

В.О. Самарін, викладач, НУЦЗУ

ВПЛИВ УМОВ ТЕПЛОВОГО КОНТАКТУ НА ПРОЦЕС ЗАПАЛЕННЯ КОНДЕНСОВАНОЇ РЕЧОВИНИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЮ ЧАСТКОЮ

(представлено д-ром техн. наук Алексєєвим О.П.)

Представлено результати чисельного моделювання процесу запалювання конденсованої речовини одиночною нагрітою до високої температури часткою в умовах неідеального теплового контакту. Встановлено, що час затримки запалення збільшується в міру зростання частки шорсткості між часткою і конденсованою речовиною.

Ключові слова: конденсована речовина, неідеальний тепловий контакт, частка.

Постановка проблеми. При зберіганні вибухових речовин, порохів, твердих палив, боєприпасів на армійських складах можливі випадки виникнення локальних осередків пожежі. Одним з найбільш ймовірних варіантів розвитку пожежі по території складу, арсеналу або сховища є поширення нагрітих до високих температур часток - продуктів горіння як металів, так і неметалічних матеріалів, у результаті розтріскування палаючої деревини, диспергування, мікрОВИбухів або під дією вітру. При цьому нагріта до високих температур частка металу (неметалу) може відігравати роль локального джерела запалення порохів або твердих палив, що у загальному випадку прийнято називати конденсованими речовинами (КР).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] досліджені режими запалювання КР потоком газу з високою концентрацією часток, що мають самостійні значення, а в публікаціях [2, 3] виділені специфічні режими запалювання одиночною часткою. При цьому завжди розглядалося питання про умови контакту часток з поверхнею КР, так як з експериментів [1] випливало, що стан поверхні конденсованої речовини впливає на характеристики запалювання (наприклад, на час затримки запалення t_3).

Неідеальність контакту на границі "частка - КР" повинна приводити до зміни умов підведення тепла і, відповідно, величини питомого теплового потоку в зону запалювання, а отже, й часу затримки запалення.

У загальному випадку неідеальність контакту може бути наслідком шорсткості поверхні КР або частки, а також наявності на ній плівки матеріалу з низькою теплопровідністю, що відіграє роль теплоізолятора. Але масштаби впливу шорсткості в будь-якому випадку

істотно більше впливу ізолятора з КР, тому що на практиці частки найчастіше мають форму неправильних багатогранників. При осадженні таких багатогранників на поверхню КР завжди утворюються газові зазори різної конфігурації, що "ізолюють" частку від речовини.

У даній роботі розглядається задача, у якій неідеальність контакту інтерпретується шорсткістю частки, що моделюється газовим зазором визначених розмірів.

Мета роботи - чисельне дослідження впливу неідеальності контакту частки з КР на характеристики запалювання останньої.

Постановка завдання та його вирішення. Одиночна частка у формі диска в момент часу $t = 0$ випадає на поверхню КР. Початкова температура частки $T_{\text{ч}}$ набагато більше початкової температури КВ T_0 та температури середовища $T_{\text{г}}$, з якого випадає частка і яка оточує конденсовану речовину. При випаданні частка і поверхня КВ не деформуються, їх теплообмін із зовнішнім середовищем здійснюється за рахунок конвекції і випромінювання. Передбачається, що поверхня частки нерівна і контакт із КР неідеальний. Неідеальність контакту моделювалася так, як показано на рис. 1 (на деякій ділянці межі контакту частки з КР немає). В області 3 знаходиться повітря при атмосферному тиску і температурі $T_{\text{г}}$. Розглянутий варіант неідеального контакту досить типовий і відповідає випадку нерівного рельєфу межі частки.

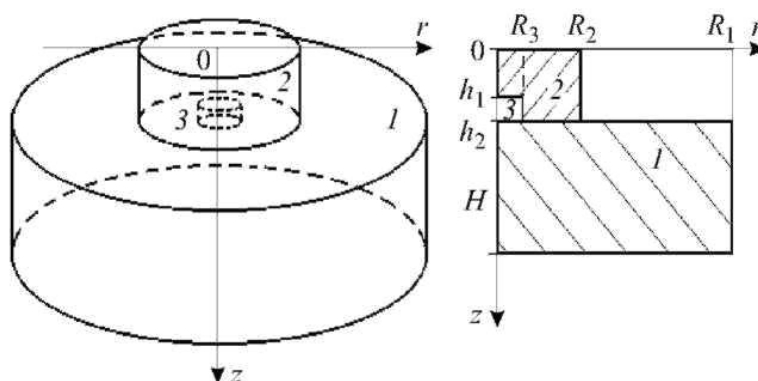


Рис. 1 – Схема розрахункової області

Задача в такій постановці зводиться до рішення системи трьох рівнянь теплопровідності для частки, зазору і КР з відповідними початковими і граничними умовами. Використано циліндричну систему координат, початок який зв'язаний з точкою, розташованою на межі «частка - зовнішнє середовище» на осі симетрії частки. В КР виділялася циліндрична область, що по своїх розмірах істотно перевищує розміри частки. На зовнішніх межах цієї області задавалися умови, що відповідали умовам збереження на цих межах початкової температури. На відкритій межі КР виставлялися граничні умови третього

роду, також як і на всіх межах частки з зовнішнім середовищем.

Система нестационарних рівнянь теплопровідності з нелінійними граничними умовами і відповідними до кожної області початковими умовами має вигляд:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + Q k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT_1}\right), \quad (1)$$

$$0 \leq r \leq R_1, h_1 + h_2 \leq z \leq H + h_1 + h_2;$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$0 \leq r \leq R_1, 0 \leq z \leq h_1, R_3 \leq r \leq R_2, h_1 \leq z \leq h_2;$$

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$0 \leq r \leq R_3, h_1 \leq z \leq h_1 + h_2.$$

де T – температура, К; c – питома теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; ρ – густина,

$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; t – час, с; r, z – циліндри-

чні координати; h_1 – висота частки до зазору, м; h_2 – висота зазору, м; H – висота циліндра, що виділяється в пластині КР; R_i – радіуси циліндрів, м, $i = 1, 2, 3$; індекси 1, 2 и 3 відповідають КР, частці і за-

зору, що заповнений газом, відповідно; E – енергія активації, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$

R – універсальна газова стала, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$; k_0 – передекспонент; Q – те-

пловий ефект реакції, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$.

При постановці задачі прийнято, що осі симетрії частки і циліндра, що виділяється в пластині КВ, збігаються.

Граничні й початкові умови для сформульованої задачі мають вигляд:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, h_1 + h_2, t)}{\partial z} = \alpha(T_r - T_1) + \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_1^4), \quad (4)$$

$$R_2 < r < R_1, 0 < t < t_3;$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, h_1 + h_2 + H, t)}{\partial z} = 0, 0 \leq r \leq R_1, 0 < t < t_3; \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, z, t)}{\partial r} = 0, \quad h_1 + h_2 \leq z \leq H + h_1 + h_2, \quad 0 < t < t_3; \quad (6)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, z, t)}{\partial r} = 0, \quad h_1 + h_2 \leq z \leq H + h_1 + h_2, \quad 0 < t < t_3; \quad (7)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, h_1 + h_2, t)}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(r, h_1 + h_2, t)}{\partial z},$$

$$T_1 = T_3, \quad 0 \leq r \leq R_3, \quad 0 < t < t_3; \quad (8)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, h_1 + h_2, t)}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_2(r, h_1 + h_2, t)}{\partial z},$$

$$T_1 = T_2, \quad R_3 \leq r \leq R_2, \quad 0 < t < t_3; \quad (9)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(0, z, t)}{\partial r} = 0, \quad h_1 \leq z \leq h_1 + h_2, \quad 0 < t < t_3; \quad (10)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_3, z, t)}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(R_3, z, t)}{\partial r},$$

$$T_2 = T_3, \quad h_1 \leq z \leq h_1 + h_2, \quad 0 < t < t_3; \quad (11)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, h_1, t)}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(r, h_1, t)}{\partial z},$$

$$T_2 = T_3, \quad 0 \leq r \leq R_3, \quad 0 < t < t_3; \quad (12)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, 0, t)}{\partial z} = \alpha(T_r - T_2) + \varepsilon\sigma(T_r^4 - T_2^4),$$

$$0 \leq r \leq R_2, \quad 0 < t < t_3; \quad (13)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(0, z, t)}{\partial r} = 0, \quad 0 \leq z \leq h_1, \quad 0 < t < t_3; \quad (14)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_2, z, t)}{\partial r} = \alpha(T_r - T_2) + \varepsilon\sigma(T_r^4 - T_2^4),$$

$$0 \leq z \leq h_1 + h_2, \quad 0 < t < t_3; \quad (15)$$

$$T_2(r, z, 0) = T_3(r, z, 0) = T_4, \quad 0 < r < R_2, \quad 0 \leq z \leq h_1 + h_2; \quad (16)$$

$$T_1(r, z, 0) = T_0, \quad 0 < r < R_1, \quad h_1 + h_2 \leq z \leq H + h_1 + h_2, \quad (17)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі на всіх відкритих ділянках поверхні частки і КР, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; σ - стала Стефана-Больцмана, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; T_r - температура зовнішнього газового потоку, К; $T_ч$ — температура частки в початковий момент часу, К; ε - приведений ступінь чорноти; T_0 - температура КР у початковий момент часу, К.

Сформульовану нелінійну межову задачу вирішимо методом кінцевих різниць.

Чисельний аналіз проведемо на прикладі частки алюмінію, що
 Вплив умов теплового контакту на процес запалення конденсованої речовини високотемпературною часткою

випадає з повітря на поверхню порошу «Н» [4] при наступних характеристиках матеріалів, параметрах частки й умовах теплообміну:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 0,2352 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; c_1 = 1470 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \rho_1 = 1600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\ \lambda_2 &= 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; c_1 = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \rho_1 = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\ E &= 147000 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}; Qk_0 = 1,6464 \cdot 10^{23} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}; \\ T_0 &= 300 \text{ К}; \varepsilon = 0,5; \alpha = 300 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.\end{aligned}$$

Критичні умови запалення в розглянутій задачі можна записати в безрозмірному вигляді [5]:

$$\delta_{\text{кр}} = \delta_{\text{кр}}^* \left[1 + \frac{(\theta_{\text{н}} - 3)^2 b}{30k_{\lambda}^{2/3}(1 + 3b^{2/3})} \right], \quad (18)$$

де $\delta_{\text{кр}}^* = 0,4b[\theta_{\text{н}} - 2,25]^2 [1 + 0,5\beta\theta_{\text{н}}]$;

$$k_{\lambda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}; b = \frac{c_2\rho_2}{c_1\rho_1}; \theta_{\text{н}} = \frac{E}{RT_{\text{ч}}^4}(T_{\text{ч}} - T_0);$$

$$\beta = \frac{RT_{\text{ч}}}{E}; \delta = R_2 \left[\frac{Qk_0}{\lambda_2} \frac{E}{RT_{\text{ч}}^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_{\text{ч}}}\right) \right]^{1/2},$$

де $\delta, \delta_{\text{кр}}, k_{\lambda}, b, \theta_{\text{н}}, \beta$ - безрозмірні параметри.

Якщо розмір осередка $\delta > \delta_{\text{кр}}$ [5], то відбувається запалення. Розрахунки, проведені для часток різних розмірів, показали, що в розглянутому випадку при $T_{\text{ч}} = 600 \text{ К}$ запалювання має місце при $\delta_{\text{кр}} = 173,65$, а при $T_{\text{ч}} = 800 \text{ К}$ $\delta_{\text{кр}} = 124,873$.

Гранична умова запалення має вигляд [2]:

$$q(t_3) = Qk_0 \int_0^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{E}{RT(z, t_3)}\right] - \exp\left[-\frac{E}{RT_0}\right] \right\} dz, \quad (19)$$

де q - тепловий потік від частки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; z - координата (відстань від поверхні КР), м; t_3 - час затримки запалювання, с.

Особливістю даної задачі є те, що теплофізичні характеристики матеріалів і повітря на межі розділення областей 1, 2, 3 стрибкоподі-

бно змінюються. Крім того, на межах розділу двох областей у початковий момент часу температура також змінюється стрибкоподібно.

На рис. 2 наведені залежності часу затримки запалення від початкової температури частки для різних характерних розмірів і умов ідеального контакту. Зі зростанням розмірів частки величина t_3 зменшується при фіксованому значенні $T_{ч}$. Криві $t_3(T_{ч})$ побудовані до мінімальних значень, за яких ще можливе запалення.

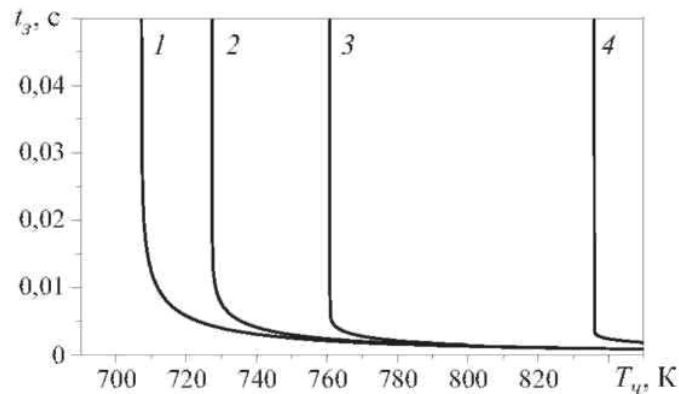


Рис. 2 – Час затримки запалення КВ при ідеальному контакті з часткою різного радіуса: 1 - $R_2 = 200$ мкм, 2 – 150 мкм, 3 – 100 мкм, 4 – 50 мкм

Аналогічні залежності наведені на рис. 3 для умов неідеального контакту, що відповідають схемі на рис. 1. Результати представлені для різних розмірів області повітряного зазору. Наявність зазору між часткою і КР з низьким коефіцієнтом теплопровідності приводить при інших ідентичних умовах до збільшення часу затримки запалення в порівнянні з варіантом, коли контакт на границі розділу "частка - КР" ідеальний. Зі зростанням площі зазору величина $T_{ч}$, за якої ще можливе запалення, також збільшується при інших незмінних умовах. Даний результат можна пояснити в такий спосіб.

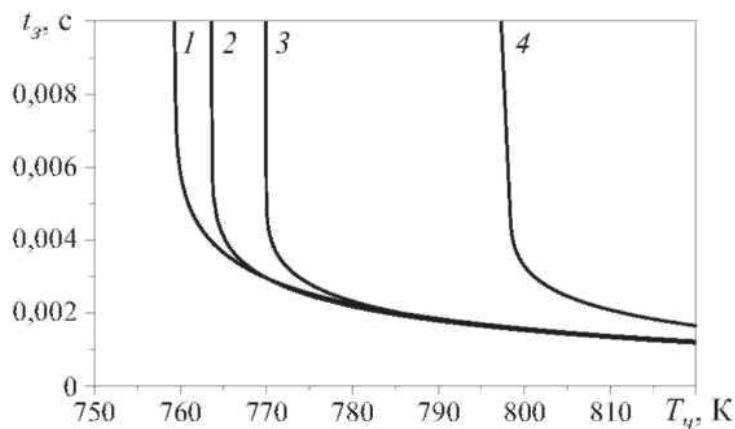


Рис. 3 – Час затримки запалення КВ при неідеальному контакті з час-

ткою радіуса 100 мкм із різними жорсткостями 1 - $R_3 = 0$ мк, 2 - 20 мк, 3 - 50 мк, 4 - 70 мк

Чисельний аналіз показує, що максимальна температура в зоні контакту T_k досягається на осі симетрії частки (рис. 4) в умовах ідеального контакту. При цьому по мере збільшення r (віддалення від осі симетрії) знижується температура й відповідно збільшується час затримки запалення. Розрахунок величини теплового потоку q у зону запалювання свідчить, що ця величина досягає максимуму на осі симетрії в умовах ідеального контакту. Отже, можна зробити висновок, що в розглянутій системі «частка – КР» має місце істотно неоднорідний теплоперенос, обумовлений тепловідведенням від частки в КР по напрямку як координати z , так і координати r . Крім того, частка також охолоджується за рахунок тепловідведення в зовнішнє середовище по двох координатних напрямках.

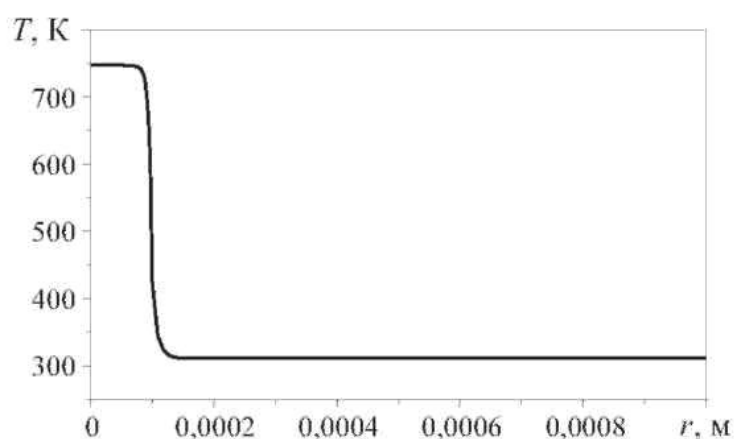


Рис. 4 – Розподіл T по осі при неідеальному контакті КР с часткою в момент запалення КР

У цих умовах наявність зазору, що представляє собою зону з істотно більш низькою в порівнянні з будь-яким металом (зокрема, з алюмінієм) теплопровідністю, призводить до того, що частка передає енергію КР через площадку з істотно меншою поверхнею. А так як умови теплообміну в зоні контакту КР і безпосередньо частки сприятливі в порівнянні із зазором або зовнішнім середовищем, то на всій ділянці контакту сумарна величина q зменшується в порівнянні з варіантом, коли зазор відсутній. Зменшення величини теплового потоку в зону запалювання і призводить до збільшення t_3 в порівнянні з варіантом ідеального контакту.

Аналізуючи отримані результати, робимо висновок, що час затримки запалення визначається в першу чергу теплоємністю частки. Так, частка великих розмірів і, відповідно, більшої об'ємної теплоємності, має великий запас тепла. І зі збільшенням розмірів частки зменшується час t_3 в умовах як ідеального (рис. 2), так і неідеального (рис. 3)

контактів. При цьому зменшення площі контакту (при збереженні незмінним об'ємного тепловмісту частки) спричиняє збільшення t_3 .

Існує мінімальна площа контакту, за якої ще можливе запалення КР при визначеному рівні теплового потоку в зону запалювання. Зі збільшенням q ця площа зменшується при постійних значеннях t_3 (рис. 3). Величина теплового потоку визначається як температурою частки, так й її теплопровідністю. Часткове зменшення коефіцієнта теплопровідності λ при постійній температурі та теплоємності призводить до різкого росту значень температур, за яких запалення КВ можливе.

Таким чином, найкращим локальним джерелом запалення буде частка матеріалу з високими тепломісткістю і теплопровідністю. Для того, щоб нагріта до високих температур частка виконувала роль локального джерела запалення, необхідно, щоб вона забезпечувала мінімально необхідну величину теплового імпульсу в КР. Величина цього імпульсу визначає глибину прогріву КР і температуру в кожній точці прогрітого шару, останні ж характеризують інтенсивність твердофазної реакції запалення[4-5]. Відповідно, площа контакту частки й КР, що забезпечує запалення, має свій мінімум(рис. 3), при якому запалення стає неможливим навіть при високій тепломісткості частки. Перетікання енергії по координаті r в конденсованій речовині знижує температуру прогрітого шару, обмеженого по радіальному напрямку. Запалення КР буде неможливим, якщо тепловиділення через зону контакту з часткою не буде перевищувати протягом деякого необхідного проміжку часу тепловідведення у холодні шари КР по напрямках координат r и z .

Висновки. Проведене чисельне дослідження процесу запалення типової КР нагрітою до високих температур часткою в рамках моделі, що враховує двомірний теплоперенос в умовах неідеального теплового контакту. Аналіз результатів показав, що збільшення площі шорсткості призводить до зростання часу затримки запалення КР при інших адекватних параметрах процесу.

На підставі отриманої інформації можна прогнозувати можливість запалення КВ за рахунок передачі тепла нагрітими до високих температур твердими частками при наявності шорсткості на поверхні частки або КР, що при влученні на поверхню КР створюють місцеві центри запалення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Барзыкин В.В. Зажигание конденсированных веществ дисперсным потоком. / Барзыкин В.В., Гольдшлегер У. И., Мержанов А.Г. // Докл. АН СССР. – М.: АН СССР, 1970. - Т. 191, № 1. - С. 111-114.

2. Кузнецов Г.В. Воспламенение конденсированного вещества

частицей в условиях неидеального теплового контакта. / Кузнецов Г.В., Таратушкина Г.В. // Пожаровзрывобезопасность. – М.: Пожнаука, 2005. - №6. - С. 16-20.

3. Кузнецов Г.В. Зажигание конденсированного вещества частицей. / Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Таратушкина Г.В. // Химическая физика. – М.: Наука, 2004. - Т. 23, № 3. - С. 67-72.

4. Вилунов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ. – Новосибирск, Наука, Сибирское отд., 1984. – 183 с.

5. Аверсон А.Э. Приближенный метод решения задач тепловой теории зажигания. / Аверсон А.Э., Барзыкин В.В., Мержанов А.Г. // Докл. АН СССР. – М.: АН СССР, 1968. - Т. 178, № 1. - С. 131-134.

nuczu.edu.ua

В.А. Самарин

Влияние условий теплового контакта на процесс воспламенения конденсированного вещества высокотемпературной частицей

Представлены результаты численного моделирования процесса зажигания конденсированного вещества одиночной нагретой до высокой температуры частицей в условиях неидеального теплового контакта. Установлено, что время задержки воспламенения увеличивается по мере роста доли шероховатости между частицей и конденсированным веществом.

Ключевые слова: конденсированное вещество, неидеальный тепловой контакт, частица.

V.O. Samarin

Influence of thermal contact conditions to the process of ignition of condensed matter by particle that heated to high temperature

The results of numerical simulation of the ignition process of condensed matter by single heated to high temperature particle in a non-ideal thermal contact are presented. It is established that the ignition delay time increases as the proportion of surface roughness between the particle and condensed matter increase.

Keywords: condensed matter, non-ideal thermal contact, the particle.