

*Євгеній Кириченко (ORCID: 0000-0001-7638-0722)
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОУДАРНИХ ДІЙ НА ПІРОТЕХНІЧНІ МЕТАЛОКСИДНІ ВИРОБИ В УМОВАХ ПОСТРІЛУ ТА ПОЛЬОТУ

Розроблено математичну модель зовнішніх термоударних дій надзвукового потоку повітря на металеві оболонки зарядів піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, що враховує температурні залежності їх теплофізичних властивостей та дозволяє з відносною похибкою 7...9 % розраховувати розподіли теплового потоку з приграничного шару вздовж поверхні оболонок та температури по їх товщині. Розроблено науково-обґрунтований метод визначення критичних параметрів ударних термодій (швидкостей обдуву потоком повітря, часів його дії, критерію Рейнольдса, що характеризує режим обтікання (ламінарний, турбулентний)), контролюючи які шляхом регулювання технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, діаметра заряду та матеріалу оболонки) можна попереджати передчасні пожежовибухонебезпечні руйнування виробів в умовах їх запусків.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні суміші, процеси теплопровідності, газодинаміки, займання та горіння частинок металів.

Постановка проблеми. З кожним роком умови застосування піротехнічних виробів з зарядами ущільнених сумішей з порошків металевих палих (магнію, алюмінію, алюмінієво-магнієвих сплавів, титану, цирконію та ін.) та кисневмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів, оксидів металів та ін.) різного призначення (спалахувачів для освітлювальних патронів, снарядів та трасерів, запалювальних засобів, ІЧ-випромінювачів та ін.) постійно посилюються (підвищені швидкості обдуву потоком повітря до $2 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$ м/с, зовнішні тиски за ударною хвилею до $10^6 \dots 10^7$ Па та ін.) [1 – 11]. При цьому в Україні та у всьому світі зростає кількість передчасних вибухонебезпечних спрацьовувань виробів при їх запусках як з нерухомих об'єктів, так й з об'єктів, що рухаються з надзвуковими швидкостями (більше $5 \dots 7 \cdot 10^2$ м/с) [12 – 20].

Аналіз вказаних випадків показує, що займанню та подальшому пожежовибухонебезпечному руйнуванню виробів передують зовнішні ударні термічні дії на їх металеві корпуси в умовах пострілу та польоту. Це призводить до передчасного займання та вибухонебезпечного розвитку горіння сумішей, що входять у склад виробів, та подальших пожежонебезпечних їх руйнувань (рис. 1).

Тому важливе практичне значення має попередження вимушених передчасних пожежонебезпечних руйнувань виробів у випадку впливу зовнішніх ударних термічних дій. При цьому вони повинні ґрунтуватись на науково-обґрунтованих методах визначення критичних значень параметрів ударних термічних дій на вироби (наприклад, швидкості обдуву потоком повітря або швидкості пострілу при запуску виробу, часу його дії та ін.), перевищення яких призводить до передчасних пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. На даний момент вказані дослідження для виробів на основі зарядів сумішей з порошків Mg, Al, Ti та Zr з нітратовмісними окиснювачами (NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$) достатньо повно представлено у роботах [21 – 28]. Були отримані наступні результати, які знайшли практичне застосування у вигляді технологічних рекомендацій та засобів контролю: розроблено математичні моделі для визначення температури поверхні корпусів виробів в умовах надзвукового обдуву потоком повітря для різних режимів обтікання [21 – 23]; проведено дослідження та визначено залежності температури займання частинок металевих палих у продуктах розкладання окиснювачів від їх дисперсності, співвідношення компонентів у суміші та зовнішнього тиску [24 – 26]; на основі зіставлення значень вказаних температур між собою (наприклад, з умови $T_n > T_3$, де T_n , T_3 – відповідно температура поверхні заряду суміші та температура займання частинок металів) була розроблена методика визначення критичних значень швидкостей обдуву потоком повітря V^* , часів його дії t^* для різних режимів обтікання (ламінарний, турбулентний) [27 – 29].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Що стосується металооксидних виробів на основі сумішей вказаних металевих палих з оксидами металів, то такі дослідження нині відсутні.

Постановка задачі та її розв'язання. Метою даної роботи є встановлення основних закономірностей нагрівання надзвуковим потоком ущільнених сумішей з порошків Mg, Al та оксидів металів (CuO, Cu₂O, Sb₂O₃, NiO), що призводить до їх займання та вибухонебезпечного розвитку горіння як основи для попередження пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів на їх основі у випадку ударних зовнішніх термодій.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Як зразки сумішей, що розглядаються, використовувались ущільнені двокомпонентні суміші з стандартних промислових порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, які виготовлялись по технології, прийнятій у піротехнічному виробництві [8, 9].

Зразки сумішей одержували різними видами ущільнюючого формування, головним чином, пресуванням [2 – 4]. Це необхідно для отримання заданої густини спресованого зразка. При цьому коефіцієнт ущільнення $K_v = \frac{\rho_c}{\rho_{\max}}$ (ρ_c – густина зразка (досягнута), ρ_{\max} – максимально можлива густина зразка) для зразків, що розглядаються, складає 0,96...0,98, тобто зразки сумішей, що використовуються, мали практично граничні допустимі значення K_v і були газонепроникними [6, 8]. Для дослідження впливу обдуву потоком повітря на процес займання та розвитку горіння зразків сумішей порошки компонентів пресувались у металеві оболонки діаметром $3 \cdot 10^{-2}$ м та товщиною $2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Для забезпечення стійких режимів горіння зразків сумішей висоти запресовок при вказаних діаметрах складали $h = 3 \dots 4 \cdot 10^{-2}$ м.

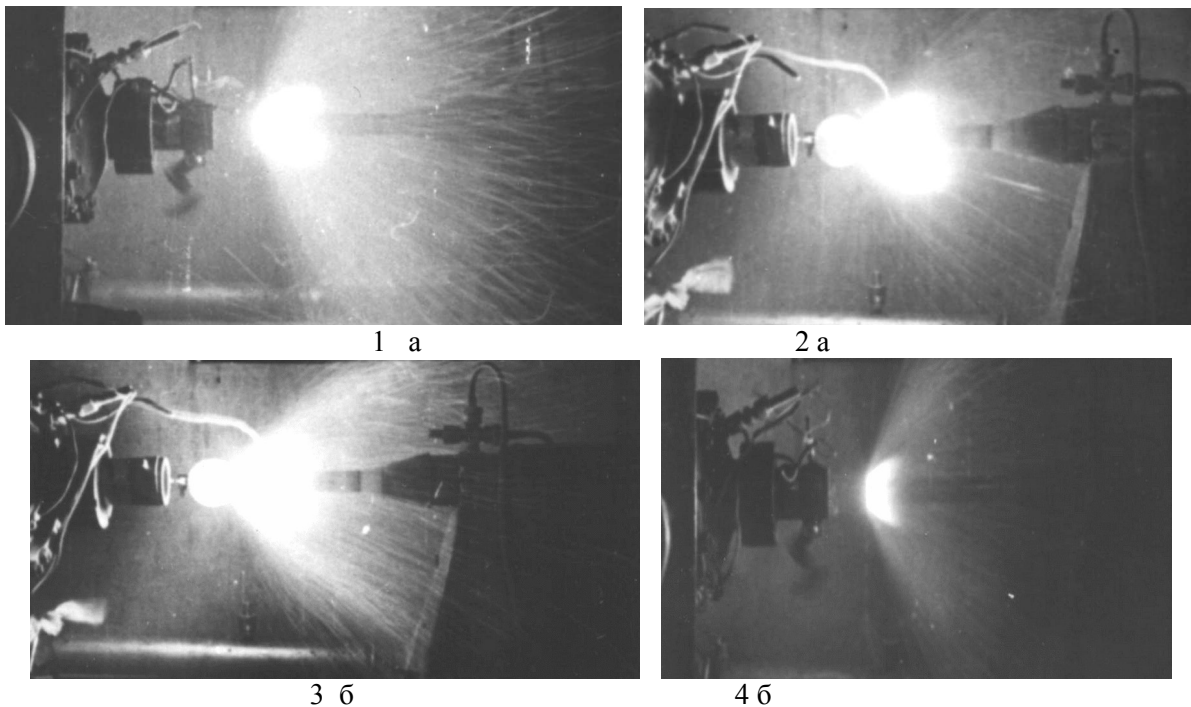


Рисунок 1 – Кінокадри загальної картини передчасних пожежовибухонебезпечних руйнувань освітлювальних (а) та запалювальних (б) виробів в умовах надзвукового обдуву потоком повітря зі швидкостями до $2 \dots 2,5 \cdot 10^3$ м/с: 1, 3 – суміші з надлишком металевого пального; 2, 4 – суміші з надлишком окиснювача; випробування проводились на стандартному піротехнічному обладнанні, що моделює умови запуску виробів [8, 9].

Як матеріали металевих оболонок виробів використовувались стандартна сталь 12Х18Н10Т, мідь та ін., для яких відомі емпіричні температурні залежності об'ємної теплоємності $C_v(T)$ та коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$ (відносна похибка 4...5 %) [9].

Для проведення досліджень використовувались відомі методи математичного моделювання та чисельно-аналітичні методи рішення диференціальних рівнянь газодинаміки та теплопровідності з використанням стандартних пакетів прикладних програм [8, 9]. Для моделювання впливу зовнішніх ударних термічних дій на металеві корпуси виробів з зарядами сумішей в умовах їх запуску та польоту використовувалось стандартне піротехнічне обладнання, що забезпечує надзвуковий обдув потоком повітря випробувальних виробів зі швидкістю до $2 \dots 3 \cdot 10^3$ м/с, докладний опис якого міститься у роботах [21, 23].

Математичне моделювання ударних термічних дій надзвукового потоку повітря на циліндричні оболонки зарядів сумішей. Одним з критеріїв, що оцінює аеродинамічне нагрівання й прогнозує зони найбільш сильного термовпливу на поверхні оболонки заряду суміші, можна розглядати розподіл

температури на його поверхні при нульових кутах атаки й ковзання, тобто при поздовжньому обтіканні потоком повітря із заданими швидкостями й висотами польоту, режимами обтікання й ін. [30, 31]. При нульових кутах атаки й ковзання, які можна реалізувати на практиці відповідними програмами польоту виробів, їхнє нагрівання піддається розрахунку як для ламінарного, так і для турбулентного режимів обтікання виробу газовими потоками.

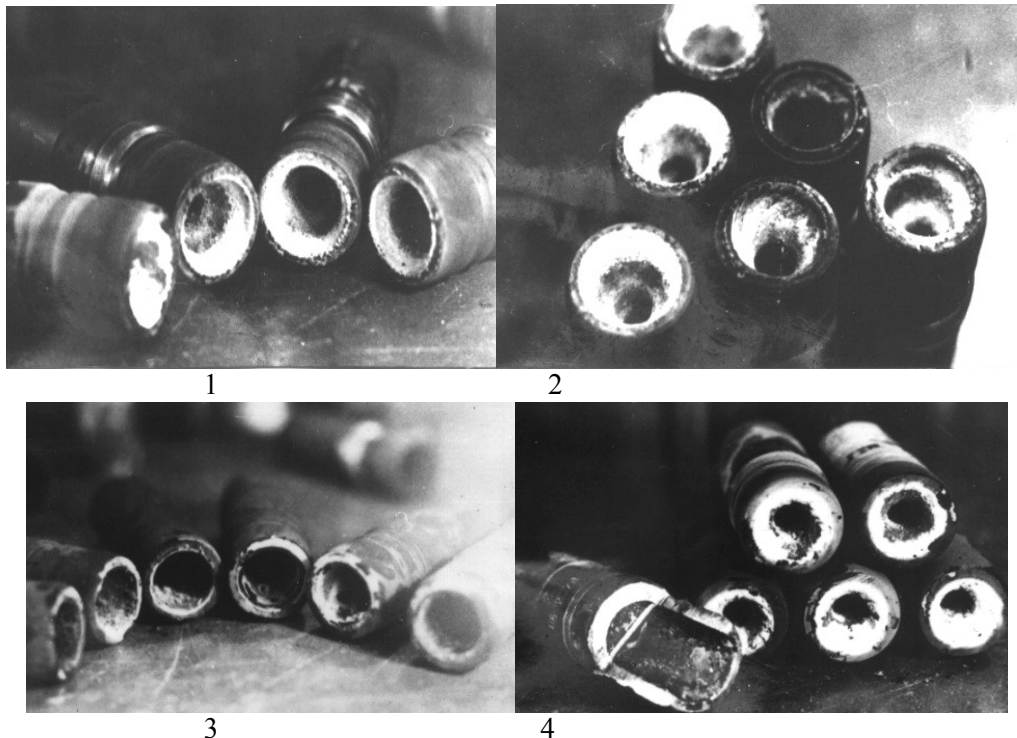


Рисунок 2 – Різні ракурси серійних виробів з ПЧ-приладами наведення та спостереження після їх руйнування в умовах надзвукового обдуву потоком повітря (швидкість V , час дії t): 1 – $V = 10^3$ м/с, $t = 12$ с; 2 – $V = 1,2 \cdot 10^3$ м/с, $t = 10$ с; 3 – $V = 1,5 \cdot 10^3$ м/с, $t = 7$ с; 4 – $V = 2 \cdot 10^3$ м/с, $t = 5$ с.

Крім цього, для досліджуваних розмірів оболонки при надзвуковому обдуві зі швидкостями V ($V > 7 \cdot 10^2 \dots 10^3$ м/с) реалізується по всій її довжині, в основному, турбулентний режим обтікання, тому що значення критерію Рейнольдса в цьому випадку $Re > 10^5$ [31]. Ламінарний режим реалізується тільки у окремих випадках (при невеликих радіусах оболонки й помірних швидкостях обдуву), коли $Re < 10^5$.

Нині відсутня закінчена теорія турбулентного теплообміну, тому замість розв'язання класичної контактної задачі аеродинамічного нагрівання оболонки, що розглядається, використовується напівемпіричний підхід, похибка якого, як показують існуючі застосування цього підходу, лежить у межах 9...12 % [9].

Згідно з цим підходом, на першому етапі розв'язується зовнішня газодинамічна задача обтікання на базі експериментальних даних продувки тіл різної геометричної форми (плоскі й вісесиметричні тіла) в аеродинамічних трубах [30, 31] та знаходиться тепловий потік q_{n2} з приграничного шару, що залежить від швидкості польоту виробу, режиму обтікання (ламінарний, турбулентний) і змінюється уздовж обтічної поверхні.

На другому етапі розв'язується внутрішня задача нагріву оболонки товщини $H = r_2 - r_1$ при заданому зовнішньому тепловому потоці q_{n2} (рис. 3).

Визначення теплового потоку з приграничного шару на поверхню оболонки. Для визначення розподілу на поверхні оболонки теплового потоку з приграничного шару в залежності від режиму обтікання. Скористаємось відомими газодинамічними співвідношеннями [9, 31].

Газодинамічну задачу будемо розглядати як квазістаціонарну, що справедливо для більшості практичних випадків, за винятком імпульсних режимів [30, 31]. Це обумовлено тим, що об'ємна теплоємність газового потоку (C_{v2}) мала порівняно з об'ємною теплоємністю матеріалу оболонки (C_{v0}), тобто $C_{v2} / C_{v0} \ll 1$ [31]. Припускаючи також, що газовий потік є нестисливим (справедливо для $V < 2 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$ м/с), для теплового потоку $q_{n2} = const$ з приграничного шару (нульові кути атаки й ковзання) маємо такий вираз [8, 30]:

$$q_{n2}^{\square} = \frac{f(Pr)}{\left(\frac{\rho_{\delta} \cdot V_{\delta} \cdot x}{\mu_{\delta}}\right)^{1/5}} \cdot \rho_{\delta} \cdot V_{\delta} \cdot C_p \cdot (T_r - T_n) \quad (1)$$

де $f(Pr)$ – задана функція числа Прандтля Pr , що залежить від геометричної форми тіла й режиму обтікання ($Pr = C_p \cdot \mu / \lambda_{\delta}$; ρ , V , μ , C_p , λ_{δ} – відповідно густина, швидкість уздовж координати x , коефіцієнт динамічної в'язкості, теплоємність і коефіцієнт теплопровідності газового потоку; T_n – температура поверхні оболонки; індекс “ δ ” – умови на зовнішній межі прикордонного шару; T_r – температура відновлення у приграничному шарі, яка є температурою повітря в безпосередній близькості до поверхні оболонки).

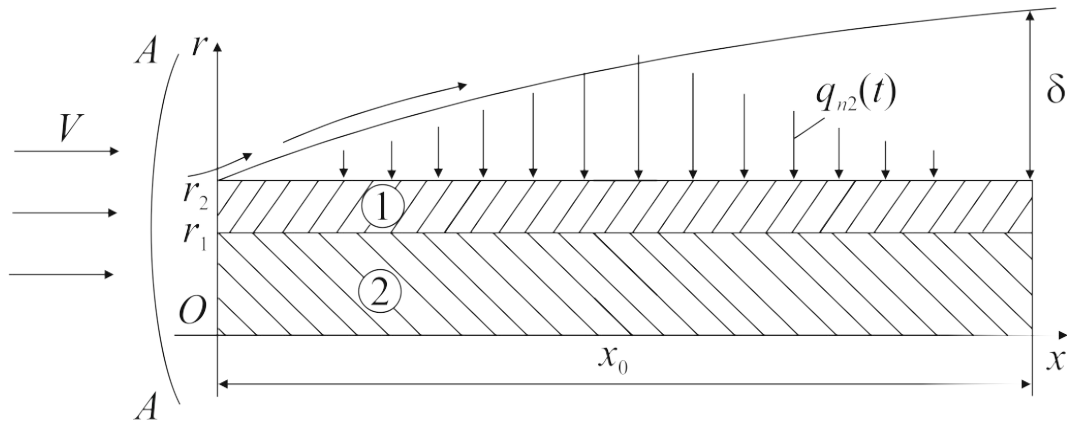


Рисунок 3 – Схема термоударного поверхневого нагрівання циліндричної оболонки надзвуковим потоком повітря: 1 – оболонка; r_1 , r_2 – внутрішній та зовнішній радіуси оболонки відповідно; 2 – заряд суміші; AA – фронт ударної хвилі; V – швидкість набігаючого потоку; δ – товщина динамічного приграничного шару; $q_{n2}(t)$ – тепловий потік, що надходить з приграничного шару на поверхню оболонки; x_0 – довжина оболонки ($x_0 \gg r_2 - r_1$ – товщина оболонки).

Підставляючи в (1) відомі газодинамічні співвідношення [31], одержуємо такий вираз для теплового потоку у випадку турбулентного режиму обтікання:

$$q_{n2}(x, V) = \frac{0,001}{Pr^{0,6}} \cdot \left(\frac{\beta \cdot x_0}{V}\right)^{\frac{4}{5}} \cdot \left(\frac{v}{V \cdot x_0}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot \left(\frac{\rho_{\delta}}{\rho_{\square}}\right)^{\frac{4}{5}} \cdot \left(\frac{\mu_{\delta}}{\mu_{\square}}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot \rho \cdot V \cdot C_p \cdot (T_r - T_n) \cdot \left(\frac{x}{x_0}\right)^{\frac{3}{5}}, \quad (2)$$

де $v = \frac{\mu}{\rho}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості газового потоку; β – функція тільки числа v незбуреного потоку перед ударною хвилею [31].

Аналогічно для ламінарного режиму обтікання оболонки (для нульових кутів атаки та ковзання) тепловий потік можна представити у вигляді

$$q_{n2}(x, V) = \frac{0,05}{Pr^{0,4}} \cdot \left(\frac{\beta \cdot x_0}{V}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{v}{V \cdot x_0}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho_{\delta}}{\rho_{\square}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\mu_{\delta}}{\mu_{\square}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \rho \cdot V \cdot C_p \cdot (T_r - T_n). \quad (3)$$

За отриманими формулами (2), (3) з використанням стандартного програмного забезпечення [9] були проведені розрахунки розподілів теплового потоку з приграничного шару уздовж поверхні оболонки в залежності від різних умов експлуатації піротехнічних виробів (рис. 4, 5).

З результатів розрахунків, представлених на рис. 4, 5, випливає, що місця розташування максимальних значень теплового потоку $(q_{n2})_{max}$ на поверхні оболонки істотно залежать від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення $(q_{n2})_{max}$ знаходяться поблизу передньої критичної точки ($x = 0$, $V = 0$) оболонки; для турбулентного режиму обтікання значення $(q_{n2})_{max}$ вже зміщуються від $x = 0$ до x_{max} . При цьому зі збільшенням швидкості обдуву потоком повітря від $V = 7 \cdot 10^2$ м/с до $V = 1,2 \cdot 10^3$ м/с значення $(q_{n2})_{max}$ зростають від $0,3 \cdot 10^7$ Вт/м² до $6,2 \cdot 10^7$ Вт/м²

(турбулентний режим обтікання) і від $0,5 \cdot 10^7$ Вт/м² до $3,5 \cdot 10^7$ Вт/м² (ламіна́рний режим обтікання). Щодо значень x_{max} , то для ламіна́рного режиму обтікання $x_{max} \cong 0$ незалежно від V . При турбулентному режимі обтікання (для досліджуваного діапазону зміни $V = 7 \cdot 10^2 \dots 1,2 \cdot 10^3$ м/с) x_{max} знаходиться у межах $(0,35 \dots 0,47) \cdot x_0$ (наприклад, для $x_0 = 0,1$ м значення $x_{max} = 0,035 \dots 0,047$ м), тобто суттєво не змінюється, що повністю відповідає експериментальним даним, отриманим на вказаному піротехнічному обладнанні (рис. 5).

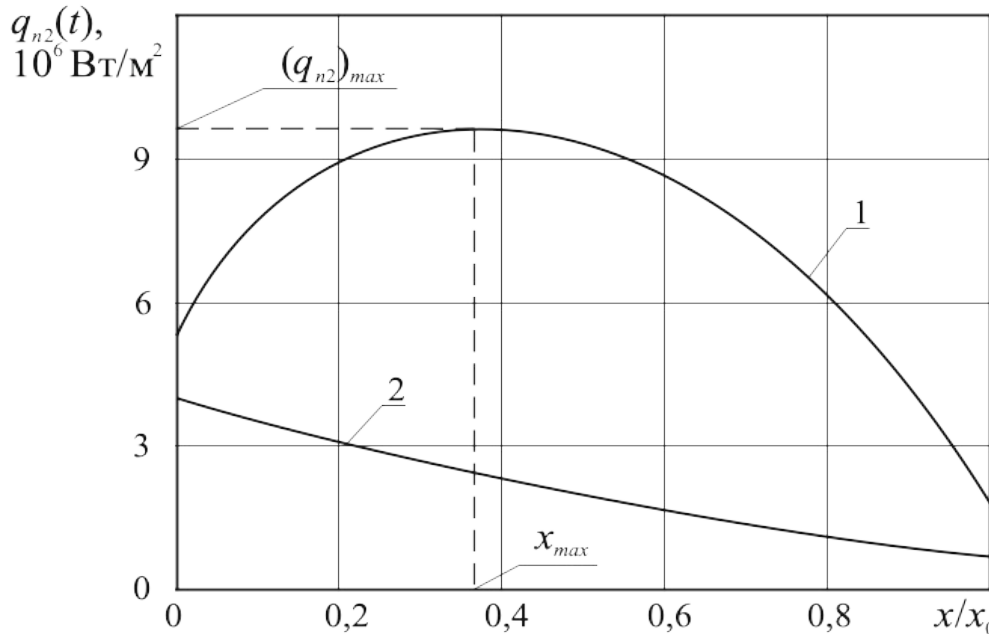


Рисунок 4 – Розподіл теплового потоку q_{n2} вздовж поверхні оболонки при надзвуковому обдуві потоком повітря ($T_0 = 300$ К; $x_0 = 0,1$ м; $V = 1,2 \cdot 10^3$ м/с): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламіна́рний режим обтікання; x_{max} – місце розташування на поверхні оболонки максимальних значень теплового потоку $(q_{n2})_{max}$.

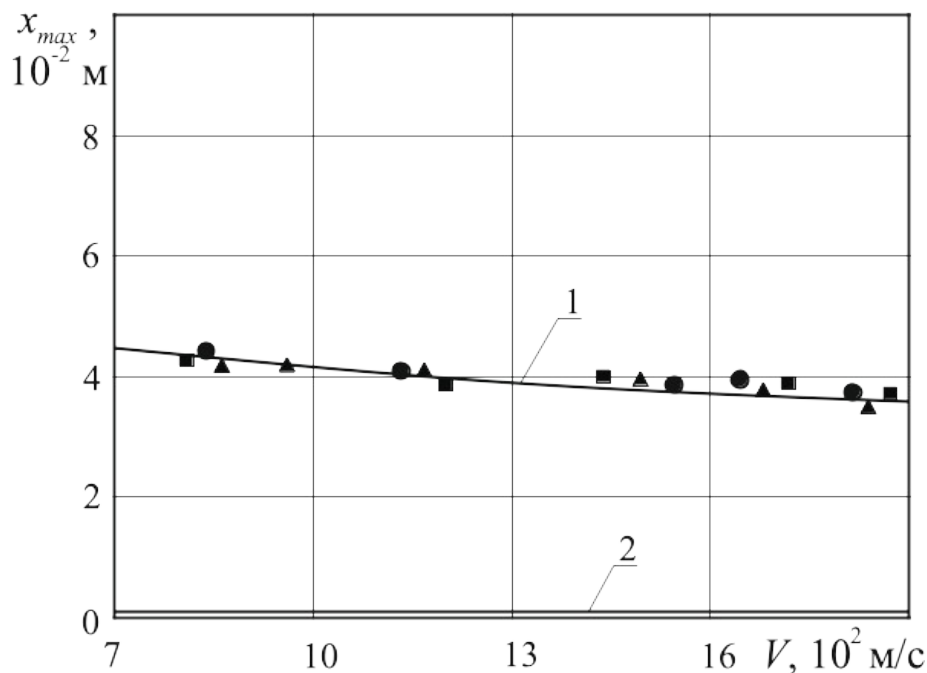


Рисунок 5 – Залежність місця розташування на поверхні оболонки $(q_{n2})_{max}$ від швидкості її надзвукового обдуву потоком повітря ($T_0 = 300$ К, $x_0 = 0,1$ м): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламіна́рний режим обтікання; ■, ▲, ● – результати отриманих експериментальних даних.

Температурне поле оболонки. При розгляді задачі нагріву оболонки зовнішнім надзвуковим потоком повітря, враховується, що на її поверхню з приграничного шару надходить розглянутий

вище тепловий потік q_{n2} (див. рис. 3). Передбачається, що $\frac{\partial T}{\partial r} \neq 0$, $\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$, а $\Delta r = r_2 - r_1$,

$\delta = 2(a_0^2 \cdot \tau)^{\frac{1}{2}}$ (δ – глибина проникнення теплової хвилі; a_0^2 – коефіцієнт температуропровідності; τ – час теплової дії). Крім цього, розглядується область у напрямку x , де $q_{n2} = (q_{n2})_{\max}$, тобто оцінюється зміна температури у зонах максимальних зовнішніх термічних дій, що відповідає за передчасне займання зарядів сумішей та пожежовибухонебезпечно руйнування виробів.

Таким чином, в області максимальних термонавантажень поверхні оболонки розглядається наступна нелінійна задача теплопровідності [32]:

$$C_v(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} [\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r}] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda(T) \cdot T], \quad t > 0, \quad r_1 < r < r_2, \quad (4)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (5)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = (q_{n2})_{\max}, \quad (6)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = 0. \quad (7)$$

Для розв'язування сформульованої задачі (4) – (7) використовуючи стандартний метод інтегральних перетворень Фур'є [33], отримуємо:

$$T(r, t) = \left\{ T_0^{\alpha+1} + \frac{(q_{n2})_{\max} \cdot (\alpha+1) \cdot r_2}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left(\frac{2a_0^2 \cdot t}{r_2^2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2}\right) - \frac{r_1^2}{r_2^2} \cdot \left(\ln \frac{r}{r_1} + \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{3}{4} \right) \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \cdot \frac{I_1(\mu_n \cdot \frac{r_1}{r_2}) \cdot I_1(\mu_n)}{I_1^2(\mu_n \cdot \frac{r_1}{r_2}) - I_1^2(\mu_n)} \cdot \left(I_0(\mu_n \cdot \frac{r}{r_2}) \cdot Y_1(\mu_n \cdot \frac{r_1}{r_2}) - Y_0(\mu_n \cdot \frac{r}{r_2}) \cdot I_1(\mu_n \cdot \frac{r_1}{r_2}) \right) \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{r_2}\right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha+1}}, \quad (8)$$

де I_0, I_1, Y_1, Y_0 – функції Беселя [33]; α, λ_0 – емпіричні константи [8, 9].

Для проведення розрахунків по формулі (8) було використано стандартне програмне забезпечення у вигляді пакетів прикладних програм по сучасним чисельним методам [8, 9]. Результати розрахунків для різних швидкостей обдуву потоком повітря, режимів обтікання та матеріалів оболонки представлено на рис. 6 – 9.

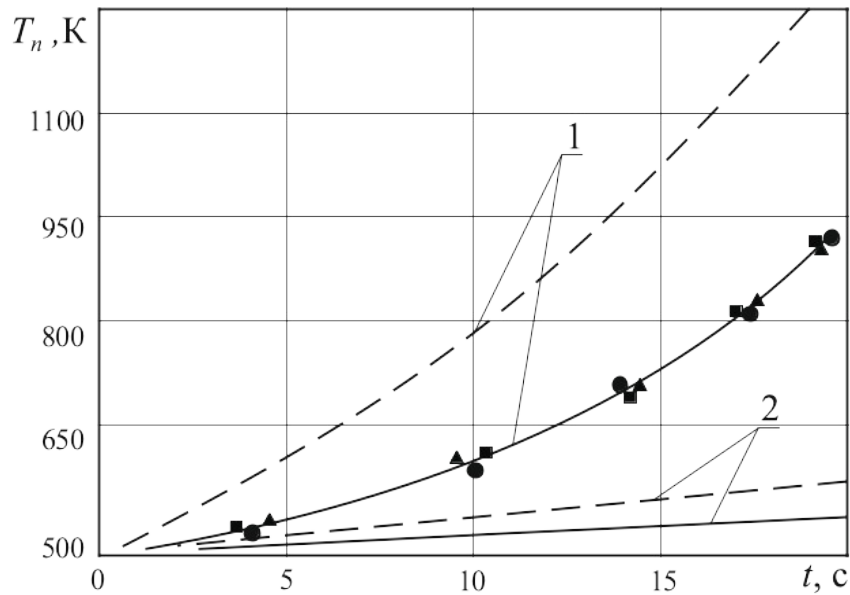


Рисунок 6 – Залежність температури поверхні оболонки від часу теплової дії зовнішнього надзвукового потоку повітря ($T_0 = 300$ К; $r_2 - r_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; оболонка металева (сталь 12Х18Н10Т [9])): 1 – $V = 2 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $V = 10^3$ м/с; ———— – ламінарний режим обтікання; - - - - - турбулентний режим обтікання; ■, ●, ▲ – отримані експериментальні дані (ламінарний режим обтікання, передня критична точка ($x = 0$)).

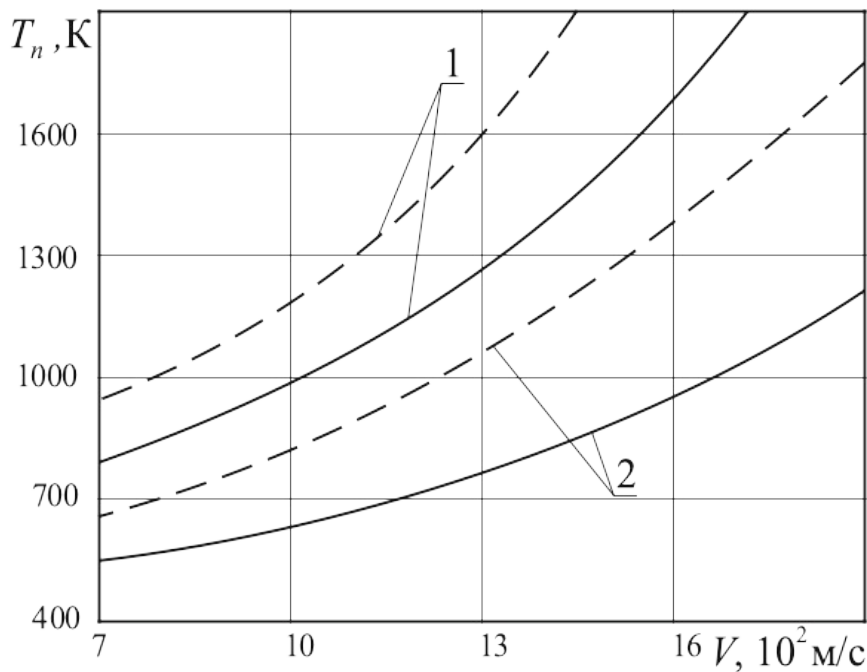


Рисунок 7 – Залежність температури поверхні оболонки від швидкості надзвукового потоку повітря ($T_0 = 300$ К; $r_2 - r_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; $t = 5$ с): 1 – оболонка мідна; 2 – оболонка сталева (сталь 12Х18Н10Т [9]); ———— – ламінарний режим обтікання; - - - - - турбулентний режим обтікання.

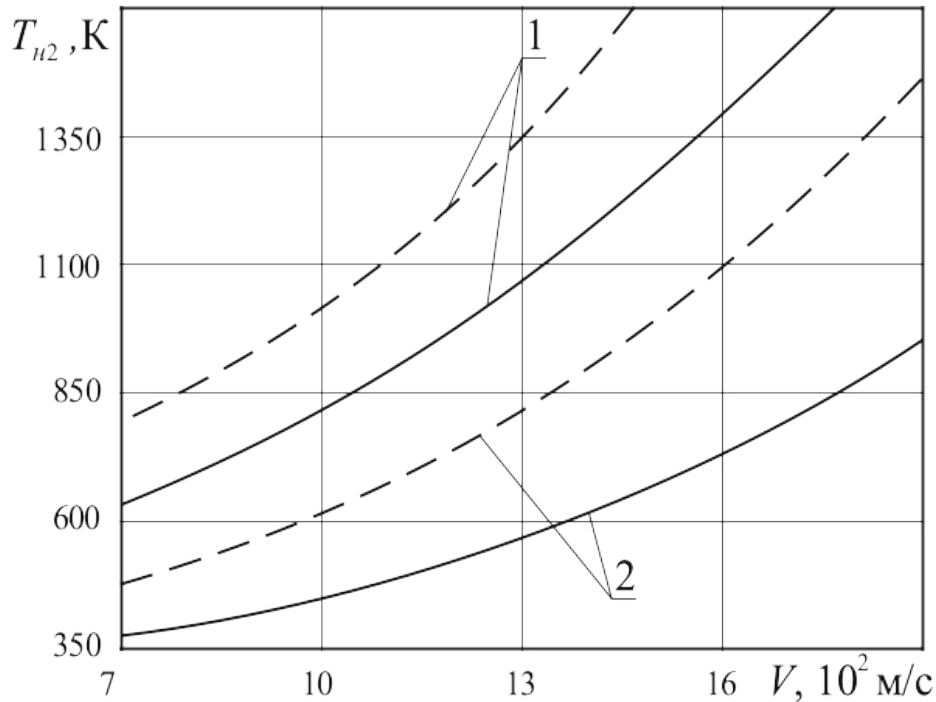


Рисунок 8 – Залежність температури внутрішньої поверхні оболонки від швидкості надзвукового потоку повітря ($T_0 = 300$ К; $r_2 - r_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; $t = 5$ с): 1 – оболонка мідна; 2 – оболонка сталева (сталь 12Х18Н10Т [9]); ———— – ламінарний режим обтікання; - - - - - турбулентний режим обтікання.

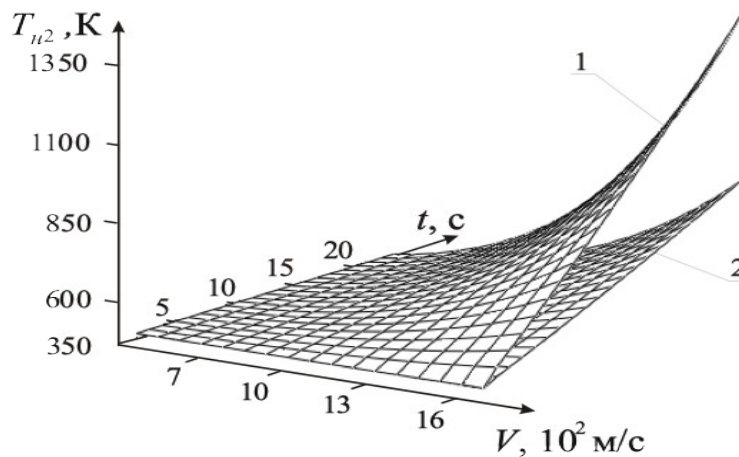


Рисунок 9 – Тривимірне зображення залежностей температури внутрішньої поверхні оболонки від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря та часу його дії ($T_0 = 300$ К; $r_2 - r_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; оболонка металева (сталь 12Х18Н10Т [9])): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання.

З результатів розрахунків, представлених на рис. 6 – 9, випливає, що температура у зонах максимальних термічних впливів істотно залежить від швидкості обдуву потоком повітря та режиму обтікання: наприклад, для часів зовнішньої термічної дії $t = 7 \dots 12$ с при збільшенні швидкості обдуву від $V = 7 \cdot 10^2$ м/с до $V = 1,2 \cdot 10^3$ м/с значення температури на поверхні оболонки зростають у 2,5...3,2 рази для ламінарного режиму обтікання та у 4,3...5,5 рази – для турбулентного режиму обтікання; при цьому для внутрішнього боку оболонки вказані зростання температури знижуються відповідно для ламінарного режиму обтікання до 1,8...2,4 рази, а для турбулентного режиму обтікання – до 2,7...3,5 рази. Крім

цього збільшення часу зовнішньої термічної дії призводить у всіх випадків тільки до зростання температури у будь-якій точці по товщині оболонки. Заміна матеріалу оболонки на більш теплопровідний (наприклад, заміна сталеві оболонки на мідну) призводить до зростання її температури у 1,5...2,3 рази для усіх досліджуваних швидкостей обдуву потоком повітря та режимів обтікання.

Таким чином, температура у зонах максимальних зовнішніх термічних дій надзвукового потоку повітря на поверхні оболонки (аналогічно й для її внутрішнього боку) у випадку турбулентного режиму обтікання значно переважає її значення для випадку ламінарного режиму обтікання незалежно від теплопровідності матеріалу оболонки.

Визначення критичних значень параметрів зовнішніх ударних термічних дій, перевищення яких призводить до передчасного термічного розкладання оксидів металів, процесів займання та вибухонебезпечного розвитку горіння частинок магнію та алюмінію, пожежонебезпечних руйнувань виробів. В якості пожежовибухонебезпечних термодій на поверхню металевих корпусів виробів з зарядами сумішей в умовах пострілу та польоту приймаються дії, що мають критичні значення швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря (V_j^* , $j = 1, 2, \dots$) та часів його теплового впливу (τ_j^* , $j = 1, 2, \dots$), значення критерію Рейнольдса (Re^* , при $Re > Re^*$ – режим обтікання турбулентний, а при $Re < Re^*$ – ламінарний)), при яких температури внутрішніх поверхонь корпусів виробів (оболонки, що контактують з зарядами сумішей) задовольняють наступним умовам:

$$T_{n_2} > T_3^{(i)}, i=1, 2, \dots \quad (9)$$

де T_{n_2} – температура внутрішньої поверхні оболонки; $T_3^{(i)}$ – температура, при якій починається саморозігрів заряду сумішей в результаті процесу екзотермічного окиснення металевих частинок в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача (так звана температура займання частинок металів в активних газоподібних продуктах [3, 6], яка залежить, як від технологічних параметрів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності), так й від зовнішніх чинників (температури нагріву, зовнішнього тиску)); при цьому індекс “i” вказує на суміш, для якої відомий діапазон зміни параметра T_3 при заданих значеннях технологічних параметрів та зовнішніх умов [8, 9].

Далі порівнюючи отримані вище діапазони зміни температури T_{n_2} з діапазонами зміни температур $T_3^{(i)}$, можна встановити конкретні значення параметрів, що розглядаються, V_j^* ($j = 1, 2, \dots$) та τ_j^* ($j = 1, 2, \dots$), починаючи з яких температура T_{n_2} починає перевищувати $T_3^{(i)}$ (рис. 10, 11), звідки випливає, що пожежонебезпечні термодії на поверхню заряду суміші є основною причиною прискорення процесу його горіння, передчасного спрацьовування виробу та його вибухонебезпечного руйнування (табл. 1). Тому важливо на стадії проектування та стендових випробувань виробів, що моделюють вказані зовнішні ударні термодії, вміти прогнозувати критичні значення параметрів зовнішніх термодій, а також технологічних параметрів, що характеризують заряд суміші та суттєво впливають на температуру займання частинок металів в газоподібних продуктах розкладання окиснювача, перевищення яких призводить до передчасного пожежовибухонебезпечного спрацьовування виробів. При цьому збільшення T_3 (наприклад, за рахунок використання більш дрібнодисперсних металевих порошків та окиснювачів з меншим вмістом кисню) може призводити до зростання критичних часів спрацьовування піротехнічних виробів в умовах вимушених зовнішніх термодій у декілька разів, тобто регулюючи технологічні параметри зарядів сумішей на стадії їх виготовлення можна у декілька разів підвищувати час для гасіння пожежі, що виникла, наприклад, при запуску виробу, протипожежними засобами, що є в наявності.

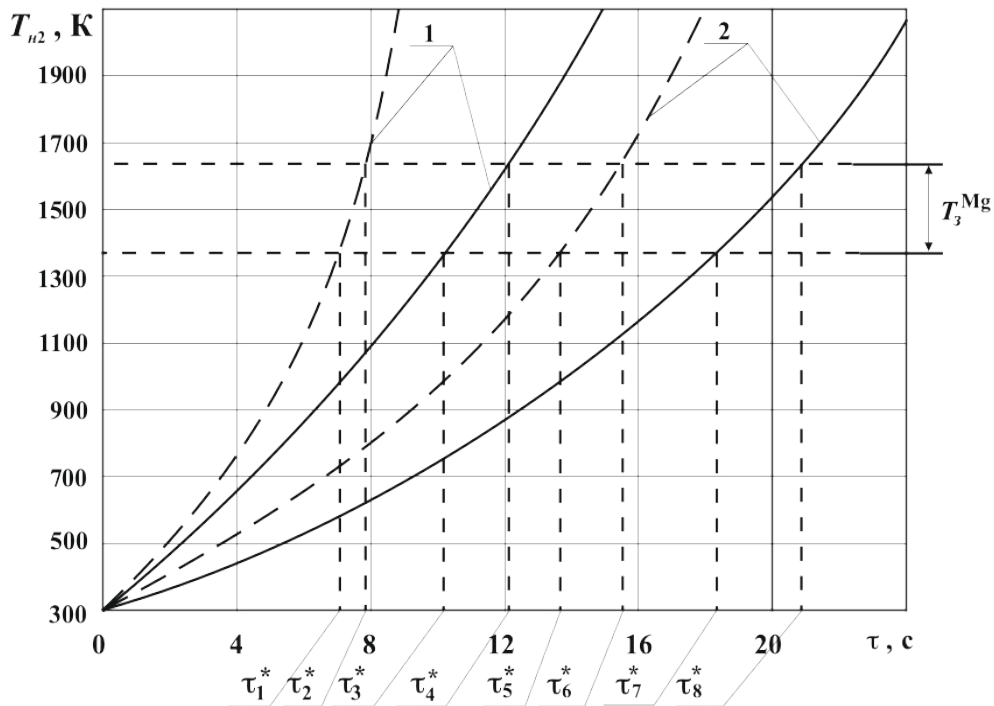


Рисунок 10 – Значення V_j^* та τ_j^* для заряду суміші Mg + CuO з оболонкою з різних матеріалів: 1 – $V_1^* = 1,9 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $V_2^* = 8 \cdot 10^2$ м/с; ——— оболонка сталева (сталь 12X18H10T [9]); - - - - - оболонка латунна.

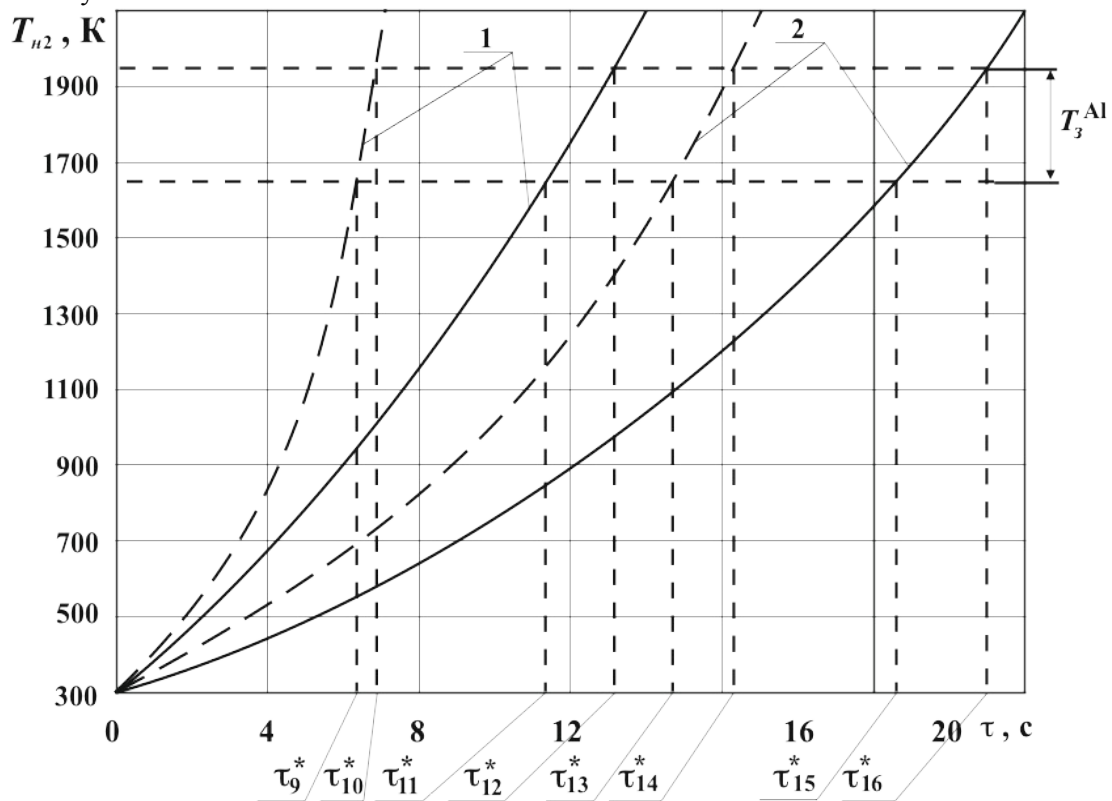


Рисунок 11 – Значення V_j^* та τ_j^* для заряду суміші Al + NiO з оболонкою з різних матеріалів: 1 – $V_1^* = 1,9 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $V_2^* = 8 \cdot 10^2$ м/с; ——— оболонка сталева (сталь 12X18H10T [9]); - - - - - оболонка латунна.

Таблиця 1 – Діапазон зміни критичних значень швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря V_j^* ($j = 1, 2, \dots$) та часів дії τ_j^* ($j = 1, 2, \dots$) на оболонку

Суміш	Параметр	V_j^* , м/с	τ_j^* , с
Mg + CuO (оболонка латунна)		$1,9 \cdot 10^3$	$\tau_1^* > 6,3$ при $T_{H_2} > (T_3^{Mg})_{min} = 1350$ К
			$\tau_2^* > 7,9$ при $T_{H_2} > (T_3^{Mg})_{max} = 1620$ К
		$8 \cdot 10^2$	$\tau_5^* > 13,5$ при $T_{H_2} > (T_3^{Mg})_{min} = 1350$ К
			$\tau_6^* > 15,7$ при $T_{H_2} > (T_3^{Mg})_{max} = 1620$ К
Mg + CuO (оболонка сталевая)		$1,9 \cdot 10^3$	$\tau_3^* > 11,2$ при $T_{H_2} > (T_3^{Mg})_{min} = 1350$ К
			$\tau_4^* > 12,7$ при $T_{H_2} > (T_3^{Mg})_{max} = 1620$ К
		$8 \cdot 10^2$	$\tau_7^* > 18,3$ при $T_{H_2} > (T_3^{Mg})_{min} = 1350$ К
			$\tau_8^* > 22,4$ при $T_{H_2} > (T_3^{Mg})_{max} = 1620$ К
Al + NiO (оболонка латунна)		$1,9 \cdot 10^3$	$\tau_9^* > 5,3$ при $T_{H_2} > (T_3^{Al})_{min} = 1350$ К
			$\tau_{10}^* > 6,1$ при $T_{H_2} > (T_3^{Al})_{max} = 1620$ К
		$8 \cdot 10^2$	$\tau_{13}^* > 14,7$ при $T_{H_2} > (T_3^{Al})_{min} = 1350$ К
			$\tau_{14}^* > 16,8$ при $T_{H_2} > (T_3^{Al})_{max} = 1620$ К
Al + NiO (оболонка сталевая)		$1,9 \cdot 10^3$	$\tau_{11}^* > 11,7$ при $T_{H_2} > (T_3^{Al})_{min} = 1350$ К
			$\tau_{12}^* > 13,2$ при $T_{H_2} > (T_3^{Al})_{max} = 1620$ К
		$8 \cdot 10^2$	$\tau_{15}^* > 21,3$ при $T_{H_2} > (T_3^{Al})_{min} = 1620$ К
			$\tau_{16}^* > 23,1$ при $T_{H_2} > (T_3^{Al})_{max} = 1930$ К

Висновки.

1. Уточнено математичну модель зовнішніх термоударних дій надзвукового потоку повітря на поверхню окремих частин металевих корпусів піротехнічних виробів (циліндричні оболонки з різних матеріалів), що контактують з зарядами сумішей, шляхом врахування температурних залежостей теплофізичних властивостей (об'ємної теплоємності $C_v(T)$, коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$), а також впливу основних параметрів термодій: швидкостей обдуву потоком повітря; часів його дії; режиму обтікання (ламінарний, турбулентний), яка дозволяє більш точно розраховувати розподіли температур у оболонці (відносно похибку знижено до 7...9 % замість 10...15 % у існуючих моделей).

2. В результаті проведених досліджень впливу зовнішніх уданих термодій на поверхню оболонок зарядів сумішей встановлено наступні закономірності:

– тепловий потік з приграничного шару в оболонку має максимум, місце знаходження якого вздовж поверхні оболонки повністю визначається режимом обтікання: для ламінарного режиму обтікання максимум теплового потоку знаходиться біля критичної точки ($x = 0$), а для турбулентного режиму обтікання положення цього максимуму зміщується від передньої критичної точки до $x_{max} = (0,35...0,47) \cdot x_0$ (x_0 – довжина оболонки);

– для часів зовнішнього теплового впливу $t = 7...12$ с при збільшенні швидкостей обдуву потоком повітря від $7 \cdot 10^2$ м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с температура зовнішньої поверхні оболонки значно зростає (для ламінарного режиму обтікання – у 2,5...3,2 разу; для турбулентного режиму обтікання – у 4,3...5,5 разу); при збільшенні відстані від зовнішньої поверхні оболонки до її внутрішньої поверхні температура зменшується у 1,8...2,4 разу для ламінарного режиму обтікання та у 2,7...3,5 разу для турбулентного режиму обтікання; при цьому збільшення часу теплового впливу призводить у всіх випадках тільки до зростання температури у будь-якій точці по товщині оболонки.

3. Розроблено науково-обґрунтований метод, що дозволяє з відносною похибкою 7...9 % визначати критичні значення параметрів зовнішніх термоударних дій (швидкостей обдуву потоком повітря, часів його дії, режимів обтікання), перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей та пожежовибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних виробів при їх запусках, що дозволяє шляхом використання необхідних технологічних рекомендацій, а також засобів контролю попереджати вказані небезпечні ситуації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Брауэр К. О. Пиротехнические устройства для космических аппаратов / К. О. Брауэр // Вопросы ракетной техники, 1969. – Вып. 10. – С. 47 – 61.
2. Шидловский А. А. Основы пиротехники / А. А. Шидловский – М.: Машиностроение, 1973. – 320 с.
3. Силин Н. А. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
4. Силин Н. А. Окислители гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Н. И. Зарипов и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 456 с.
5. Шидловский А. А. Пиротехника в народном хозяйстве / А. А. Шидловский, А. И. Сидоров, Н. А. Силин. – М.: Машиностроение, 1978. – 231 с.
6. Силин Н. А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
7. Nahue K. Propellants Explosives / K. Nahue, T. Kazumi, A. Iwama // Pyrotechnics, 1991. – V. 16. – # 5. – P. 245.
8. Ващенко В. А. Процессы горения металлизированных конденсированных систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, В. В. Цыбулин. – К.: Наукова думка, 2008 – 745 с.
9. Кириченко О. В. Основы пожарной безопасности пиротехнических нитратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. – К.: Наукова думка, 2012. – 318 с.
10. Молодых А. В. Опыт и перспективы решения теплофизических проблем создания оптико-электронных специзделий ИК-техники / А. В. Молодых, Н. И. Носов, Г. А. Смоляр, Д. В. Лозбин // Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції “Спеціальне приладобудування: стан та перспективи”. – Київ: КП СПБ “Арсенал”, 2016. – С. 54 – 56.
11. Глущенко А. Р. Лазерные системы танковых прицелов / А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. А. Бурковский и др. – Черкассы: Маклаут, 2009. – 600 с.
12. Вогман Л. П. Нормирование пожарной опасности фейерверочных пиротехнических изделий бытового назначения / Л. П. Вогман, О. В. Сотников // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – № 2. – С. 3 – 11.

13. Вогман Л. П. Требования пожарной безопасности к пиротехническим изделиям бытового назначения / Л. П. Вогман, В. В. Лепесий // *Пожаровзрывобезопасность*. – 1998. – № 4. – С. 51 – 57.
14. Антонов А. В. Теоретические и практические вопросы разработки огнетушащих веществ в Украине / А. В. Антонов // *Крупные пожары: предупреждение и тушение. Материалы XVI научно-практической конференции*. – М.: ВНИИПО МВД России, 2001. – Ч. 2. – С. 10 – 12.
15. Вогман Л. П. Разработка рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности фейерверочных пиротехнических изделий / Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, В. Е. Татаров, В. В. Лепесий // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2002. – № 3. – С. 24 – 41.
16. ДСТУ 4316 – 2004. Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки і методи випробувань. Затверджено наказом Держстандарту України від 05. 07. 2004 р., № 130.
17. Кириллов Г. Н. Требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции. Обзорно-аналитический материал / Г. Н. Кириллов, Ю. И. Дешевых, А. Н. Гилетич, Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, А. Н. Нестругин, А. М. Пшеничников. – М.: ВНИИПО и ДНД МЧС России, 2010. – 19 с.
18. Маковой В. А. Основные требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции / В. А. Маковой // *Международный научно-практический журнал “Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность”*, 2011. – № 1 – 3 (6 – 8). – С. 13 – 21.
19. Технічний регламент піротехнічних виробів. Затверджений постановою КМУ від 03. 08. 2011 р., № 839.
20. Особенности горения и тушения металлов и гидридов металлов (11 окт., 2016 г.). URL: <http://autocarta.ru/other/gorenie-i-tushenie-metallov-i-gibridov-metallov.html>.
21. Ващенко В. А. Комплекс экспериментальных установок и методик для определения скорости и пределов горения металлизированных конденсированных систем в динамических условиях эксплуатации / В. А. Ващенко, П. И. Заика, Д. М. Краснов // *Вісник Сумського державного університету*, 2001. – № 18. – С. 112 – 124.
22. Ващенко В. А. Расчет нагрева металлической оболочки изделия при встречном обдуве потоком воздуха и вращения / В. А. Ващенко, П. И. Заика, Д. М. Краснов // *Праці II Української науково-технічної конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”*. – Черкаси: НТУУ “КПІ”, 1998. – С. 228 – 231.
23. Ващенко В. А. Комплекс испытательных установок, моделирующих реальные условия применения пиротехнических нитратосодержащих изделий / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, В. Д. Акиншин, В. В. Цибулин, И. В. Яценко // *Науковий вісник УкрНДПБ*, 2009. – № 1(19). – С. 127 – 137.
24. Кириченко О. В. Тепловые воздействия на поверхность металлических обтекателей пиротехнических изделий в условиях выстрела и полета // *Международный научно-практический журнал “Пожаровзрывобезопасность”*. Россия. – М.: Пожнаука, 2013. – № 9. – С. 6 – 11.
25. Кириченко О. В. Моделирование процесса нагрева металлических оболочек пиротехнических изделий в условиях внешних термовоздействий // *Международный научно-практический журнал “Чрезвычайные ситуации: образование и наука”*. Беларусь. – Гомель: Гомельский инженерный институт, 2013. – № 2. – С. 37 – 45.
26. Кириченко О. В. Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін // *Проблемы пожарной безопасности*. – Харьков: НУГЗУ, 2012. – № 32. – С. 98 – 112.
27. Кириченко О. В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, Є. О. Тищенко, В. В. Цибулін // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 2018. – № 2. – С. 5 – 11.
28. Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // *International Scientific Journal “Intenauka”* <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
29. Діброва О. С. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // *International Scientific Journal “Intenauka”* <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.
30. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
31. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
32. Карташов Э. М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. – М.: Высшая школа, 1985. – 324 с.
33. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

REFERENCES

1. Brauer K. O. Pirotekhnicheskie ustrojstva dlya kosmicheskikh apparatov / K. O. Brauer // Voprosy raketnoj tekhniki, 1969. – Vyp. 10. – S. 47 – 61.
2. SHidlovskij A. A. Osnovy pirotekhniki / A. A. SHidlovskij– M.: Mashinostroenie, 1973. – 320 s.
3. Silin N. A. Metallicheskie goryuchie geterogennyh kondensirovannyh sistem / N. A. Silin, V. A. Vashchenko, L. YA. Kashporov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 320 s.
4. Silin N. A. Okisliteli geterogennyh kondensirovannyh sistem / N. A. Silin, V. A. Vashchenko, N. I. Zaripov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 456 s.
5. SHidlovskij A. A. Pirotekhnika v narodnom hozyajstve / A. A. SHidlovskij, A. I. Sidorov, N. A. Silin. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 231 s.
6. Silin N. A. Gorenje metallizirovannyh geterogennyh kondensirovannyh sistem / N. A. Silin, V. A. Vashchenko, L. YA. Kashporov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 232 s.
7. Hahue K. Propellants Explosives / K. Hahue, T. Kazumi, A. Iwama // Pyrotechnics, 1991. – V. 16. – # 5. – P. 245.
8. Vashchenko V. A. Processy gorenija metallizirovannyh kondensirovannyh sistem / V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, YU. G. Lega, P. I. Zaika, I. V. YAcenko, V. V. Cybulin. – K.: Naukova dumka, 2008 – 745 s.
9. Kirichenko O. V. Osnovi pozheznoi bezpeki pirotekhnichnih nitratovmisnih virobiv v umovah zovnishnih termovpliviv. Monografiya / O. V. Kirichenko, P. S. Pashkovskij, V. A. Vashchenko, YU. G. Lega. – K.: Naukova dumka, 2012. – 318 s.
10. Molodyk A. V. Opyt i perspektivy resheniya teplofizicheskikh problem sozdaniya optiko-elektronnyh specizdelij IK-tekhniki / A. V. Molodyk, N. I. Nosov, G. A. Smolyar, D. V. Lozbin // Zbirnik tez dopovidej 2-i Ukraïns'koï naukovo-tekhnichnoï konferencii “Special'ne priladobuduvannya: stan ta perspektivi”. – Kïiv: KP SPB “Arsenal”, 2016. – S. 54 – 56.
11. Glushchenko A. R. Lazernye sistemy tankovyh pricelov / A. R. Glushchenko, V. I. Gordienko, A. A. Burkovskij i dr. – CHERkassy: Maklout, 2009. – 600 s.
12. Vogman L. P. Normirovanie pozharnoj opasnosti fejerverochnyh pirotekhnicheskikh izdelij bytovogo naznacheniya / L. P. Vogman, O. V. Sotnikov // Pozharovzryvobezopasnost'. – 1998. – № 2. – S. 3 – 11.
13. Vogman L. P. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti k pirotekhnicheskim izdeliyam bytovogo naznacheniya / L. P. Vogman, V. V. Lepesij // Pozharovzryvobezopasnost'. – 1998. – № 4. – S. 51 – 57.
14. Antonov A. V. Teoreticheskie i prakticheskie voprosy razrabotki ognitushashchih veshchestv v Ukraine / A. V. Antonov // Krupnye pozhary: preduprezhdenie i tushenie. Materialy XVI nauchno-prakticheskoy konferencii. – M.: VNIPO MVD Rossii, 2001. – CH. 2. – S. 10 – 12.
15. Vogman L. P. Razrabotka rekomendacij po obespecheniyu pozharnoj bezopasnosti fejerverochnyh pirotekhnicheskikh izdelij / L. P. Vogman, V. A. Zujkov, V. E. Tatarov, V. V. Lepesij // Pozharovzryvobezopasnost'. – 2002. – № 3. – S. 24 – 41.
16. DSTU 4316 – 2004. Virobi pirotekhnichni pobutovogo priznachennya. Vimogi pozheznoi bezpeki i metodi viprobuvan'. Zatverdzheno nakazom Derzhstandartu Ukraïni vid 05. 07. 2004 r., № 130.
17. Kirillov G. N. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti pri obrashchenii pirotekhnicheskoy produkcii. Obzorno-analiticheskij material / G. N. Kirillov, YU. I. Deshevyyh, A. N. Giletich, L. P. Vogman, V. A. Zujkov, A. N. Nestrugin, A. M. Pshenichnikov. – M.: VNIPO i DND MCHS Rossii, 2010. – 19 s.
18. Makovej V. A. Osnovnye trebovaniya pozharnoj bezopasnosti pri obrashchenii pirotekhnicheskoy produkcii / V. A. Makovej // Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij zhurnal “CHrezvychajnye situacii: promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost'”, 2011. – № 1 – 3 (6 – 8). – S. 13 – 21.
19. Tekhnichnij reglament pirotekhnichnih virobiv. Zatverdzenij postanovoyu KMU vid 03. 08. 2011 r., № 839.
20. Osobennosti gorenija i tusheniya metallov i gidridov metallov (11 okt., 2016 g.). URL: <http://autocarta.ru/other/gorenje-i-tushenie-metallov-i-gibridov-metallov.html>.
21. Vashchenko V. A. Kompleks eksperimental'nyh ustanovok i metodik dlya opredeleniya skorosti i predelov gorenija metallizirovannyh kondensirovannyh sistem v dinamicheskikh usloviyah ekspluatacii / V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, D. M. Krasnov // Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu, 2001. – № 18. – S. 112 – 124.
22. Vashchenko V. A. Raschet nagreva metallicheskoj obolochki izdeliya pri vstrechnom obduve potokom vozduha i vrashcheniya / V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, D. M. Krasnov // Praci II Ukraïns'koï naukovo-tekhnichnoï konferencii “Gidroaeromekhanika v inzhenernij praktici”. – CHERkasi: NTUU “KPI”, CHITI, 1998. – S. 228 – 231.

23. Vashchenko V. A. Kompleks ispytatel'nyh ustanovok, modeliruyushchih real'nye usloviya primeneniya pirotekhnicheskikh nitratosoderzhashchih izdelij / V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, V. D. Akin'shin, V. V. Cybulin, I. V. YAcenko // Naukovij visnik UkrNDIPB, 2009. – № 1(19). – S. 127 – 137.
24. Kirichenko O. V. Teplovyje vozdejstviya na poverhnost' metallicheskih obtekatel'ej pirotekhnicheskikh izdelij v usloviyah vystrela i poleta // Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij zhurnal "Pozharovzryvobezопасnost". Rossiya. – M.: Pozhnauka, 2013. – № 9. – S. 6 – 11.
25. Kirichenko O. V. Modelirovanie processa nagreva metallicheskih obolochek pirotekhnicheskikh izdelij v usloviyah vneshnih termovozdejstvij // Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij zhurnal "CHrezvychajnye situacii: obrazovanie i nauka". Belarus'. – Gomel': Gomel'skij inzhenernyj institut, 2013. – № 2. – S. 37 – 45.
26. Kirichenko O. V. Pozhezhonebezpečni termovplivi na poverhnyu metalevih korpusiv pirotekhnichnih virobiv v umovah postrilu ta pol'otu / O. V. Kirichenko, V. A. Vashchenko, V. V. Cibulin // Problemy pozharnoj bezопасnosti. – Har'kov: NUGZU, 2012. – № 32. – S. 98 – 112.
27. Kirichenko O. V. Vznachennya dopustimih rezhimiv nagrivu pirotekhnichnih sumishej pri ih ekspluatacii / O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, E. O. Tishchenko, V. V. Cibulin // Visnik CHerkas'kogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu, 2018. – № 2. – S. 5 – 11.
28. Dibrova O. S. Pidvishchennya pozhezhoi bezpeki pirotekhnichnih nitratno-metalevih sumishej v umovah zovnishnih termichnih dij / O. S. Dibrova, O. B. Kirichenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // International Scientific Journal "Intenauka" <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
29. Dibrova O. S. Zakonomirnosti vplivu tekhnologichnih parametrov na pozhezhu bezpeki pirotekhnichnih nitratno-titanovih sumishej v umovah zovnishnih termichnih dij / O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // International Scientific Journal "Intenauka" <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.
30. Abramovich G. N. Prikladnaya gazovaya dinamika / G. N. Abramovich. – M.: Nauka, 1969. – 824 s.
31. Lojcyanskij L. G. Mekhanika zhidkosti i gaza / L. G. Lojcyanskij. – M.: Nauka, 1987. – 840 s.
32. Kartashov E. M. Analiticheskie metody v teploprovodnosti tverdyh tel / E. M. Kartashov. – M.: Vysshaya shkola, 1985. – 324 s.
33. Korn G. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov. Opredeleniya, teoremy, formuly / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1984. – 831 s.

Yevhenii Kyrychenko

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of NUCD in Ukraine

**RESEARCH OF EXTERNAL HEAT SHOCK PROCESSES
FOR PYROTECHNIC METAL OXIDE PRODUCTS
IN CONDITIONS OF SHOOTING AND FLIGHT**

A mathematical model of external thermal shock actions of supersonic air flow on metal shells of charges of pyrotechnic mixtures of magnesium and aluminum powders and metal oxides, taking into account the temperature dependences of their thermophysical properties and allows with a relative error of 7... 9% to calculate distributions heat flow from the boundary layer along the surface of the shells and the temperature of them thickness has been developed.

A scientifically sound method for determining critical parameters shock thermody (velocities of air flow, time of its action, Reynolds criterion, which characterizes the flow regime (laminar, turbulent)), controlling which by adjusting the technological parameters (ratio and dispersion of components, compaction coefficient, charge diameter and material shell) can prevent premature fire and explosion destruction of products in terms of their launches has been developed.

Key words: *fire safety, pyrotechnic mixtures, processes of thermal conductivity, gas dynamics, ignition and combustion of metal particles.*