_2} \exp(-E_2/RT_{2Cм}).$$

Встановлено, що теплообмін випромінюванням з холодними стінками реакційної установки ($T_{ст} < T_2$) посилює ступінь впливу стефанівської течії на характеристики гетерогенного горіння частинок. Порівняння експериментальних та теоретичних результатів, отриманих при врахуванні стефанівської течії, по залежностям періоду індукції, часу і температури горіння від діаметру частинки, дає задовільний їх збіг при температурах газу $T_2 > 1400K$.

Для пояснення експериментальних результатів по спалахуванню та горінню вуглецевих частинок при температурах газу $T_2 < 1400K$ та концентраціях окислювача $p_{ок} < 0.23$ в роботі проводиться вивчення впливу на ці процеси та їх характеристики внутрішнього реагування. Додаткове тепловиділення в результаті хімічних реакцій усередині частинки зменшує граничні температури газу та концентрації окислювача, так що

$$\frac{p_{ок, Cм} (q_1 K_1 + q_2 K_2)}{80(T_{2Cм}^4 - T_{ст, Cм}^4)} \left(1 + \frac{K_U}{K_1 + K_2} \right) = 1,$$

$$k_u = \frac{2D_u}{d} (Se_u \operatorname{cth} Se_u - 1), \quad Se_u = \sqrt{\frac{F_u d^2 (k_1 + k_2)}{4D_u}}$$

де D_u - коефіцієнт внутрішньої дифузії, F_u - питома поверхня шару.

Одночасно відбувається зменшення критичних діаметрів $d_{\gamma 1}$ і $d_{\gamma 2}$ та збільшення $d_{\gamma 1}$ і $d_{\gamma 2}$ - тобто, розширення інтервалів розмірів частинок, в яких здійснюється високотемпературний режим. Значно збільшується $d_{\gamma 2}$ і зменшується $T_{2\gamma 2}$ (табл.).

Таблиця

Вплив стефанівської течії ($P_{sf} \neq 0$) та внутрішнього реагування ($k_u \neq 0$) на параметри виродження критичних умов спалахування і потування. $T_{cr} = T_2$, $n_{ок} = 0.23$.

P_{sf}, k_u	$T_{2\gamma 1}, K$	$d_{\gamma 1}, \mu m$	$T_{2\gamma 2}, K$	$d_{\gamma 2}, \mu m$
$P_{sf} = 0, k_u = 0$	1786	8.0	1134	1100
$P_{sf} \neq 0, k_u = 0$	1516	30.9	1185	523
$P_{sf} = 0, k_u \neq 0$	1672	8.9	752	1902

Критичні значення концентрації окислювача, які відокремлюють область гістерезису стаціонарної температури частинки ($n_{ок,п} < n_{ок} < n_{ок,в}$) від високотемпературної ($n_{ок,в} < n_{ок}$) та низькотемпературної ($n_{ок} < n_{ок,п}$) областей стійких станів, зміщуються в сторону низьких значень концентрацій.

Зменшити критичні концентрації окислювача та розширити інтервал розмірів, в якому здійснюються високотемпературні стани, можливо в результаті нагрівання частинки лазерним випромінюванням. В залежності від температури газу та інтенсивності лазерного випромінювання спостерігається різний характер гістерезисних залежностей стаціонарної температури частинки від її діаметру. При високих температурах газу $T_{2сж} < T_2 < T_{2\gamma 2}$ та невеликих інтенсивностях лазерного випромінювання ($q_{л} < q_{ж}$, $q_{л} < q_{н}$) в області великих розмірів частинок в гістерезисна петля, обмежена критичними діаметрами $d_{\gamma 2}$ і $d_{\gamma 1}$. При збільшенні інтенсивності лазерного випромінювання відбувається виродження цієї петлі та зникнення граничних точок С і С_н на кривій залежності $d_{кр}(T_2)$. Гранична температура газу $T_{2сж}$ і

відповідні їй значення концентрації окислювача та інтенсивності лазерного випромінювання, визначаються згідно критерія

$$\frac{P_2 n_{\text{ок. см}} (q_1 K_1 + q_2 K_2)}{8\sigma(T_{2\text{см}}^4 - T_{\text{ст. см}}^4) - q_{\text{н. см}}} = 1.$$

При збільшенні $q_{\text{л}}$ граничні значення концентрації окислювача і температури газу зменшуються. Для $q_{\text{л}} < q_{\text{н}}$, $q_{\text{л}} < q_{\text{х}}$ закономірності часових залежностей температури та діаметру частинки також самі як і при виключеному лазерному нагріванні.

При великих інтенсивностях лазерного випромінювання ($q_{\text{л}} > q_{\text{х}}$, $q_{\text{л}} > q_{\text{н}}$) перехід на високотемпературний рівень стає можливим при низьких температурах газу. На залежності стаціонарної температури частинки від її діаметру спостерігається тільки одна гістерезисна петля, обмежена діаметрами $d_{\text{н1}}$ і $d_{\text{л1}}$.

Таким чином, проведені дослідження дали змогу визначити механізм та надати аналітичний опис впливу стефанівської течії, внутрішнього реагування і нагрівання частинки лазерним випромінюванням на закономірності здійснення та характеристики стійких високо- та низькотемпературних станів частинки при протіканні на її поверхні паралельних хімічних реакцій.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано аналітичні моделі, які дозволяють в явному вигляді отримати часові та критичні характеристики високо- та низькотемпературних станів тепломасообміну при фазових та хімічних перетвореннях в дисперсних системах: хімічно реагуюча газова суміш - розжарені частинки; палаюча в повітрі крапля; рухома частинка, на поверхні яких протікають фазові та хімічні перетворення.
2. Проведено аналіз нестационарного тепломасообміну для випадків запалення газової суміші рухомою розжареною частинкою (фрикційною іскрою).
3. Вивчено гістерезис тепломасообміну та швидкості випаровування краплі в потоці, що визначається зривом та відновленням полум'я на її лобовій точці. Виявлено роль та вплив природної конвекції на стійкість горіння краплі. Визначено критичні умови естафетного спалахування монодисперсного ланцюжка крапель.
4. Вивчено взаємовплив тепломасообміну та кінетики хімічних реакцій.

цій рухомої частинки при протіканні на II поверхні фазових перетворень. Визначено критичні умови та період індукції гетерогенного спалахування частинки при врахуванні II плавління, випаровування і теплообміну випромінюванням із стінками реакційної установки.

5. Встановлено закономірності впливу теплообміну випромінюванням та кінетики гетерогенних паралельних реакцій на характеристики стійких та критичних високо- та низькотемпературних станів, умови виродження критичних станів частинки.
6. Запропоновано метод дослідження та визначено закономірності гістерезисних залежностей температури частинки від її діаметру, температури газу та концентрації окислювача. Вивчено механізм спонтанного потухання частинки.
7. Проведено аналітичний опис критичних умов та часу затримки спалахування при протіканні на поверхні частинки двох паралельних реакцій.
8. Визначено вплив стефанівської течії, внутрішнього реагування та нагрівання частинки лазерним випромінюванням на стійкі та критичні режими тепломасообміну.
9. Проведено аналіз тепломасообміну та кінетики гетерогенних хімічних реакцій в моно- та двофракційній газозависі вуглецевих частинок.

Основні результати дисертації опубліковано в роботах:

1. Калинин В.В., Глушков В.Е. Горение капель бинарных смесей в потоке//Химическая физика процессов горения и взрыва. -АН СССР, Черногловка, 1977.- С.26-29.
2. Федосеев В.А., Калинин В.В. Тепло- и массообмен капли в нагретом потоке//Физика аэродисп. систем.-1977. Вып.16.-С.97-100.
3. Глушков В.Е., Федосеева Н.В., Калинин В.В. Скорость вставочно-го механизма воспламенения аэрозвеси// Физика аэродисп. систем.-1977. Вып.16.-С.63-67.
4. Калинин В.В., Кальян А.С. Определение методической погрешности задержки воспламенения на трековой установке//Физика аэродисп. систем.-1983. Вып.23.-С.70-73.
5. Глушков В.Е., Калинин В.В., Соболяк Г.И. Устойчивость горения капель жидкого топлива при различных направлениях вынужденной конвекции//Физика аэродисп. систем.-1983. Вып.23.-С.55-59.

6. Калинин В.В. К задаче о динамике прогрева и движения металлической частицы в горизонтальном потоке//Физика аэродисп. систем.-1985. Вып.27.-С.78-83.
7. Калинин В.В., Михель Ю.М. Время зажигания газа Фрикционной искрой//Инженерно-Физический журнал.-1986.- Т.51, №4.-С.114-116.
8. Орловская С.Г., Калинин В.В. Динамика теплообмена и движения металлической частицы в нагретом потоке окислителя//Инженерно-Физический журнал.- 1986.-Т.51, №4.-С.681.
9. Калинин В.В., Двойнишников В.А., Виленский Т.В. Математическое моделирование горения взвеси частиц. Часть I.//Физика аэродисп. систем.-1986. Вып.29.-С.24-29.
10. Виленский Т.В., Калинин В.В. Математическое моделирование горения взвеси//Физика аэродисп. систем.-1986. Вып.30.-С.31-35.
11. Калинин В.В., Орловская С.Г., Лаврова А.А. Анализ горения и погасания угольной частицы в потоке воздуха//Повышение эффективности и надежности работы энергоблоков.- М.,1987.- С.88 - 93.
12. Калинин В.В., Орловская С.Г. Воспламенение ускоренно движущихся металлических частиц//Физика аэродисп. систем.-1987. Вып. 31.-С.110-114.
13. Калинин В.В., Краснянский Н.М., Михель Ю.М. Время зажигания взрывчатых газовых смесей накаливаемыми частицами// Пожаровзрывобезопасность производственных процессов в металлургии.-М.:МИСИС, 1987.-С.273-275.
14. Калинин В.В., Орловская С.Г. К стационарной теории гетерогенного воспламенения и потухания частицы в газообразном окислителе//Инженерно-Физический журнал.-1988.-Т.55, №2.-С.232-236.
15. Калинин В.В., Михель Ю.М., Калинин А.И. Нестационарная тепловая модель зажигания газа движущейся Фрикционной искрой//Теплообмен в химически реагирующих системах.Т.3.-Минск: ИТМО АН БССР.-1988.-С.80-82.
16. Калинин В.В., Краснянский М.М., Михель Ю.М. Время зажигания паровоздушных легковоспламеняющихся жидкостей Фрикционными искрами//Физика аэродисп. систем.-1989. Вып.33.-С.69-73.
17. Калинин В.В. Определение времени зажигания газа движущейся Фрикционной искрой// Инженерно-Физический журнал.-1989.- Т.56, № 15.-С.862-863.
18. Калинин В.В., Орловская С.Г., Калинин А.И. Влияние начальной температуры частиц угольной пыли на характеристики горения//Повышение эффективности и надежности работы энергоблоков.-М.,1989.

-С.123-132.

19. Калинчак В.В., Стручаев А.И., Орловская С.Г. Инерционные характеристики пламени капле угледородов при его гистерезисе // Физика горения и взрыва.-1990.-Т. 26, №1.-С.92-97.
20. Орловская С.Г., Калинчак В.В. Критические режимы тепло- и массообмена при параллельных реакциях на поверхности частицы // Физика горения и взрыва.-1990.-Т.26, №1.-С.115-118.
21. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Дитчук В.М. Влияние скорости потока окислителя на время задержки воспламенения магния//Физика аэродисп. систем.-1990. Вып. 33.-С.127-132.
22. Дубинский А.В., Калинчак В.В., Чесноков М.Н. Тепло массообмен сферической частицы с газом при учете температурной зависимости коэффициентов переноса//Физика аэродисп. систем.-1991. Вып. 34.-С.130-135.
23. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Калинчак А.И. Тепло массообменная модель гетерогенного воспламенения и потухания частицы в газобразном окислителе//Реофизика и теплофизика неравновесных систем. Часть 2.- Минск: Ан БССР, 1991.-С.114-117.
24. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Калинчак А.И. Гетерогенное воспламенение и потухание частицы с учетом теплообмена излучением// Инженерно-Физический журнал.-1992.-Т.62, №3.-С.436-442.
25. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Калинчак А.И. Влияние излучения на пределы гетерогенного горения частицы//Материалы Международного Форума. Тепло массообмен в химически реагирующих системах.- Т.3.-Минск: АНБ, 1992.-С.11-14.
26. Калинчак В.В. Влияние излучения на критические режимы тепло-и массообмена при параллельных реакциях на поверхности частицы// Физика горения и взрыва.- 1994.- Т.30, № 4.-С.63-74.
27. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Евдокимов А.В., Мендель А.В. Горение и самопроизвольное потухание углеродной частицы в поле лазерного излучения // Физика горения и взрыва.-1995.-Т.31, №1.-С.50-56.
28. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Калинчак А.И. Влияние излучения на пределы гетерогенного горения частицы при двух параллельных реакциях// Инженерно-Физический журнал.-1995.-Т.68, № 3.-С.466-473.
29. Kalinchak V.V., Orlovskaya S.G., Mandel A.V. The burning and spontaneous extinction of carbon particle in the laser radiation field /Journal of Aerosol Science.- 1995.- Vol.26.- P. 315-

316.

30. Oriovskaya Z.G., Kalinchak V.V., Kalinchoak A.I., Mandel A.V. The burning and extinction of aerosol of carbon particles / Journal of Aerosol Sciences, - 1995. - Vol.26. - P. 679-680.
31. Чесноков М.Н., Калинчак В.В., Мандель А.В., Орловская С.Г. Горение и самопроизвольное потухание углеродных частиц в поле лазерного излучения / Труды 21 Международного пиротехнического семинара. - М.: РАН, 1995. - С.123-136.
32. Калинчак В.В., Гануи И.Х., Орловская С.Г. Гистерезис горения движущихся углеродных частиц с учетом теплопотерь излучением / Труды 21 Международного пиротехнического семинара. - М.: РАН, 1995. - С.356-371.
33. Калинчак В.В., Орловская С.Г. Влияние концентрации окислителя на критические режимы гетерогенного воспламенения и потухания частиц при учете теплообмена излучением / Проблемы пожарной безопасности. - Киев: МВС України, 1995. - С.83-86.
34. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Гануи И.Х., Прудникова Ю.В. Гистерезис горения движущейся частицы при протекании на ее поверхности параллельных реакций / Проблемы пожарной безопасности. - Киев: МВС України, 1995. - С.86-89.
35. Садковский В.И., Калинчак В.В. Аналитическое определение времени индукции и пределов воспламенения углеродных частиц с учетом параллельных химических реакций и теплопотерь излучением / Проблемы пожарной безопасности. - Киев: МВС України, 1995. - С.333-336.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бабий В.И., Кузнецов Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 206 с.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: термодинаміка, тепломасообмін, дисперсні системи, крапля, частинка, кінетика хімічних реакцій, спалахування, горіння, потухання, плавлення, випаровування, кипіння, гістерезис.

АННОТАЦИЯ

Калинчук В.В. "Высокотемпературный теплообмен, критические явления при фазовых и химических превращениях в дисперсных системах".

Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени доктора Физико-математических наук по специальности 01.04.14 - теплофизика и молекулярная физика, Одесский государственный университет им.И.И.Мечникова, Одесса, 1995.

В диссертации разработаны методики исследований, раскрыт механизм и проведено аналитическое описание высокотемпературных состояний, гистерезиса теплообмена, кинетики фазовых превращений (плавление, испарение) и химических реакций на поверхности движущихся частиц (капель) или в газовой фазе. Определена роль излучения, стефановского течения, кинетики параллельных химических реакций, внутреннего реагирования в процессах гетерогенного воспламенения, горения и потухания частиц. Разработаны в диссертации элементы теории и методики исследований являются важным вкладом в теплофизику химически реагирующих систем и практическую теорию горения.

ABSTRACT

Kalinchak V. V. The hightemperature heat and mass exchange, critical phenomena at phase and chemical transitions in dispersed systems.

The Thesis (manuscript) to obtain the scientific degree of Doctor of Science (Physics and Mathematics) on speciality 01.04.14 - thermal and molecular physics, the I. I. Mechnikov Odessa State University, Odessa, 1995.

In the Thesis the method of achivment, mechanism and to make an analytical description of hightemperature states, hysteresis of heat and mass exchange, kinetics of phase transition and chemical reactions on the surface of moving particles (drops) or in the gas phase have been developed. Role of the radiation, Stefan flow, internal reacting in the proceses of the heterogeneous inxtition, burning and extinction of the particles was determin.

Підписано до друку 7.12.95 р. Обсяг: 2 друк. арк.; 2,12 ум.-друк. арк.
Формат 60 × 84^{1/16}. Зам. 194. Тираж 30.

Друкарня УДАЗ ім. О. С. Попова. Одеса, Старопортофранківська, 61.

453324

AB 33.809

AB 33.809