

УДК 614.841:536.46

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.133.151>

Назарій КОЗЯР, кандидат технічних наук (ORCID: 0000-0001-9082-0771),
Національний університет цивільного захисту України

ЗАПОБІГАННЯ ПЕРЕДЧАСНОГО ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОГО СПРАЦЬОВУВАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ПОСТРІЛУ ТА ПОЛЬОТУ

Встановлено закономірності впливу зовнішніх термоударних дій надзвукового обдуву потоком повітря на металеві півсферичні оболонки зарядів нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин, якими споряджаються піротехнічні вироби (піротехнічні ІЧ-випромінювачі, елементи ракетно-космічної техніки та ін.). Досліджено розподіли температури вздовж зовнішньої та внутрішньої оболонок та по їх товщині. Визначено критичні значення швидкостей обдуву потоком повітря та часів його термоударного впливу, перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей, різкого прискорення їх горіння під оболонками та, у кінцевому підсумку, до пожежовибухонебезпечного руйнування виробів.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні нітратно-металізовані суміші, газодинамічні процеси, методи теорії теплопровідності.

Постановка проблеми. Піротехнічні вироби спеціального призначення (піротехнічні ІЧ-випромінювачі, елементи ракетно-космічної техніки та ін.) на основі ущільнених сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.), нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 та ін.) та добавок органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідитолу та ін.) та неорганічних (LiF , NaF , BaF_2 , SiF_2 , SrF_2 , AlF_3 та ін.) речовин в умовах пострілу та польоту піддаються інтенсивним термоударним впливам при надзвуковому обдуті потоком повітря [1 – 10]. В результаті відбувається суттєвий нагрів зарядів реакційноздатних до підвищених температур сумішей, що приводить до їх передчасних локальних займань та подальшого прискорення процесу горіння сумішей під металевими оболонками в умовах зростаючих температур та зовнішніх тисків. Це призводить до їх вибухонебезпечних руйнувань з утворенням різних чинників пожежі (полум'я або високотемпературний потік продуктів згорання, розігріті частини зарядів сумішей, іскри та ін.). Тому на стадії проектування та розробки вказаних виробів необхідно вміти визначати критичні значення параметрів зовнішніх термоударних впливів (швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря, часів їх дії) на металеві оболонки зарядів сумішей, контроль перевищення яких дозволяє попереджати передчасні спрацьовування виробів з подальшими їх пожежовибухонебезпечними руйнуваннями [11 – 16]. Нині вказана задача для розглядуваних піротехнічних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин ще не вирішена.

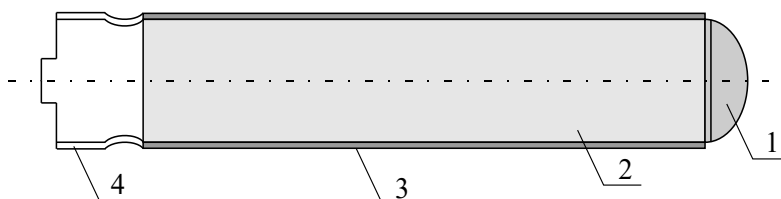
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основою піротехнічних ІЧ-випромінювачів є, так званий, освітлювальний елемент (факел, зірка тощо), що являє собою металевий півсферичний обтічник, куди запресовуються заряди спалахувачів на основі розглядуваних піротехнічних нітратно-металевих сумішей та основні заряди спеціальних багатокomпонентних піротехнічних сумішей. Загальний вигляд типових

піротехнічних ІЧ-випромінювачів, схема їх дії та штатні умови застосування представлено на рис. 1 [1 – 3].

При спрацьовуванні ІЧ-випромінювача відстрілюється обтічник та ініціюється займання та горіння основного заряду піротехнічної суміші, в результаті створюється потужне джерело теплового ІЧ-випромінювання, так звана хибна тепла ціль для систем наведення та спостереження за об'єктами, що літають. Так піротехнічні ІЧ-випромінювачі практично усі є малогабаритними (діаметр до $2,5...3,5 \cdot 10^{-2}$ м) та запускаються у більшості випадків з об'єктів, що летять, швидкість їх пострілу може перевищувати швидкість звуку у декілька разів. Тому піротехнічні ІЧ-випромінювачі при їх застосуванні піддаються інтенсивним ударним термовпливам.

Постановка задачі та її розв'язання. Тому метою даної роботи є визначення на базі розроблених моделей критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів надзвукового потоку повітря на півсферичні металеві оболонки зарядів ущільнених сумішей з порошків Mg, Al, NaNO_3 та добавок різних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, металдегіду, каніфолі, ідитолу, фторидів металів (LiF , NaF , BaF_2 , SiF_2 , SrF_2 , AlF_3)) як основи для попередження передчасних пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Зовнішні термодії на металеві корпуси піротехнічних виробів, що призводять до їх можливих пожежонебезпечних руйнувань. Як вказувалося вище, розглядувані вироби з нітратно-металевими спалахувачами при їх застосуванні (умови пострілу та польоту (запуск з нерухомих наземних установок або з літальних апаратів)) можуть піддаватися інтенсивному нагріву поверхні виробів надзвуковим повітряним потоком, як це вказано в таблиці 1.



1 – півсферичний обтічник з зарядом спалахувача; 2 – основний заряд багатокомпонентної піротехнічної суміші; 3 – металева оболонка; 4 – різьбовий хвостовик для кріплення.

Схема дії ІЧ-випромінювачів

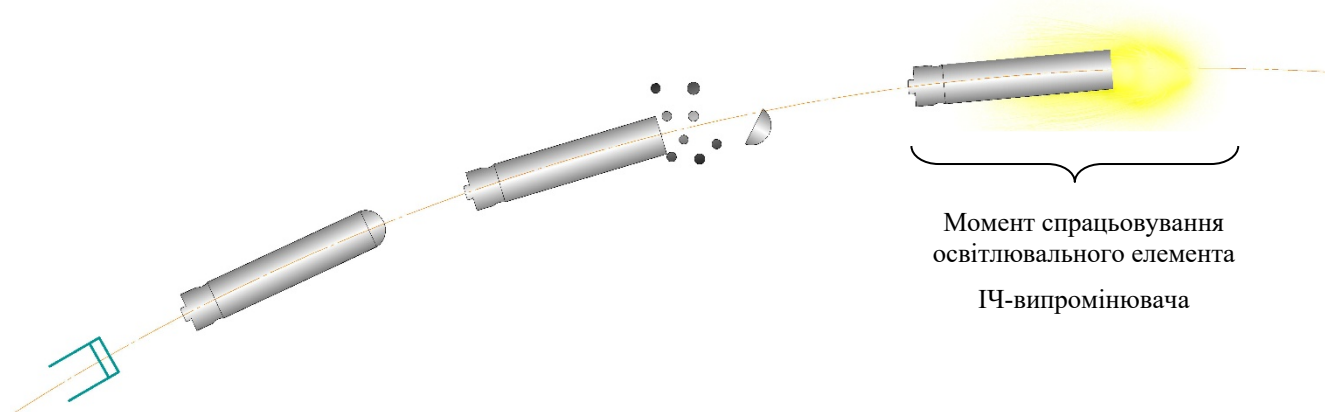


Рисунок 1. Загальний вигляд типових піротехнічних ІЧ-випромінювачів та схема їх дії

При перевищенні критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів (швидкості обдуву потоком повітря, часу його дії) відбувається істотний нагрів найбільш реакційноздатних до підвищених температур зарядів спалахувачів, що вказано на рисунку 2, що призводить до їх передчасних локальних спалахувань під герметичними корпусами виробів та подальшого розвитку процесу горіння в умовах зростаючих температур нагріву та зовнішніх тисків, що призводить, у кінцевому підсумку, до пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів.

Моделювання ударних термовпливів надзвукового потоку повітря на півсферичну металеву оболонку. Одним з критеріїв, що оцінює аеродинамічне нагрівання й прогнозує зони найбільш сильного термовпливу на поверхні півсферичної оболонки, можна розглядати розподіл температури на її поверхні при нульових кутах атаки й ковзання, тобто при поздовжньому обтіканні потоком повітря із заданими швидкостями й висотами польоту, режимами обтікання й ін. [1, 20].

Крім цього, при нульових кутах атаки й ковзання, які можна реалізувати на практиці відповідними програмами польоту виробів, їх нагрівання піддається розрахунку як для ламінарного, так й для турбулентного режимів обтікання виробу газовими потоками. Для використовуваних на практиці зарядів сумішей [1] при надзвуковому обдуві зі швидкостями u_∞ ($u_\infty > 7 \cdot 10^2 \dots 10^3$ м/с) реалізується по всій її довжині, в основному, турбулентний режим обтікання, тому що значення критерію Рейнольдса в цьому випадку $Re > 10^5$ (критерій Рейнольдса $Re = \frac{2 \cdot u_\infty \cdot R_w}{\nu_\infty}$, де R_w – зовнішній радіус оболонки; ν_∞ – коефіцієнт кінематичної в'язкості потоку повітря [20]). Ламінарний режим реалізується тільки у окремих випадках (при невеликих радіусах оболонки й помірних швидкостях обдуву), коли $Re < 10^5$.

Таблиця 1. Значення температури виробів (T_w , К) залежно від швидкості обдуву повітряним потоком (V , м/с) та режиму обтікання (за даними продувок тіл різної геометричної форми в аеродинамічних трубах [1, 2, 18])

V , 10^2 м/с	T_w , К	
	Ламінарний режим	Турбулентний режим
5	540	620
6,5	730	840
10	820	950
14	1040	1170
17	1320	1480
20	1650	1850

Примітка. Діапазони зміни зовнішнього теплового потоку: $q_w = 2 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^6$ Вт/м² (ламінарний режим обтікання, $Re = \frac{D \cdot V}{\nu} < 10^5$ (D – діаметр виробу, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря)); $q_w = 3 \cdot 10^5 \dots 3,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (турбулентний режим обтікання, $Re > 10^5$).

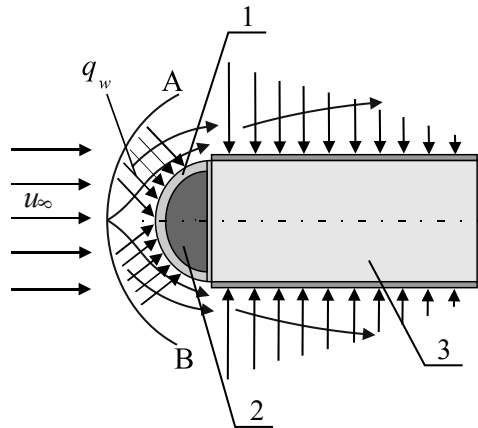


Рисунок 2. – Схема нагріву піротехнічного ІЧ-випромінювача (умови пострілу та польоту): 1 – півсферична металева оболонка; 2 – заряд спалахувача; 3 – основний заряд багатокомпонентної піротехнічної суміші; u_{∞} – швидкість надзвукового потоку повітря; АВ – фронт ударної хвилі; q_w – тепловий потік, що поступає на поверхню корпусу виробу з приграничного шару при гальмуванні газового потоку

Нині відсутня закінчена теорія турбулентного теплообміну, тому замість розв’язання класичної контактної задачі аеродинамічного нагрівання розглядуваної оболонки використовується напівемпіричний підхід, похибка якого, як показують існуючі застосування цього підходу, лежить у межах 10...15 % [20].

Згідно цього підходу, 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 [1, 20] та знаходиться тепловий потік q_w 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 товщиною H при заданому зовнішньому тепловому потоці q_w (рис. 3).

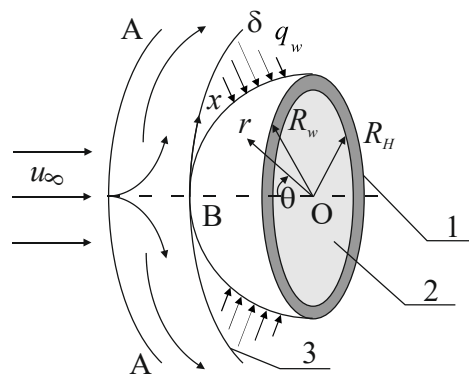


Рисунок 3. Схема нагріву півсферичної металевої оболонки: 1 – оболонка; 2 – заряд суміші; AA – фронт ударної хвилі; В – передня критична точка (швидкість потоку дорівнює нулю); 3 – зовнішня межа прикордонного шару товщиною δ ; r, θ – сферичні координати; R_w, R_H – радіуси зовнішньої та внутрішньої поверхонь оболонки відповідно; $H = R_w - R_H$ – товщина оболонки; індекс “ ∞ ” – значення параметрів у набігаючому повітряному потоці

Визначення теплового потоку з приграничного шару на поверхню оболонки. Газодинамічну задачу будемо розглядати як квазістаціонарну, що справедливо для більшості практичних випадків, за винятком імпульсних режимів [20]. Це обумовлено тим, що об’ємна теплоємність газового потоку (Cv_2) мала порівняно з об’ємною

теплоємністю матеріалу оболонки (C_{V0}), тобто $C_{V2} / C_{V0} \ll 1$ [1, 20]. Припускаючи також, що газовий потік є нестисливим (справедливо для $u_\infty < 2 \dots 3 \cdot 10^3$ м/с), для теплового потоку $q_w = const$ з приграничного шару (нульові кути атаки й ковзання) маємо такий вираз [1, 20]:

$$q_w = \frac{f(Pr)}{\left(\frac{\rho_\delta u_\delta^2 x}{\mu_\delta}\right)^{1/5}} \cdot \rho_\delta \cdot u_\delta \cdot C_P \cdot (T_r - T_w), \quad (1)$$

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_w – температура поверхні оболонки; індекс “ δ ” – умови на зовнішній межі прикордонного шару; T_r – температура відновлення у приграничному шарі, яка являє собою температуру повітря в безпосередній близькості до поверхні оболонки і визначається за такою емпіричною формулою [1]:

$$T_r = T_\delta (1 + 0,2 \cdot \bar{r} \cdot M^2), \quad (2)$$

де \bar{r} – коефіцієнт відновлення, що характеризує частку кінетичної енергії зовнішнього потоку повітря, яка переходить у тепломісткість при повному гальмуванні потоку (для ламінарного режиму обтікання звичайно приймають $\bar{r} = 0,85$, а для турбулентного режиму – $\bar{r} = 0,88 \dots 0,90$); M – число Маха ($M = \frac{u_\infty}{u_*}$, де u_* – швидкість розповсюдження звуку в повітрі). Далі передбачається, що для зон, близьких до критичної точки залишається справедливою рівність $u_\infty = \bar{\beta} x$, де $\bar{\beta}$ – функція тільки числа V незбуреного потоку перед ударною хвилею (для ламінарного режиму зазначене співвідношення отримане шляхом вимірювання тиску й розрахунку швидкостей). Підстановка рівності $u_\infty = \bar{\beta} x$ у (2) дає

$$q_w = f(Pr) \cdot \bar{\beta}^{4/5} \cdot \mu_\delta \cdot x^{3/5} \cdot C_P \cdot (T_r - T_w). \quad (3)$$

Підставляючи у (3) відомі газодинамічні співвідношення [20], одержуємо такий вираз для теплового потоку у випадку турбулентного режиму обтікання:

$$q_w = \frac{0,00042}{Pr^{2/3}} \cdot \left(\frac{\bar{\beta} \cdot R_w}{u_\infty}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{v_\infty}{u_\infty \cdot R_w}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty}\right)^{1/5} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty \cdot C_P \cdot (T_r - T_w) \cdot (\sin\theta)^{3/5}. \quad (4)$$

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

$$q_w = \frac{0,0083}{Pr^{2/3}} \cdot \left(\frac{\bar{\beta} \cdot R_w}{u_\infty}\right)^2 \cdot \left(\frac{v_\infty}{u_\infty \cdot R_w}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty}\right)^{1/2} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty \cdot C_P \cdot (T_r - T_w). \quad (5)$$

У формулах (4) та (5) вираз для $\bar{\beta}$ має вигляд [20]:

$$\bar{\beta} = \frac{u_\infty}{2 \cdot R_w} \cdot \left(\frac{8 \cdot (\gamma_\infty - 1) \cdot M^2 + 2}{(\gamma_\infty + 1) \cdot M^2}\right) \cdot \left[1 + \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot \frac{(\gamma_\infty - 1) \cdot M^2 + 2}{2 \cdot \gamma_\infty \cdot M^2 - (\gamma_\infty - 1)}\right]^{-1/2}. \quad (6)$$

Співвідношення $\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty}$ й $\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty}$ визначаються розрахунком тиску за методом Ньютона й адіабатичного розширення від критичної точки уздовж поверхні оболонки (у напрямку x) [20]:

$$\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty} = 6,35 \cdot \left(1 - \frac{1}{7 \cdot M^2}\right)^{-2,5} \cdot \left(1 + \frac{5}{M^2}\right)^{-1} \cdot \bar{P}^{-5/2}, \quad (7)$$

$$\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty} = 0,447 \cdot M \cdot \left(1 + \frac{5}{M^2}\right)^{-1/2} \cdot \frac{1+S/T_\infty}{1+S/T_T} \cdot \bar{P}^{-3/14}, \quad (8)$$

де S – стала Сатерленда ($S = 110,4$ К); \bar{P} – відношення тиску на зовнішній межі приграничного шару P_δ до тиску гальмування P_T ; T_T – температура гальмування. У роботі [20] на базі порівняння експериментальних даних отримана досить точна (відносна похибка 3...5 %) формула для визначення розподілу тиску в напрямку θ :

$$\bar{P} = 1 - (1,525 - 1,85 \cdot \bar{k}_0) \cdot (\sin\theta)^2 + (0,487 - 1,325 \cdot \bar{k}_0) \cdot (\sin\theta)^4, \quad (9)$$

де \bar{k}_0 – ущільнення повітря за прямим стрибком:

$$\bar{k}_0 = \frac{\gamma_\infty - 1}{\gamma_\infty + 1} + \frac{2}{(\gamma_\infty + 1) \cdot M^2}. \quad (10)$$

Тиск у точці гальмування визначається за формулою [23]:

$$P_T = P_\infty \cdot M^2 \cdot \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot \left[\frac{(\gamma_\infty - 1) \cdot M^2}{4 \cdot \gamma_\infty \cdot M^2 - 2 \cdot (\gamma_\infty - 1)} \right]^{\frac{1}{\gamma_\infty - 1}}. \quad (11)$$

Температура гальмування має вигляд:

$$T_T = T_\infty \cdot \left(1 + \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot M^2\right). \quad (12)$$

При розрахунках число Pr_δ для повітря можна вважати постійним і рівним 0,71, оскільки воно мало залежить від температури. Питому теплоємність повітря C_p для випадку течії ідеального газу також можна вважати постійною величиною, що дорівнює $C_p = 10^3$ Дж/кг·К.

За отриманими формулами (4), (5) з використанням стандартних пакетів прикладних програм [1, 20] були проведені розрахунки розподілів теплового потоку з приграничного шару q_w уздовж поверхні оболонки в залежності від різних умов експлуатації піротехнічних виробів, що вказано на рисунках 4 – 6.

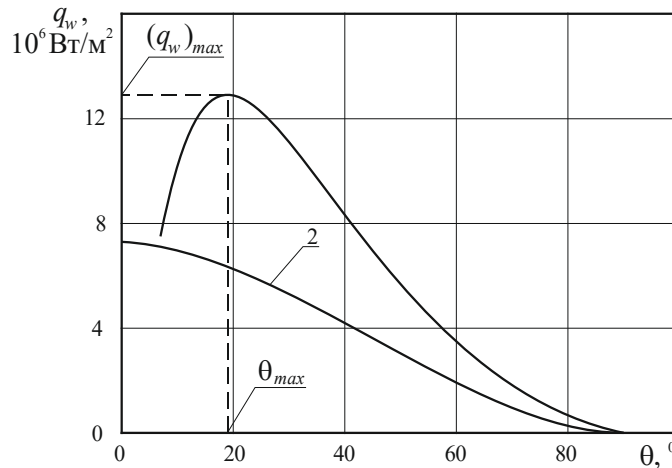


Рисунок 4. Розподіл теплового потоку q_w уздовж поверхні оболонки при її надзвуковому обдуві потоком повітря ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання

З результатів розрахунків, представлених на рис. 4 – 6, випливає, що місця розташування максимальних значень теплового потоку $(q_w)_{max}$ на поверхні оболонки істотно залежать від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення $(q_w)_{max}$ знаходяться поблизу передньої критичної точки ($\theta = 0^\circ$) оболонки; для турбулентного режиму обтікання значення $(q_w)_{max}$ вже зміщуються від $\theta = 0^\circ$ до θ_{max} . При цьому зі збільшенням швидкості обдуву потоком повітря від $u_\infty = 7 \cdot 10^2$ м/с до $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с значення $(q_w)_{max}$ зростають від $2,5 \cdot 10^6$ Вт/м² до $14,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (турбулентний режим обтікання) і від $1,7 \cdot 10^6$ Вт/м² до $8,2 \cdot 10^6$ Вт/м² (ламінарний режим обтікання). Щодо значень θ_{max} , то для ламінарного режиму обтікання $\theta_{max} = 0$ незалежно від u_∞ . При турбулентному режимі обтікання для досліджуваного діапазону зміни $u_\infty = 7 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с значення θ_{max} знаходиться у межах $18 \dots 22^\circ$, тобто θ_{max} практично не змінюється, що повністю відповідає експериментальним даним.

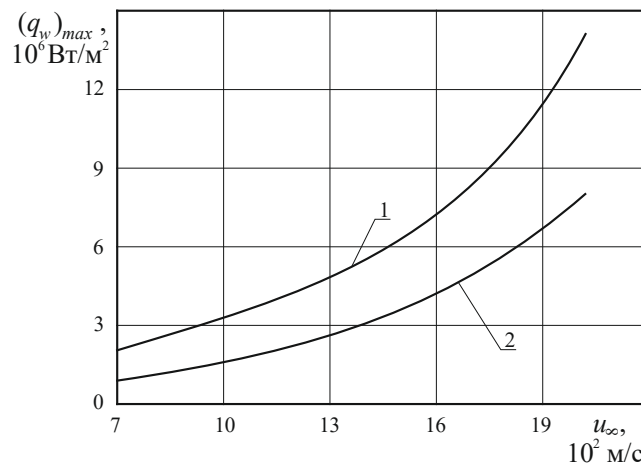


Рисунок 5. Залежність максимальних значень теплового потоку $(q_w)_{max}$ від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря обтічника ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання

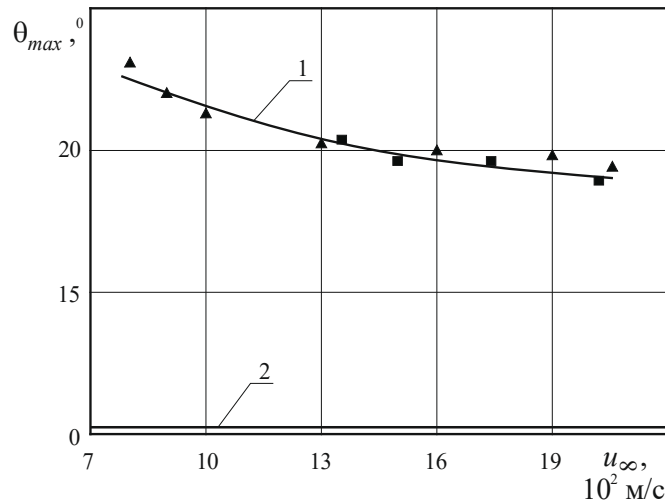


Рисунок 6. Залежність $\theta_{max}(u_{\infty})$ для різних надзвукових режимів обтікання ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; \blacktriangle , \blacksquare – результати лабораторних та натурних випробувань відповідно [17, 18]): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання

Визначення розподілів температури вздовж поверхні та по товщині півсферичної оболонки. При обтіканні півсферичної оболонки надзвуковим потоком повітря на її поверхню з приграничного шару поступає тепловий потік q_w . При цьому, температура внутрішньої поверхні оболонки, яка межує з зарядом суміші, оцінюється по максимуму, тобто оцінюється зміна температури у зонах максимальних зовнішніх термодій, що відповідає за передчасне займання зарядів сумішей та пожежовибухонебезпечне руйнування виробів [1, 20].

Приймається, що радіаційні тепловтрати з поверхні оболонки дуже малі (внаслідок малих значень температури поверхні). Таким чином, рівняння процесу нагріву півсферичної оболонки являє собою нестационарне нелінійне рівняння теплопровідності з граничними умовами 2-го роду [19, 20]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T) \cdot \text{grad}T] \quad , R_H < r < R_w, 0 < \theta < \pi/2, 0 < t < +\infty, \quad (13)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (14)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_w} = q_w, \quad (15)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_H} = 0, \quad (16)$$

де div та grad – оператори теорії поля у сферичних координатах (r, θ, t) .

Враховуючи відомі вирази для вказаних операторів [20], а також експериментально встановлені залежності $C_V(T) = C_{V0} \cdot T^v$, $\lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^v$ (C_{V0} , λ_0 , v – емпіричні константи, відносна похибка не перевищує 5...7 %) [1, 2] та вводячи заміну змінних

$$\bar{T} = T^v - T_0^v, \quad (17)$$

вихідну систему рівнянь (13) – (16) можна звести до наступного лінеаризованого вигляду:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = a_0^2 \left[\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial \theta} \right) \right], \quad (18)$$

$$\bar{T} \Big|_{t=0} = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \Big|_{r=R_w} = \bar{q}_w, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \Big|_{r=R_H} = 0, \quad (21)$$

де

$$a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}}, \quad \bar{q}_w = \frac{\nu+1}{\lambda_0} q_w(\theta). \quad (22)$$

Розв'язок отриманої лінеаризованої задачі (18) – (21) будемо шукати у вигляді суми двох невідомих функцій

$$\bar{T}(r, \theta, t) = v(r, \theta, t) + w(r, \theta, t). \quad (23)$$

При цьому функція $v(r, \theta, t)$ знаходиться з умови однорідності граничних умов (20), (21) для функції $w(r, \theta, t)$:

$$v(r, \theta, t) = \frac{\bar{q}_w(\theta) \cdot r \cdot (r - 2R_w)}{2(R_w - R_H)}. \quad (24)$$

Отримуємо

$$\bar{T}(r, \theta, t) = \frac{\bar{q}_w(\theta) \cdot r \cdot (r - 2R_w)}{2(R_w - R_H)} + w(r, \theta, t). \quad (25)$$

Враховуючи (18) – (20) та (25), для $w(r, \theta, t)$ отримаємо наступну систему рівнянь

$$\frac{\partial w}{\partial t} = a_0^2 \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \right] + F(r, \theta, t), \quad (26)$$

$$w|_{t=0} = f_1(r, \theta), \quad (27)$$

$$\left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=R_w} = \left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=R_H} = 0 \quad (28)$$

Тут

$$F(r, \theta, t) = a_0^2 \left[\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \right] - \frac{\partial v}{\partial t} \quad (29)$$

З врахуванням (24) для $F(r, \theta, t)$ отримуємо наступний вираз

$$F(r, \theta, t) = \frac{a_0^2}{r(R_w - R_H)} \left[\bar{q}_w(\theta) \cdot (3r - 2R_w) + \frac{r - 2R_w}{2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial \bar{q}_w(\theta)}{\partial \theta} \right) \right] \quad (30)$$

Для розв'язання отриманої лінеаризованої системи рівнянь (26) – (28) було використано стандартний метод розділення змінних Фур'є [19, 20]. В результаті, для функції $w(r, \theta, t)$ було отримано наступний вираз

$$w(r, \theta, t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l X_{lim}(r, \theta) \cdot T_{lim}(t) \quad (31)$$

Остаточно, розв'язок вихідної задачі (13) – (16) отримуємо у вигляді

$$T(r, \theta, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot q_w(\theta) \cdot r \cdot (r - 2R_w)}{2(R_w - R_H)} + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \left[\frac{2l+1}{2\pi} \cdot \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \right]^2 \cdot E_i^{(l)}(r) \cdot Y_l^m(\theta) \cdot \int_{R_H}^{R_w} \int_0^{\pi t} F(r, \theta, t) \cdot E_i^{(l)}(r) \cdot Y_l^m(\theta) \cdot e^{-\lambda_i^{(l)}(t-\tau)} \cdot r^2 \sin \theta \cdot dr d\theta d\tau \right\}^{\frac{1}{v+1}}, \quad (32)$$

де функції $E_i^{(l)}(r)$, $Y_l^m(\theta)$ та параметри $\lambda_i^{(l)}$ знаходяться на основі стандартних виразів [19]. При цьому при обчисленнях по формулам типу (32) (дво- та тривимірні теплові задачі) обмежуються у рядах з нескінченними межами 4...6 членами внаслідок їх швидкої збіжності (відносна похибка не перевищує 5...8 %) [20].

З використанням відомих фізико-технічних даних та спеціалізованих пакетів прикладних програм [1, 2] було проведено розрахунки розподілів температури вздовж поверхні оболонки та по її товщині для різних швидкостей обдуву потоком повітря, режимів обтікання та часів теплового впливу (рис. 9, 10). З результатів розрахунків було встановлено, що розподіл температури вздовж поверхні обтічника найбільш суттєво залежить від режиму обтікання: для ламінарного режиму – максимум температури знаходиться поблизу його передньої критичної точки ($\theta = 0^\circ$, $u_\infty = 0$), а

для турбулентного режиму – цей максимум зміщений вздовж поверхні обтічника на відстань, яка відповідає $\theta_{max} = 18...22^\circ$, що повністю відповідає розташуванню максимуму зовнішнього теплового потоку з прикордонного шару (див. рис. 4, 6). При цьому зміна швидкості обдуву потоком повітря та часу його теплового впливу не впливають на розташування максимуму температури. Збільшення швидкості потоку повітря від 10^3 м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с та часу його теплового впливу до 12 с призводить до зростання максимальної температури зовнішньої поверхні оболонки $(T_w)_{max}$ незалежно від природи суміші для ламінарного режиму обтікання – у 1,3...1,4 разу (оболонки зі сталі 12X18H10T [1]) та у 1,5...1,6 разу (оболонка з міді); для турбулентного режиму обтікання – у 2,1...3,2 разу (оболонки зі сталі 12X18H10T [1]) та у 2,3...3,7 разу (оболонка з міді). При збільшенні відстані від зовнішньої поверхні оболонки (при $r = R_w$) до її внутрішньої поверхні (при $r = R_H$) максимальна температура зменшується для усіх режимів обтікання та незалежно як від матеріалу оболонки, так й від природи суміші у 1,3...1,4 разу.

Таким чином, максимальна температура як зовнішньої поверхні оболонки, так й її внутрішньої поверхні у випадку турбулентного режиму обтікання значно перевищує її значення для випадку ламінарного режиму обтікання (наприклад, для використовуваних на практиці [1] діапазонів $u_\infty = 10^3...2 \cdot 10^3$ м/с та $t = 10...15$ с – у 2,4...3,3 разу).

При цьому значення результатів розрахунків з існуючими експериментальними даними показує, що різниця між ними не перевищує 5...7 %.

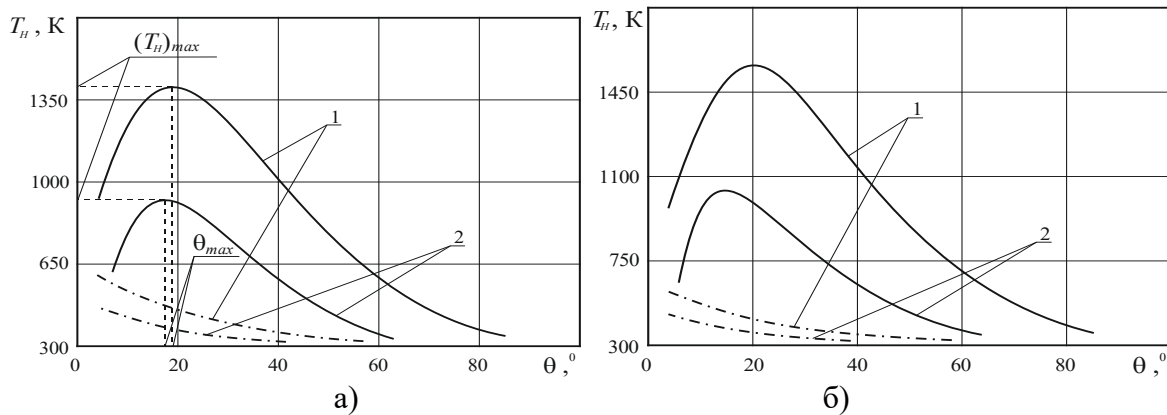


Рисунок 9. Розподіл температури вздовж внутрішньої поверхні півсферичної оболонки заряду суміші на основі $Mg + NaNO_3$ зі сталі 12X18H10T [1] (а) та міді (б) для різних швидкостей обдуву потоком повітря ($T_0 = 300$ К, $R_w = 0,02$ м, $R_H = 0,015$ м, $t = 12$ с): 1 – $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $u_\infty = 10^3$ м/с; — — — — турбулентний режим обтікання; — · — · — · — — ламінарний режим обтікання

Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів на металеві оболонки зарядів сумішей, перевищення яких призводить до їх передчасного займання з подальшим вибухонебезпечним розвитком горіння та пожежонебезпечним руйнуванням виробів. В якості пожежонебезпечних термодій на поверхню металевих оболонок з зарядами сумішей при їх застосуванні (умови пострілу та польоту) приймаються дії, що мають критичні значення швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря ($u_{\infty j}^*$, $j = 1, 2, \dots$) 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 оболонок, що контактують з зарядами сумішей, задовольняють наступним умовам:

$$(T_H)_{max} > T_3^{(i)}, i=1, 2, \dots, \quad (33)$$

де $(T_H)_{max}$ – максимальна температура внутрішньої поверхні оболонки, що контактує з зарядом суміші; $T_3^{(i)}$ – температура, при якій починається саморозігрів заряду i -ої суміші в результаті процесу екзотермічного окиснення металевого пального в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача та добавок органічних та неорганічних речовин (так звана температура займання частинок металів в активних газоподібних продуктах розкладання сумішей, яка суттєво залежить від технологічних параметрів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності)).

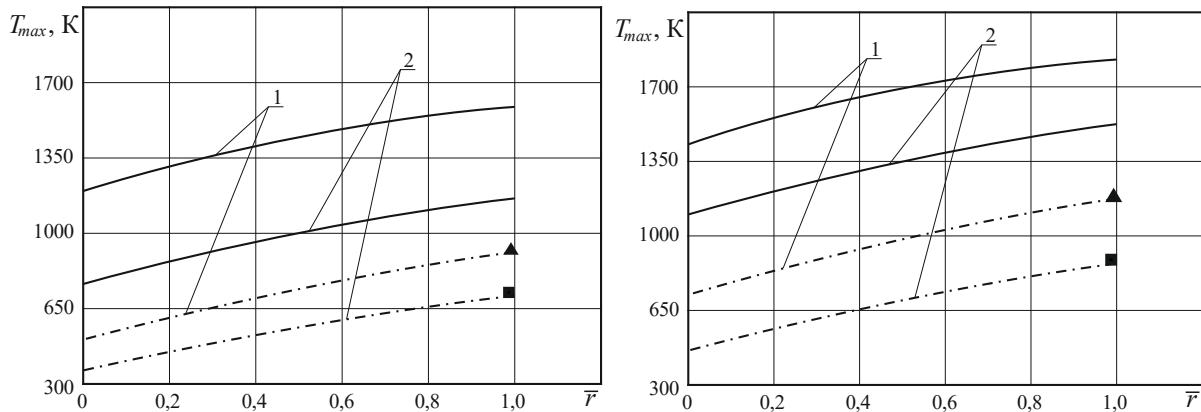


Рисунок 10 – Розподіл максимальної температури по товщині півсферичної оболонки заряду суміші на основі $Mg + NaNO_3$ зі сталі 12X18H10T [1] (а) та міді (б) ($\bar{r} = \frac{r-R_H}{R_w-R_H}$, $T_0 = 300$ К, $R_w = 0,02$ м, $R_H = 0,015$ м, $t = 12$ с): 1 – $u_{\infty} = 2 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $u_{\infty} = 10^3$ м/с; — — — — турбулентний режим обтікання; — · — · — · — · — — ламінарний режим обтікання; ▲, ■ – експериментальні дані [1, 18]

Експериментально було встановлено наступні діапазони зміни температури займання T_3 частинок Mg та Al у активних газоподібних продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та розглядуваних добавок (основний продукт – O_2 (до 50...60 %), інші – N_2 (до 20...30 %), CO та CO_2 (не більше 5...7 %) та ін.), які характерні для подальшого розвитку стійкого, не вибухонебезпечного розвитку їх горіння [1, 2]:

для сумішей на основі $Mg + NaNO_3$:

$$T_3 = 1250 \dots 1530 \text{ К } (56 \text{ мкм} \leq d_m \leq 305 \text{ мкм});$$

для сумішей на основі $Al + NaNO_3$:

$$T_3 = 1370 \dots 1670 \text{ К } (54 \text{ мкм} \leq d_m \leq 310 \text{ мкм}). \quad (34)$$

Порівнюючи вказані вище діапазони зміни температури займання T_3^i ($i = 1, 2, \dots$) частинок Mg та Al у активних газоподібних продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та використовуваних добавок органічних та неорганічних речовин з отриманими діапазонами зміни максимальної температури внутрішньої поверхні півсферичної оболонки, що контактує з зарядом суміші, $(T_H)_{max}$, у відповідності з формулою (33) можна встановити конкретні значення параметрів $u_{\infty j}^*$ та τ_j^* ($j = 1, 2, \dots$), починаючи з яких температура $(T_H)_{max}$ починає перевищувати T_3^i , що вказано в таблиці 2. Таким чином, пожежонебезпечні термоударні впливи на поверхню зарядів сумішей є основною причиною передчасного їх займання та прискорення горіння під металевими оболонками, що призводять до передчасного спрацьовування та пожежовибухонебезпечного руйнування виробів в умовах пострілу та польоту.

Таблиця 2 – Діапазони зміни критичних значень швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря $u_{\infty j}^*$ ($j = 1, 2, \dots$) та часів дії τ_j^* ($j = 1, 2, \dots$) на півсферичну оболонку з різних матеріалів

Суміш \ Параметр	$u_{\infty j}^*$, м/с	τ_j^* , с
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (оболонка мідна)	2·10 ³	$\tau_1^* > 10,3$ при $T_H > (T_3^{Mg})_{min} = 1250$ К
		$\tau_2^* > 12,1$ при $T_H > (T_3^{Mg})_{max} = 1530$ К
	10 ³	$\tau_3^* > 14,2$ при $T_H > (T_3^{Mg})_{min} = 1250$ К
		$\tau_4^* > 15,3$ при $T_H > (T_3^{Mg})_{max} = 1530$ К
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (оболонка сталева)	2·10 ³	$\tau_5^* > 17,6$ при $T_H > (T_3^{Mg})_{min} = 1250$ К
		$\tau_6^* > 18,3$ при $T_H > (T_3^{Mg})_{max} = 1530$ К
	10 ³	$\tau_7^* > 19,4$ при $T_H > (T_3^{Mg})_{min} = 1250$ К
		$\tau_8^* > 21,7$ при $T_H > (T_3^{Mg})_{max} = 1530$ К
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (оболонка мідна)	2·10 ³	$\tau_9^* > 11,8$ при $T_H > (T_3^{Al})_{min} = 1370$ К
		$\tau_{10}^* > 12,7$ при $T_H > (T_3^{Al})_{max} = 1670$ К
	10 ³	$\tau_{11}^* > 15,3$ при $T_H > (T_3^{Al})_{min} = 1370$ К
		$\tau_{12}^* > 16,7$ при $T_H > (T_3^{Al})_{max} = 1670$ К
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (оболонка сталева)	2·10 ³	$\tau_{13}^* > 18,4$ при $T_H > (T_3^{Al})_{min} = 1370$ К
		$\tau_{14}^* > 19,1$ при $T_H > (T_3^{Al})_{max} = 1670$ К
	10 ³	$\tau_{15}^* > 19,9$ при $T_H > (T_3^{Al})_{min} = 1370$ К
		$\tau_{16}^* > 22,3$ при $T_H > (T_3^{Al})_{max} = 1670$ К

Тому важливо на стадії проектування та стендових випробувань виробів, що моделюють вказані зовнішні термоударні дії, вміти прогнозувати критичні значення їх основних параметрів, а також технологічних параметрів, що характеризують заряд суміші та суттєво впливають на температуру займання частинок металів в газоподібних продуктах розкладання сумішей, перевищення яких призводить до передчасного пожежовибухонебезпечного спрацьовування виробів. При цьому збільшення T_3 (наприклад, за рахунок використання більш дрібнодисперсних металевих порошоків) 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 попереджати передчасне спрацьовування виробів поблизу пускових установок, яке призводить до їх пожежонебезпечного руйнування та загибелі обслуговуючого персоналу.

Висновки.

1. В результаті попереднього аналізу передчасного спрацьовування виробів на основі піротехнічних нітратно-металічних сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин в умовах зовнішніх термодій, яким піддаються поверхні їх металевих корпусів при різних екстремальних ситуаціях (наприклад, в умовах ударного нагріву корпусів виробів при їх пострілі та польоті), встановлено, що основною причиною пожежовибухонебезпечного спрацьовування виробів є те, що значні температури нагріву їх металевих корпусів (наприклад, температури їх поверхні при використуванних швидкостях обдуву потоком повітря $5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с лежать в діапазонах 730...1650 К (ламінарний режим обтікання) та 840...1850 К (турбулентний режим обтікання)) можуть істотно перевищувати температури спалахування

розглядуваних частинок металевого пального (магнію та алюмінію) у активних газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача (нітрату натрію), добавок органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, металдегіду, каніфолі, ідитолу) та неорганічних речовин (фторидів металів (LiF, NaF, NiF₂, BaF₂, SiF₂, SrF₂, AlF₃)), що є основними компонентами зарядів піротехнічних сумішей. Це призводить до розвитку процесу горіння заряду піротехнічної суміші під металевим корпусом виробу, тобто в умовах обмеженого об'єму з безперервним збільшенням зовнішнього тиску та температури нагріву суміші компонентів, що веде до прискорення його процесу горіння, переходу його у режим вибухонебезпечного протікання, передчасного спрацьовування виробу та руйнування металевих корпусів, викиду у навколишнє середовище їх високотемпературних залишків, частин суміші, що не згоріли, дисперсних потоків, що іскряться тощо, які є пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів та можуть призводити до ураження людей.

2. Уточнено математичні моделі зовнішніх термоударних впливів надзвукового потоку повітря на півсферичні оболонки зарядів сумішей в умовах запуску та польоту у частині врахування: технологічних параметрів сумішей та їх термомеханічних властивостей; температурних залежностей теплофізичних характеристик сумішей (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності); розподілу зовнішнього теплового потоку вздовж поверхні оболонки в залежності від режиму обтікання (ламінарного, турбулентного), які дозволяють з відносною похибкою 7...9 % визначати розподіли температури вздовж зовнішньої та внутрішньої поверхонь оболонки, що контактує з зарядом суміші, а також по її товщині в залежності від швидкості повітряного потоку для різних режимів обтікання та часу його дії.

3. В результаті проведених теоретичних досліджень зовнішніх ударних термовпливів надзвукового потоку повітря на поверхню металевих півсферичних оболонок зарядів сумішей встановлено наступні нові закономірності:

для циліндричної металевої оболонки

– для ламінарного режиму обтікання максимум зовнішнього теплового потоку знаходиться поблизу її передньої критичної точки ($x=0$, $M = 0$), а для турбулентного режиму обтікання – цей максимум зміщується від $x = 0$ до $x_{max} = (0,53...0,65)L$ (L – довжина оболонки);

– при збільшенні швидкості потоку повітря від $M = 1,5$ до $M = 3,0$ та часу його впливу до 22 с значення максимальної температури зовнішньої поверхні оболонки збільшуються у 2,7...3,5 разу для ламінарного режиму обтікання та у 4,1...5,3 разу – для турбулентного режиму обтікання; при цьому для внутрішньої поверхні оболонки вказане значення температури знижено для ламінарного режиму обтікання у 1,9...2,3 разу, а для турбулентного режиму обтікання – у 2,5...3,1 разу; заміна матеріалу оболонки на більш теплопровідну (сталеву оболонку на мідну) призводить до зростання її температури у 1,4...2,5 разу;

для півсферичної металевої оболонки

– для ламінарного режиму обтікання максимальні значення зовнішнього теплового потоку знаходяться поблизу передньої критичної точки оболонки ($\theta = 0^0$, $u_{\infty} = 0$), а для турбулентного режиму – максимальні значення вказаного потоку вже зміщені від ($\theta = 0^0$ до $\theta_{max} = 18...22^0$ для досліджуваних швидкостей обдуву потоком повітря $5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с;

– збільшення швидкості потоку повітря від 10^3 м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с та часу його впливу до 12 с призводить до зростання максимальної температури зовнішньої поверхні оболонки у 1,3...1,6 разу для ламінарного режиму обтікання та у 2,1...3,7 разу – для турбулентного режиму обтікання; при збільшенні відстані від зовнішньої поверхні оболонки до її внутрішньої поверхні значення максимальної температури

зменшуються у 1,3...1,4 разу; при цьому у випадку турбулентного режиму обтікання значення максимальної температури як на зовнішній поверхні оболонки, так й на її внутрішній поверхні перевищують її значення перевищують для ламінарного режиму обтікання у 2,4...3,3 разу; заміна оболонки на більш теплопровідну (сталеву на мідну) призводить до підвищення максимальної температури поверхонь оболонки у 1,5...2,3 разу.

4. Вперше встановлено існування гранично допустимих діапазонів зміни основних параметрів зовнішніх ударних термодій надзвукового потоку повітря на поверхню півсферичних металевих оболонок зарядів сумішей (швидкості обдуву $u_{\infty j}^*$, часу його впливу τ_j^* ($j = 1, 2, \dots$)), перевищення яких призводить до передчасного саморозігріву зарядів сумішей в результаті процесу екзотермічного окиснення частинок металевих паливних у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача та добавок органічних та неорганічних речовин, що призводить до їх займань, виникнення горіння в замкнутих об'ємах з подальшим його прискоренням та, в кінцевому підсумку, до передчасного спрацьовування та пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів з викидом у навколишнє середовище високотемпературних продуктів згорання.

5. Зіставлення результатів розрахунків температурних полів в металевих корпусах виробів (півсферичні оболонки) при ударних термодіях зовнішнього надзвукового потоку повітря з отриманими експериментальними даними показало, що розроблені математичні моделі на практиці можуть бути використані в якості більш точних методів (відносно похибку знижено до 7...9 % замість 10...15 % – у існуючих методів) для прогнозування небезпечних ділянок на поверхні виробів з максимальними термодіями, де вони піддаються найбільш інтенсивному нагріву; рівнів температур на внутрішній поверхні корпусів виробів, що контактує з зарядами піротехнічних сумішей, та допустимих значень як параметрів зовнішніх термодій, так й технологічних параметрів сумішей шляхом застосування необхідних даних по температурах займання частинок металів в газоподібних продуктах розкладання окиснювача та добавок органічних та неорганічних речовин.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому планується проведення досліджень з розробки методів визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічних виробів на основі нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин в умовах їх зберігання та транспортування (наприклад, при виникненні пожеж у складських приміщеннях, де зберігаються вироби або при їх транспортуванні в умовах зовнішнього конвективного або радіаційного нагріву та ін.), перевищення яких призводить до передчасного спрацьовування виробів та їх пожежонебезпечного руйнування. Це дозволить шляхом регулювання технологічних параметрів сумішей з врахуванням зовнішніх умов попереджати передчасні вибухонебезпечні спрацьовування виробів, виникнення та розповсюдження додаткових осередків пожежі у навколишньому середовищі при екстремальних умовах експлуатації виробів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ващенко В. А. Процеси горіння металізованих конденсованих систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. І. Заїка, І. В. Яценко, В. В. Цибулін. – К.: Наукова думка, 2008. – 745 с.
2. Кириченко О. В. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. – К.: Наукова думка, 2012. – 318 с.
3. Молодик А. В. Досвід та перспективи вирішення теплофізичних проблем створення оптико-електронних спецвиробів ІЧ-техніки / А. В. Молодик, Н. І. Носов, Г.

А. Смоляр, Д. В. Лозбин // Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції “Спеціальне приладобудування: стан та перспективи”. – К.: КП СПБ “Арсенал”. 6 – 7 грудня 2016 р. – С. 54 – 56.

4. Фатєєв В. М. Піротехніка [Текст]: курс лекцій / В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, Л. І. Таборов ; за заг. ред. д-ра юрид. наук, проф. С. С. Чернявського. – Київ, 2017. – 470 с.

5. Звіт про науково-дослідну роботу “Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом”. К.: УкрНДІЦЗ, 2018.

6. Ковалишин В. В. Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, Б. М. Гусар // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи” ДУБЖД, 2018.

7. 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.

8. Kyrychenko O. V. Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko // Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety, 2019. – No. 2 (8). – P. 81 – 85.

9. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Чинний від 01.01.2020. К.: ДП УкрНДНЦ, 2019.

10. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Чинний від 01.01.2020. К.: ДП УкрНДНЦ, 2019.

11. Кириченко О. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, В. В. Цибулін // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2020. – № 2. – С. 123 – 133.

12. 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.

13. 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.

14. Dibrova O. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions / O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk // Technology audit and production reserves, 2020. – № 1/1(51). – P. 44 – 49.

15. Кириченко Є. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металоксидні вироби в умовах пострілу та польоту / Є. Кириченко // Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України “Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація”, 2021. – том 5. – № 2. – С. 37 – 51.

16. Кириченко Є. П. Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металоксидні вироби в умовах експлуатації /

Є. П. Кириченко // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2022. – № 2. – С. 53 – 63.

17. Ващенко В. А. Комплекс експериментальних установок та методик для визначення швидкості та меж горіння металізованих конденсованих систем у динамічних умовах експлуатації / В. А. Ващенко, П. І. Заїка, Д. М. Краснов // Вісник Сумського державного університету, 2001. – № 19. – С. 112 – 124.

18. Ващенко В. А. Комплекс випробувальних установок, що моделюють реальні умови застосування піротехнічних нітратовмісних виробів / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, В. Д. Акіншин, В. В. Цибулин, І. В. Яценко // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки, 2009. – № 1(19). – С. 127 – 137.

19. Ващенко В. А. Теоретичні засади теплотехніки. Курс лекцій/В. А. Ващенко. – Черкаси: ЧДТУ, 2003. – 80 с.

20. Ващенко В. А. Теплові процеси під час електронної обробки оптичних матеріалів та експлуатації виробів на їх основі. Монографія / В. А. Ващенко, Д. І. Котельников, Ю. Г. Лега, Д. М. Краснов, І. В. Яценко, О. В. Кириченко. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с.

REFERENCES

1. Vashchenko V. A. Protsesy horinnia metalizovanykh kondensovanykh system / V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, Yu. H. Leha, P. I. Zaika, I. V. Yatsenko, V. V. Tsybulyn. – K.: Naukova dumka, 2008. – 745 s.

2. Kyrychenko O. V. Osnovy pozhezhnoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv v umovakh zovnishnykh termovplyviv. Monohrafiia / O. V. Kyrychenko, P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, Yu. H. Leha. – K.: Naukova dumka, 2012. – 318 s.

3. Molodyk A. V. Dosvid ta perspektyvy vyrishennia teplofizychnykh problem stvorennia optyko-elektronnykh spetsvyrobiv ICh-tekhniky / A. V. Molodyk, N. I. Nosov, H. A. Smoliar, D. V. Lozbyn // Zbirnyk tez dopovidei 2-yi Ukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii “Spetsialne prykladobuduvannia: stan ta perspektyvy”. – K.: KP SPB “Arsenal”. 6 – 7 hrudnia 2016 r. – S. 54 – 56.

4. Fatieiev V. M. Pirotekhnika [Tekst]: kurs leksii / V. M. Fatieiev, Yu. P. Prykhodko, L. I. Taborov ; za zah. red. d-ra yuryd. nauk, prof. S. S. Cherniavskoho. – Kyiv, 2017. – 470 s.

5. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu “Doslidzhennia tendentsii i zakonomirnosti dynamiky osnovnykh pokaznykiv statystyky pozhezh v Ukraini za terytorialnym pryntsyptom”. K.: UkrNDITsZ, 2018.

6. Kovalyshyn V. V. Vykorystannia ekolohichno pryiniatnykh vohnehasnykh rehovyn / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, T. M. Voitovych, B. M. Husar // Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Ekolohichna bezpeka yak osnova staloho rozvytku suspilstva. Yevropeyskyi dosvid i perspektyvy” DUBZhD, 2018.

7. Kyrychenko O. V. Vyznachennia dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumishei pry yikh ekspluatatsii / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, Ye. O. Tyshchenko, V. V. Tsybulin // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu, 2018. – № 2. – С. 5 – 11.

8. Kyrychenko O. V. Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko // Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety, 2019. – No. 2 (8). – P. 81 – 85.

9. DSTU 8828:2019. Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia. Chynnyi vid 01.01.2020. K.: DP UkrNDNTs, 2019.

10. DSTU 8829:2019. Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia. Chynnyi vid 01.01.2020. K.: DP UkrNDNTs, 2019.

11. Kyrychenko O. V. Vyznachennia krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnikh termichnykh dii / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, V. V. Tsybulin // Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu, 2020. – № 2. – S. 123 – 133.

12. Dibrova O. S. Pidvyschennia pozhezhnoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnikh termichnykh dii / O. S. Dibrova, O. B. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // International Scientific Journal “Intenauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.

13. Dibrova O. S. Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhnu bezpeku pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishei v umovakh zovnishnikh termichnykh dii / O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // International Scientific Journal “Intenauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.

14. Dibrova O. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions / O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk // Technology audit and production reserves, 2020. – № 1/1(51). – P. 44 – 49.

15. Kyrychenko Ye. Doslidzhennia protsesiv zovnishnikh termoudarnykh dii na pirotekhnichni metaloksydni vyroby v umovakh postrilu ta polotu / Ye. Kyrychenko // Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoi bezpeky im. Heroiv Chornobylia Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy “Nadzvychni sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia”, 2021. – tom 5. – № 2. – S. 37 – 51.

16. Kyrychenko Ye. P. Metodyka vyznachennia krytychnykh znachen parametriv zovnishnikh termichnykh dii na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh ekspluatatsii / Ye. P. Kyrychenko // Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu, 2022. – № 2. – S. 53 – 63.

17. Vashchenko V. A. Kompleks eksperymentalnykh ustanovok ta metodyk dlia vyznachennia shvydkosti ta mezh horinnia metalizovanykh kondensovanykh system u dynamichnykh umovakh ekspluatatsii / V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, D. M. Krasnov // Visnyk Sumskoho derzhavnogo universytetu, 2001. – № 19. – S. 112 – 124.

18. Vashchenko V. A. Kompleks vyprobuvalnykh ustanovok, shcho modeliuut realni umovy zastosuvannia pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv / V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, V. D. Akinshyn, V. V. Tsybulyn, I. V. Yatsenko // Naukovyi visnyk Ukrainського naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoi bezpeky, 2009. – № 1(19). – S. 127 – 137.

19. Vashchenko V. A. Teoretychni zasady teplotekhniky. Kurs lektsii/V. A. Vashchenko. – Cherkasy: ChDTU, 2003. – 80 s.

20. Vashchenko V. A. Teplovi protsesy pid chas elektronnoi obrobky optychnykh materialiv ta ekspluatatsii vyrobiv na yikh osnovi. Monohrafiia / V. A. Vashchenko, D. I. Kotelnikov, Yu. H. Leha, D. M. Krasnov, I. V. Yatsenko, O. V. Kyrychenko. – K.: Naukova dumka, 2006. – 368 s.

UDC 614.841:536.46

*Nazarii KOZIAR, PhD in technical sciences (ORCID: 0000-0001-9082-0771),
National University of Civil Protection of Ukraine*

PREVENTION OF PREMATELY FIRE EXPLOSION AND UNSAFE USE OF PYROTECHNIC MIXTURES IN THE CONDITIONS OF SHOT AND FLIGHT

The regularities of the effect of external thermal shock effects of supersonic blowing with an air stream on metal hemispherical shells of charges of nitrate-metallized mixtures with additives of organic and inorganic substances, which are used to equip pyrotechnic products (pyrotechnic IR emitters, elements of rocket and space technology, etc.) have been established. Temperature distributions along the outer and inner shells and along their thickness were studied. The critical values of air blowing speeds and times of its thermal shock effect were determined, exceeding which leads to premature ignition of mixture charges, a sharp acceleration of their combustion under the shells and, ultimately, to fire-explosive destruction of the products.

For the first time, the existence of the maximum permissible ranges of changes in the main parameters of the external shock thermodynamics of the supersonic air flow on the surface of the hemispherical metal shells of mixture charges (blowing speed, time of its influence ($j = 1, 2, \dots$)), exceeding which leads to premature self-heating of the mixture charges as a result the process of exothermic oxidation of metal fuel particles in gaseous products of thermal decomposition of the oxidizer and additives of organic and inorganic substances, which leads to their ignition, the occurrence of combustion in closed volumes with its further acceleration and, ultimately, to premature activation and fire-hazardous destruction of pyrotechnic products with the release of high-temperature combustion products into the environment.

A comparison of the results of calculations of temperature fields in metal cases of products (hemispherical shells) during shock thermodynamics of an external supersonic air flow with the obtained experimental data showed that the developed mathematical models can be used in practice as more accurate methods (the relative error is reduced to 7...9% instead of 10...15% - in existing methods) for predicting dangerous areas on the surface of products with maximum thermal effects, where they are subjected to the most intensive heating; temperature levels on the inner surface of the product bodies, which is in contact with the charges of pyrotechnic mixtures, and the permissible values of both the parameters of external thermodynamics and the technological parameters of the mixtures by applying the necessary data on the ignition temperatures of metal particles in the gaseous decomposition products of the oxidizer and additives of organic and inorganic substances.

Key words: *fire safety, pyrotechnic nitrate-metallized mixtures, gas dynamic processes, methods of the theory of thermal conductivity.*