

УДК 662.61

Калінчак В.В., Черненко О.С., Копійка О.К.
Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Україна
E-mail: teplophys@onu.edu.ua

Критичні умови займання частинок бору в хлорі

В даній роботі приводиться аналіз критичних умов займання і погасання частинок бору діаметром до 200 мкм в азотно-хлорній газовій суміші. Аналітичний опис проводиться в безрозмірній формі без використання розкладу Франк-Каменецького. Це дозволяє більш правильно описувати критичні умови погасання частинок. Для аналізу критичних умов використовується аналітичний підхід, що полягає в представленні шуканих залежностей у вигляді параметричних функцій. Показано, що в залежності від параметрів газового середовища (температура та частка хлору) наявні гістерезисні області, області займання та погасання та області безкризового режиму хлорування частинок бору.

Проводиться порівняння отриманих залежностей з експериментальними результатами. Їх задовільне узгодження дозволяє підтвердити кінетичні параметри реакції хлорування частинок бору, а саме енергія активації $E = 60$ кДж/моль і передекспоненційний множник $k_0 = 4$ м/с.

Ключові слова: частинки бору, хлорування, займання, погасання, виродження.

Вступ. Металеве паливо є привабливим для твердопаливних/гібридних ракетних двигунів і застосувань для перетворення енергії через їхню високу густину енергії. Порошок бору завдяки його високій питомій (58.30 МДж/кг) та об'ємній теплоті згоряння (136.44 кДж/см³) є одним із найперспективніших паливних кандидатів для багатого палива твердого палива. Однак, з точки зору застосування, аморфний бор має недоліки, пов'язані з високими температурами займання та неповним згорянням, що призводить до низької швидкості вивільнення енергії та ефективності. Таким чином, зростає інтерес до використання композиційних енергетичних матеріалів на основі бору [1-3].

Бор є недорогим, наявний у великій кількості та стабільний. Бор дуже безпечний, тому що його важко запалити. Однак оксидна оболонка та її домішки роблять бор ненадійним при займанні.

Одним із способів покращення горіння бору є використання суміші аморфного і кристалічного бору [4]. Авторами виявлено, що час затримки займання значно зменшується зі збільшенням частки аморфного бору.

Автори [5] показують, що частинки бору не можна легко запалити, оскільки тверде ядро з бору має оксидну оболонку, яка діє як захисне покриття, затримуючи або запобігаючи займанню та горінню. Вони показали, що різні порошки бору мають різний склад через різні домішки, такі як магній і алюміній та їх оксиди, які можуть або перешкоджати, або підвищувати ефективність горіння. Так домішки оксидів алюмінію та магнію зменшують випаровування оксиду бору і, таким чином, знижують активність займання бору. Навпаки, фторид магнію мав протилежний ефект. Він сприяє утворенню газоподібного фто-

риду бору при 1000 °С. Це сприяє випаровуванню та активації борного ядра приблизно при 1300 °С, що допомагає зменшити час затримки займання.

Фтор може атакувати та видаляти оксидне покриття. Це дозволило скоротити час займання і збільшити швидкість горіння [6-8].

Експериментальні дослідження займання дисперсного бору в фторі і алюмінію в хлорі свідчать про суттєве зниження температури займання цих елементів в порівнянні з відповідними температурами в кисневмісних середовищах. Такий результат можна пояснити високою хімічною активністю галогенів як окислювачів, а також тим, що в процесі реагування бора і алюмінію з галогенами утворюються газоподібні продукти реакції BF , BF_2 , BF_3 і AlCl_3 , для яких дифузійний опір значно менший, ніж для конденсованих продуктів реакцій окислення.

Реакція бору та хлору дає газоподібний продукт – трихлорид бору[9]. Це не перешкоджає накопичення конденсованих продуктів на поверхні частинок. Враховуючи цей факт і порівняно низьке значення енергії активації реакції хлору і бору, слід очікувати значного зниження вмісту кисневмісних середовищ. Температури займання одиничних частинок бору залежно від їх початкового розміру знаходяться в межах 700-1300 К. Проте, при випробуванні запалювання бору в хлорно-азотних сумішах спостерігався безкризовий режим реакції, при якому температура частинок при газифікації лише на 200-300 К вище, ніж у середовищі.

Трихлорид бору – це універсальна хімічна речовина, яку можна використовувати в багатьох галузях промисловості [10-11]. Він має різні застосування, наприклад, як вихідний матеріал для виробництва елементарного бору та відіграє важливу роль у процесах рафінування алюмінієвих, цинкових і мідних сплавів для видалення оксидів і нітридів із розплавленого металу.

Використання хлору в якості можливого інтенсифікатора займання бора потребує детального аналізу процесів реагування бора з хлором. Знання критичних умов займання поодиноких частинок бору і хлорі, спільно з експериментально визначеними кінетичними константами реакції бора з хлором, дозволяє оцінити рівень температур займання більш реального в практичному застосуванні порошку – завису частинок бору.

Метою даної роботи є встановлення критичних умов займання і погасання частинок бору в хлор-азотних газових сумішах.

Експериментальна установка. Залежності температури займання поодиноких частинок бору від їх початкового діаметру і об'ємної частки хлору визначали за допомогою експериментальної установки (рис.1а). Вона представляла собою тонку кварцову трубку 1 з внутрішнім діаметром 3 мм, довжиною 10 см і товщиною стінок 0.3 мм, яка нагрівалася ніхромовою спіраллю. Сферична частинка бора, розмір якої попередньо фіксувався під мікроскопом, поміщувалася всередині мікропечі безпосередньо під спаєм платино-родієвої термопари 2 з діаметром спаю 100 мкм. Відстань між спаєм термопари і частинкою зазвичай складало декілька діаметрів частинки. Процес займання спостерігався візу-

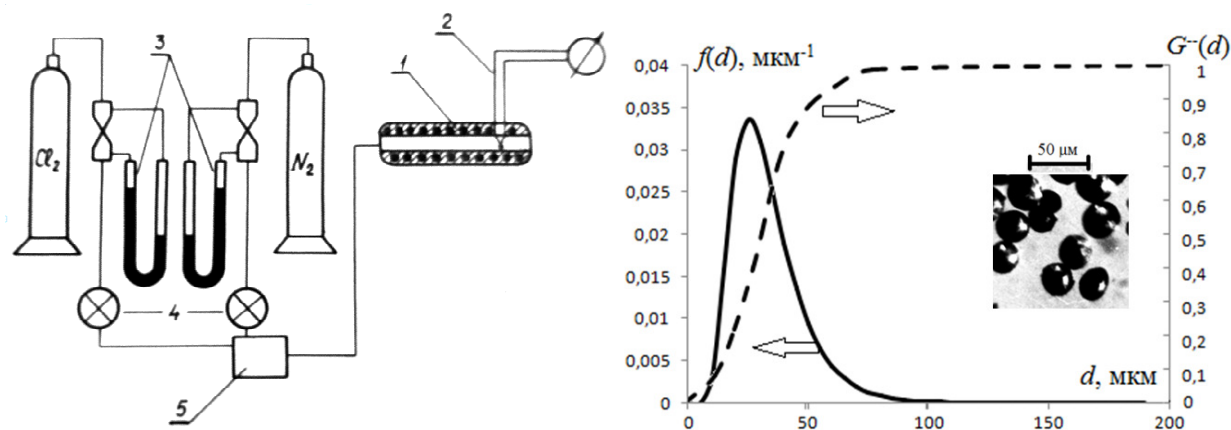


Рис 1. Схема експериментальної установки:

- а) для визначення температури займання: 1 – мікропіч, 2 – термопара, 3 – манометри, 4 – голчасті клапани, 5 – змішувач.
 б) інтегральний та диференціальний розподіл частинок бору та мікрофотографія проби порошку бору.

ально через оптичну систему (збільшення 60х). Установка дозволяла проводити досліди в діапазоні температур до 1400 К з частинками бору не менше 10 мкм.

Витрати газів, що поступають в реакційний об'єм мікропечі з балонів через змішувач 5, регулювався голчастими кранами 4 і вимірювалися по калібрувальним діафрагмам U-подібними манометрами з відносною похибкою в 5%. Маса витрата суміші газів підтримувалася у всіх дослідах сталою і рівною 10 мг/с (швидкість потоку в печі не перевищувала 15 см/с). Коефіцієнт Нуссельта Nu в даних умовах мало відрізнявся від 2.

Якщо при заданій температурі середовища займання частинки не спостерігалось, подача хлору в реакційний об'єм зупинявся. Температура всередині мікропечі підвищувалася на 5-10 °С і дослід повторювався. При наявності займання частинки фіксувалася температура середовища. При ній повторювалися досліди для 15-20 частинок одного і того ж розміру для визначення середнього значення температури займання з надійністю 0.95.

Дослідна установка і застосовані методики проведення експериментів дозволяли проводити вимірювання температур до 1400К з частинками бору не менше ніж 10 мкм. В дослідах використовувалися частинки сфероподібного кристалічного бору з попередньою плазмовою обробкою.

На рис. 1б представлено диференціальний та інтегральний розподіли наявних частинок бору по розмірам, а також характерна мікрофотографія проби.

Критичні умови займання і погасання поодиноких частинок. В процесі реагування бору з хлором на поверхні частинки при температурах до 2000 К утворюється газоподібний три хлорид бору BCl_3 . Тому для теоретичного опису процесу займання одинової частинки бору в хлорі можна застосувати підхід квазістаціонарної теорії гетерогенного займання [12].

В загальному випадку в наближенні квазістаціонарної концентрації та рівнодоступної поверхні умова стаціонарності температури при гетерогенній реакції має вигляд:

$$Q_{Cl} \rho_m Y_{Cl} \frac{k\beta}{k+\beta} = \alpha(T - T_\infty), \quad k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (1)$$

Тут Q_{Cl} – тепловий ефект реакції хлорування на одиницю маси, ρ_m – густина газової суміші, Y_{Cl} – масова частка хлору в газовій суміші, k – константа швидкості гетерогенної реакції, $\beta = D \cdot Sh / d$ – коефіцієнт масопереносу хлору в суміші, $\alpha = \lambda_m \cdot Nu / d$ – коефіцієнт теплопровідності газової суміші, E – енергія активації реакції, T_∞ – температура газової суміші в К.

Також необхідно знати залежності коефіцієнтів переносу, густини суміші від температури газової суміші і концентрації хлору. Так густина та теплопровідність газової суміші приймалися, як

$$\begin{aligned} \rho_m &= \rho_{Cl} X_{Cl} + \rho_{N_2} (1 - X_{Cl}) = \rho_{Cl} \xi_p, \\ 1 / \lambda_m &= 1 / \lambda_{Cl} \cdot X_{Cl} + 1 / \lambda_{N_2} (1 - X_{Cl}) = \xi_\lambda / \lambda_{Cl}, \\ \xi_p &= 1 - (1 - \rho_{N_2} / \rho_{Cl})(1 - X_{Cl}), \quad \xi_\lambda = 1 - (1 - \lambda_{Cl} / \lambda_{N_2})(1 - X_{Cl}). \end{aligned}$$

Тут X_{Cl} – об’ємна концентрація хлору в суміші. Причому $X_{Cl} \rho_{Cl} = Y_{Cl} \rho_m$.

Аналіз критичних умов зручно провести в безрозмірній формі []. Введемо наступні безрозмірні величини: $\theta = \frac{T}{T_E}$, $\theta_\infty = \frac{T_\infty}{T_E}$ – безрозмірні температури,

$$\theta_q = \frac{Q_{Cl} D \rho_m R}{\lambda_m E} = \frac{Q_{Cl} Le}{c_{pg} T_E} \xi_p \xi_\lambda - \text{теплотворність реакції}, \quad \delta = \frac{k_0}{D \cdot Sh} d - \text{безрозмірний}$$

діаметр, $T_E = E/R$ – активаційна температура, $Le = \frac{D c_{Cl} \rho_{Cl}}{\lambda_{Cl}}$ – число Льюїса для

хлору, яке практично не залежить від температури.

Тоді рівність (1) прийме вид:

$$\frac{1}{\frac{1}{\delta} \exp\left(\frac{1}{\theta}\right) + 1} = \frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_q Y_{Cl}} \quad \text{або} \quad \delta = \exp\left(\frac{1}{\theta}\right) \cdot \frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_q Y_{Cl} - (\theta - \theta_\infty)}. \quad (2)$$

На рис. 2 представлені залежності безрозмірного діаметру від стаціонарної температури. Видно, що на цих залежностях спостерігаються екстремуми. Максимум відповідає критичній умові займання (точки **i**), мінімуми – погасання (точки **e**) [12]. При заданій температурі газової суміші чи концентрації хлору діаметр погасання менший за критичний діаметр займання.

Критичні умови займання (індекс *i*) і погасання (індекс *e*) для гетерогенної екзотермічної реакції I-го порядку визначаються як умови втрати стійкості стаціонарних розв’язків системи і відповідають умові $\partial \delta / \partial \theta|_{i,e} = 0$:

$$1 - \frac{\theta^2}{\theta - \theta_\infty} = \frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_q Y_{Cl}} \quad \text{та} \quad \delta_{i,e} = \exp\left(\frac{1}{\theta}\right) \cdot \left(\frac{\theta - \theta_\infty}{\theta^2} - 1\right). \quad (3)$$

Система (2) – (3) відповідає умові дотику кривих тепловиділення і тепловідводу на діаграмі Семенова. Розв’язок рівняння (3) можна представити у вигляді:

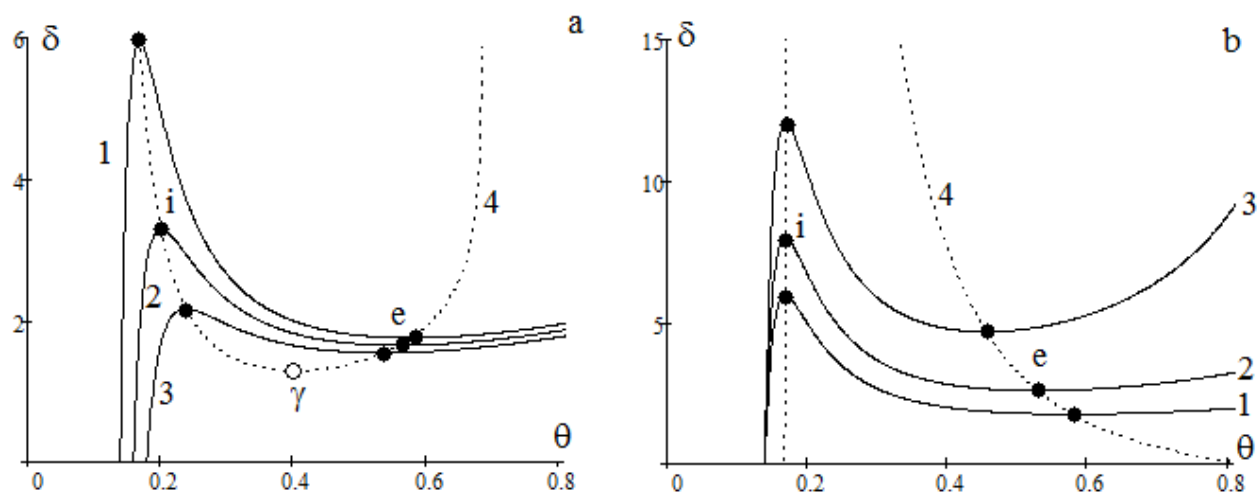


Рис. 2. Залежність безрозмірного діаметру частинки бору від стаціонарної температури:

а) при різних температурах хлору ($Y_{Cl} = 1$): $\theta_{\infty 1} = 0.14$, $\theta_{\infty 2} = 0.16$, $\theta_{\infty 3} = 0.18$.

б) при різних концентраціях бору в суміші ($\theta_{\infty} = 0.14$): $Y_{Cl,1} = 1$, $Y_{Cl,2} = 0.75$, $Y_{Cl,3} = 0.5$.

Криві 4 – критичні залежності.

$$\theta_{i,e} = \frac{1}{\theta_q Y_{Cl} + 1} \cdot \left[\theta_{\infty} + \frac{1}{2} \theta_q Y_{Cl} \left(1 \mp \sqrt{1 - 4\theta_{\infty} - 4 \frac{\theta_{\infty}^2}{\theta_q Y_{Cl}}} \right) \right]. \quad (4)$$

Знак « $\rightarrow$ » відповідає умові займання, « $\leftarrow$ » – погасання.

На рис. 3а представлена залежність $\theta_{i,e} = f(\theta_{\infty}, \delta)$ для трьох різних значень параметра θ_{∞} , що побудована по формулі (4). Видно, що температура погасання різко зростає при зменшенні параметра δ (пропорційний діаметру частинки). Це означає, що зрив процесу горіння більш дрібних частинок відбувається при більш високих температурах.

Дійсно, тепловий режим гетерогенної екзотермічної реакції визначається відношенням між константою швидкості хімічної реакції k і коефіцієнтом масопередачі β . Якщо швидкість дифузії реагуючого газу суттєво менша можливої швидкості хімічної реакції за даних умов ($\beta \ll k$), то такий режим називається дифузійним. Протилежний режим ($\beta \gg k$) називається кінетичним.

Оскільки $\beta \sim d^{-1}$, то зі зменшенням розміру частинок, зростає швидкість дифузії окисника до поверхні частинки, сумарний процес зміщується і кінетичну область і обмеження швидкості хімічної реакції буде відбуватися при більш високих температурах частинок. Відповідно, температури погасання дрібних частинок будуть більші, ніж у крупніших. Фізично процес погасання зв'язаний з тим, що із-за зменшення швидкості підводу окисника по поверхні частинки, при зменшенні розміру останньої, частина окисника не приймає участі в реакції, а тільки охолоджує реагуючу поверхню і в результаті відбувається зрив горіння.

Навпаки, збільшення розміру частинок (зростання параметру δ) викликає наближення процесу горіння до дифузійної області, і в випадку низькотемпературних процесів до їх займання.

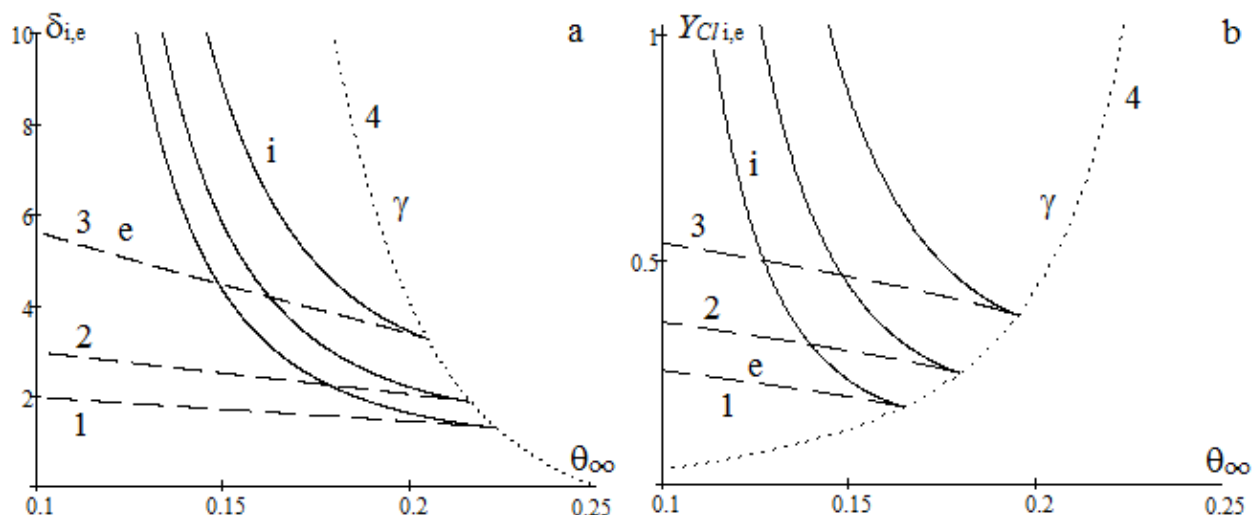


Рис. 3. Залежності:

а) безрозмірного критичного розміру частинки бору $\delta_{i,e}$ від безрозмірної температури хлор-азотної суміші θ_∞ при різних концентраціях хлору Y_{Cl} : 1) 1; 2) 0.75, 3) 0.5.

б) критичної концентрації хлору $Y_{Cl,i,e}$ від безрозмірної температури суміші θ_∞ для різних частинок з діаметром δ : 1) 20, 2) 10, 3) 5.

Криві 4 – криві виродження критичних умов.

Взаємозв'язок критичних значень дозволяє визначити межі теплових режимів реагування бору з хлором. Така інформація має велике практичне значення, оскільки ефективність застосування домішок металів до ракетних палив суттєво залежить від не тільки від потенціальних енергетичних можливостей, але і від умов, які реалізуються в камерах згорання.

На рис. 3b представлені залежності $\delta_{i,e} = f(\theta_\infty, Y_{Cl})$, що побудовані по параметричним залежностям (3) та (4). Як видно, величини $\delta_{i,e}$ доволі різко падає зі збільшенням як температури θ_∞ , так і концентрації хлору Y_{Cl} . Тобто збільшення значень θ_∞ і Y_{Cl} приводить до займання, а зниження до погасання.

Оскільки ефективна енергія активації утворення кінцевого продукту реакції BCl_3 порівняно низька, а, як наслідок, слабка температурна залежність швидкості тепловиділення то при певних зовнішніх умовах (початкова температура середовища, розмір частинок і концентрація хлору) може реалізуватися і безкризисний режим реагування бору з хлором.

Для знаходження області безкризисного процесу реагування визначимо умову співпадіння критичних умов займання і погасання, що відповідає умові дотику кривої тепловідводу і тепловиділення в точці перегину останньої. Цю умову можна отримати або з умови точки перегину $\partial \delta_{i,e} / \partial \theta = 0$ [12], або з рівності підкореневого виразу нулю в (4):

$$\theta_q \Big|_\gamma = \frac{4\theta_\infty^2}{1 - 4\theta_\infty} \quad \text{та} \quad \theta_\gamma = \frac{\theta_\infty}{1 - 2\theta_\infty}. \quad (5)$$

Підстановка (5) в рівність (3) дозволяє визначити критичне значення діаметру при виродженні умов займання та погасання:

$$\delta_{\gamma} = \frac{1}{e^2} \exp\left(\frac{1}{\theta_{\infty}}\right) \cdot (1 - 4\theta_{\infty}) \quad \text{або} \quad \delta_{\gamma} = \exp\left(\frac{1}{\theta_{\gamma}}\right) \cdot \frac{1 - 2\theta_{\gamma}}{1 + 2\theta_{\gamma}}. \quad (6)$$

Як видно з рис. 3b при фіксованому значенні концентрації хлору збільшення безрозмірної температури θ_{∞} і зменшення параметру δ (діаметр) приводить до зміщення процесу реагування з області, де критичні явища можливі в області без кризового протікання процесу горіння. Зменшення концентрації хлору суттєво обмежує область існування гістерезисного процесу (область між кривими займання і погасання) і збільшує ймовірність реалізації безкризового режиму реагування, який лімітується швидкістю хімічної реакції. Тобто безкризовий режим реагування найбільш можливий при малих Y_{Cl} , великих θ_{∞} і малих значеннях δ .

У випадку гістерезисного процесу при збільшенні початкової температури і концентрації хлору в середовищі відбувається стрибкоподібний перехід з нижнього стаціонарного режиму реагування (кінетичний режим) до верхнього (дифузійний режим), то для безкризового режиму характерна неперервна зміна температури частинки зі зміною зовнішніх умов.

Результати розрахунків і співставлення з експериментом. Для співставлення експериментальних даних по займанню частинок бора в хлорі з розрахунковими залежностями необхідно перейти до розмірних величин: діаметр частинки d , відносна об'ємна концентрація хлору X_{Cl} , температурагазової суміші T_{∞} . При розрахунках використовувалися наступні кінетичні параметри: $E = 60000$ Дж/моль, $k_0 = 4$ м/с, $D = 10 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\rho_{Cl} = 3.24$ кг/м³, $\rho_{N_2} = 1.29$ кг/м³, $\lambda_{Cl} = 7.44 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), $\lambda_{N_2} = 24.4 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), $c_{Cl} = 451$ Дж/(кг·К), $Q_{Cl} = 3.72 \cdot 10^6$ Дж/кгCl.

Розрахункова і експериментальна залежність температури займання поодиноких частинок бору в хлорі від початкового розміру частинок представлені на рис.4. Видно, що як по характеру, так і абсолютній величині теоретична залежність добре узгоджується з експериментальними даними. Температура займання бора зростає зі збільшенням розміру частинок, що пов'язано зі збільшенням тепловтрат з поверхні частинки і збігається з висновками теплової теорії гетерогенного займання.

Візуальні спостереження за займанням частинок бору вказують на гетерогенний характер процесу. Для частинок сферичної форми при займанні спостерігалось різке збільшення яскравості поверхні всієї частинки. Проведені дослід з частинками неправильної форми показали, що їх займання починається переважно на ділянках поверхні, що мають гострі виступи. В подальшому спостерігалось швидкий розвиток реакції по всій поверхні частинки і її плавлення.

В доброму узгодженні з експериментом знаходяться і розрахункові залежності температури займання частинок бору від початкової концентрації хлору в суміші хлор-азот (рис.3b). Різке збільшення температури займання бору зі збільшенням концентрації хлору в середовищі обумовлено порівняно невисоким значенням енергії активації процесу реагування бору з хлором.

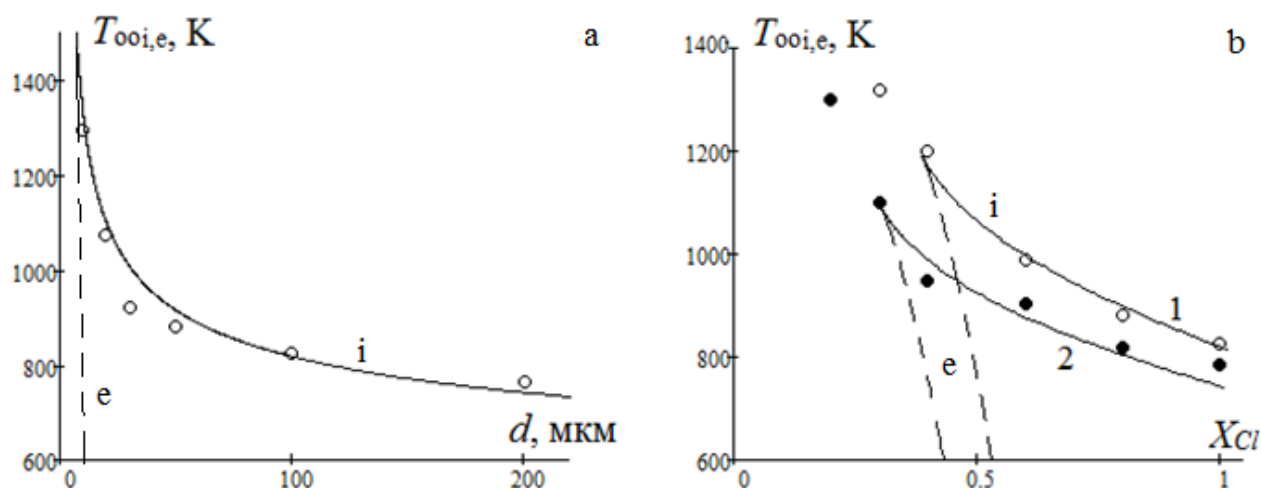


Рис. 4. Залежності критичної температури займання $T_{\infty i, e}$ від а) діаметру частинок бору (концентрація хлору $X_{Cl} = 1$) та б) об'ємної концентрації хлору (для частинок бору 1) 100 мкм і 2) 200 мкм).

Варто зазначити, що з огляду на слабку температурну залежність швидкості хімічної реакції, розрахункові критичні розігриви на межі займання частинок бору можуть досягати декількох сотень градусів. Це в 2-3 рази нижче відповідного рівня в кисневмісних середовищах. Крім того, це і підтверджує необхідність використання точної температурної залежності швидкості хімічної реакції, а не розкладом Франк-Каменецького [12].

Експериментально виявлено, що для частинок діаметром 20 мкм не спостерігається займання при об'ємних концентраціях хлору нижче 0.55, а для частинок діаметром 100 і 200 мкм граничними для займання є концентрації 0.3 і 0.2, відповідно.

Висновки. Проведений аналіз критичних умов займання і погасання поодиноких частинок бору в хлорі показав, що в залежності від зовнішніх умов при тепловому режимі реагування бора з хлором можливе протікання двох типів процесів: гістерезисного, коли існують критичні явища, і безкризового – критичні явища відсутні. Показано, що варто не використовувати розклад Франк-Каменецького для температурної залежності швидкості хімічної реакції.

Література:

1. Wei-Qiang Pang, Richard A. Yetter, Luigi T. DeLuca, Vladimir Zarko, Alon Gany, Xiao-Hong Zhang Boron-based composite energetic materials (B-CEMs): Preparation, combustion and applications // Progress in Energy and Combustion Science. Volume 93, November 2022, 101038 <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101038>
2. Adi Zamostianu, Yinon Yavor Burn rate of a novel boron-AN-water green solid propellant // FirePhysChem. – 2022. – Vol. 2, Issue 1. P. 76-82 <https://doi.org/10.1016/j.fpc.2022.02.002>
3. Liu, J., Liang, D., Xiao, J., Chen, B., Zhang, Y., Zhou, J., & Cen, K. Composition and characteristics of primary combustion products of boron-based propellants // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2017. – T. 53, №1. – P. 55–64. doi:10.1134/s0010508217010099

4. *W. Ao, J. H. Zhou, W. J. Yang, J. Z. Liu, Y. Wang & K. F. Cen* Ignition, combustion, and oxidation of mixtures of amorphous and crystalline boron powders // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2014. – Vol.50. – P. 664–669.
5. *Pivkina A., Meerov D., Monogarov K., Florov Y.* Prospects of Using Boron Powders As Fuel. II. Influence of Aluminum and Magnesium Additives and Their Compounds on the Thermal Behavior of Boron Oxide // *Combustion Explosion and Shock Waves*. – 2020. – T. 56, №2. – P. 148-155 DOI:10.1134/S0010508220020057
6. *Martin Spalding, Herman Krier and R. Burton* Chemical kinetics of boron combustion in high pressure Ar/F/O₂ mixtures // 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1998. <https://doi.org/10.2514/6.1998-3823>
7. *Herman Krier, R. L. Burton, M. J. Spalding and T. J. Rood* Ignition Dynamics of Boron Particles in a Shock Tube // *Journal of Propulsion and Power*. – 1998. – Vol. 14, №2. – P. 166. <https://doi.org/10.2514/2.5282>
8. *Yu, D., Kong, C., Zhuo, J., Li, S., & Yao, Q.* Oxidation characteristics of boron particles. // *Science China Technological Sciences*. – 2015. – T.58, №12. – P. 2016–2024. doi:10.1007/s11431-015-5841-0
9. *Golovko V.V., Kondratyev E.N., Polichuk D.I.* Ignition and combustion of boron in chlorine // *Combustion of Boron-Based solid propellants and solid fuels*. – 1993. – Vol. 2, Iss. 1-6. –P. 272-284. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v2.i1-6.150
10. *Handbook of Boron Science. With Applications in Organometallics, Catalysis, Materials and Medicine.* / Edited By: Narayan S Hosmane (Northern Illinois University, USA) and Robert Eagling. – 2018. – Vol. 1: Boron in Organometallic Chemistry <https://doi.org/10.1142/q0130-vol1>
11. *Handbook of Boron Science. With Applications in Organometallics, Catalysis, Materials and Medicine* / Edited By: Narayan S Hosmane (Northern Illinois University, USA) and Robert Eagling. – 2018. – Vol. 3: Boron in Materials Chemistry <https://doi.org/10.1142/q0130-vol3>
12. *Калінчак В.В. Черненко О.С.* Теплофізика горіння безполум'яного горіння газів (монографія). – Одеса. ОНУ ім. І. І. Мечникова. – 2020. – 200 с.

V.V. Kalinchak, A.S. Chernenko, O.K. Kopyka
Critical conditions for ignition of boron particles in chlorine

SUMMARY

This paper provides an analysis of ignition and extinction conditions of boron particles (with a diameter of up to 200 μm) in a nitrogen-chlorine gas mixture. The analytical description is carried out in a dimensionless form without using the Frank-Kamenetsky distribution. This makes it possible to more correctly describe extinction conditions of particle. An analytical approach is used to analyze critical conditions, which consists in founding dependencies in the form of parametric functions. It is shown that, depending on the parameters of the gas environment (temperature and proportion of chlorine), there are hysteresis areas, areas of ignition and extinction, and areas of the crisis-free chlorination mode of boron particles.

The obtained dependencies are compared with experimental results. Their satisfactory agreement allows us to confirm the kinetic parameters of the chlorination reaction of boron particles, namely the activation energy $E = 60$ kJ/mol and the pre-exponential factor $k_0 = 4$ m/s.

Key words: boron particles, chlorination, ignition, extinction, degeneration.