

УДК 614.841:536.46

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ВПЛИВІВ НА ПІРОТЕХНІЧНІ ВИРОБИ НА ОСНОВІ НІТРАТНО-МЕТАЛЕВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЇХ ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.42-57>

Козяр Н. М., ORCID iD 0000-0001-9082-0771
Кириченко О. В., ORCID iD 0000-0002-0240-1807
Ковбаса В. О., ORCID iD 0 0000-0002-9479-669X
Дядюшенко О. О. *, ORCID iD 0000-0003-0797-2251
Ващенко В. А., ORCID iD 0000-0003-0722-9353
Колінько С. О., ORCID iD 0000-0002-0234-8655
*E-mail: oleksandr_diadiushenko@chipb.org.in

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 27.09.2023
Пройшла рецензування: 16.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежна безпека, піротехнічні вироби, піротехнічні суміші, зовнішні термічні дії, теплові процеси.

АНОТАЦІЯ

Проаналізовано властивості піротехнічних виробів різного призначення (сигнальні та трасувальні засоби, піротехнічні спалахувачі, елементи ракетно-космічної техніки тощо) на основі багатокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих пальних (магнію, алюмінію, алюмінієво-магнієвих сплавів (ПАМ) та інших), нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів тощо) і добавок різних органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, ідитолу тощо) та неорганічних речовин (фторидів металів тощо). Встановлено, що під час зберігання та транспортування вони можуть піддаватись інтенсивним зовнішнім термічним впливам (наприклад у разі пожеж у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, загоряння близько розташованих легкозаймистих об'єктів, у зонах бойових дій тощо), внаслідок чого відбувається передчасне займання зарядів сумішей, що призводить до руйнування виробів з утворенням високотемпературних продуктів згоряння (до 3000...4000 К), які розлітаються у різні боки та мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів (паливно-мастильних матеріалів, дерев'яних будівель, пускових установок з обслуговуючим персоналом тощо). Розроблено математичні моделі зовнішніх термічних впливів на поверхню зарядів нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин для піротехнічних виробів різного призначення в умовах зберігання або транспортування, які враховують геометричну форму зарядів (плоскі пластини, циліндричні стрижні та напівсферичні елементи); термомеханічні властивості та технологічні параметри суміші; температурні залежності теплофізичних властивостей сумішей. Проведено розрахунки розподілів температури у зарядах сумішей та визначено критичні значення зовнішнього теплового потоку та часу його дії, перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей, вибухового розвитку їх горіння та насамкінець до пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів і навколишніх об'єктів.

Потановка проблеми.
Піротехнічні вироби різного призначення (сигнальні та трасувальні засоби,

піротехнічні спалахувачі, елементи ракетно-космічної техніки тощо) на основі багатокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих пальних (магнію,

алюмінію, алюмінієво-магнієвих сплавів (ПАМ) та інших), нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів тощо) і добавок різних органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, ідитулу та інших) та неорганічних речовин (фторидів металів тощо) у разі зберігання та транспортування можуть піддаватись інтенсивним зовнішнім термічним впливам (наприклад, під час пожеж у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, загорання близько розташованих легкозаймистих об'єктів, у зонах бойових дій тощо) [1–6].

Унаслідок зазначеного відбувається передчасне займання зарядів сумішей, що призводить до руйнування виробів з утворенням високотемпературних продуктів згорання (до 3000...4000 К), які розлітаються у різні боки та мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів (паливно-мастильних матеріалів, дерев'яних будівель, пускових установок з обслуговуючим персоналом тощо) [7–17].

З огляду на зазначене суттєвого практичного значення набуває попередження вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій. Водночас вони мають ґрунтуватись на наукових методах визначення критичних значень параметрів термічних впливів на вироби та технологічних параметрів зарядів сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення суміші, діаметра та висоти заряду тощо), перевищення яких призводить до передчасних пожежонебезпечних руйнувань виробів.

Нині достатньо повно досліджено математичні моделі зовнішніх термічних впливів та розроблено методи розрахунку критичних значень їх параметрів (теплових потоків, часу їх дії) тільки для двокомпонентних піротехнічних сумішей на основі порошків кисневмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 , NiO , CuO та ін.) та металевих паливних (Mg , Al , ПАМ, Ti , Zr та ін.) [2; 7; 11–12; 14; 16–17]. Зокрема,

встановлено розподіли температури за товщиною зарядів сумішей залежно від величини теплового потоку та часу його дії; через зіставлення температури поверхні заряду суміші (максимальна температура його нагріву) з температурою займання частинок металевого пального у газоподібних продуктах розкладання сумішей визначено критичні значення параметрів зовнішніх термовпливів; водночас враховано вплив на температуру займання вказаних технологічних параметрів сумішей. Що ж до розглянутих багатокомпонентних сумішей, технологічні параметри та теплофізичні властивості яких суттєво відрізняються від вказаних двокомпонентних сумішей [12; 14], то на сьогодні такі дослідження для них не проводили.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження безпеки піротехнічних виробів та їх пожежонебезпечних властивостей здійснюються у різних країнах. У роботі [18] розглянуто різні піротехнічні склади, що використовуються в VIS та IR трасувальних боєприпасах для покращення необхідного оптичного ефекту. Ці суміші призначені для позначення напрямку кулі. Термічну поведінку композицій визначали за допомогою тестів диференціального теплового аналізу. Крім того, спектральний аналіз і візуальні дослідження були використані для оцінки світловіддачі та енергії випромінювання згорання індикатора та встановлення ефективності композицій. Оскільки кожна добре відома суміш індикаторів, яку протестували, потребувала оптимізації, повідомлено про нову та покращену конфігурацію складу VIS та IR. Отже, оптимальна піротехнічна суміш VIS та IR для трасувальних боєприпасів вибрана з огляду на час їхнього горіння, середньої сили світла та температури горіння.

У роботі [19] зазначено, що пожежа на піротехнічному складі може призвести до одночасного ініціювання предметів, що зберігаються, незалежно від їх категорії ризику, створюючи ударну хвилю,

спричинену тиском випущеного газу. Протягом історії в магазинах піротехніки траплялися нещасні випадки. Це свідчить про високу небезпеку піротехніки через її займистість. Через брак глобального чи європейського законодавства стосовно вказівок щодо проектування сховищ піротехніки та пов'язаної з цим оцінки ризику це дослідження спрямоване на аналіз наслідків пожежі у сховищах піротехніки та встановлення можливих у всьому світі ефективних заходів запобігання та захисту для зменшення ризику вибуху та уникнення нещасних випадків у майбутньому. Спостережувані наслідки та відбитий тиск (тиск, вимірний, коли хвиля падає перпендикулярно на перетворювач), вимірний під час випробувань на вогонь на піротехнічному складі, вказують на необхідність мінімізації можливого виникнення пожеж. Обмеження гранично допустимого навантаження з урахуванням об'єму сховища (кг/м^3) знижує тяжкість наслідків у разі аварії. Однак максимально допустимі рівні повинні бути дуже низькими, щоб зробити їх використання для роздрібної торгівлі піротехнічними виробами нерентабельним. Це може бути вирішено у разі використання систем автоматичного виявлення пожежі та пожежогасіння з високою охолоджувальною здатністю, щоб запобігти поширенню на сусідні пакування завдяки швидкому виявленню.

Методи дослідження. Для дослідження впливу підвищених температур нагріву (до 800 К) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па) на процеси займання та розвитку горіння піротехнічних виробів використовувались [3]: сучасні методи фізико-хімічного аналізу (методи кінозйомки та мікрокінозйомки, методи рентгеноструйного аналізу, безконтактні та контактні методи виміру температури), методи нелінійної теплопровідності та термостійкості, а також математичного та експериментально-статистичного моделювання, математичного й експериментально-статистичного моделювання, стандартне піротехнічне

обладнання для випробування зразків піротехнічних виробів за вказаних умов.

Розрахунки за моделями проведені у режимі реального часу та діалогу на засобах комп'ютерної техніки, що задовольняють сучасні вимоги щодо використання спеціального програмного забезпечення.

Формулювання цілей дослідження. Метою цієї роботи є уточнення математичних моделей зовнішніх термічних впливів на заряди піротехнічних нітратно-металізованих сумішей в умовах їх зберігання або транспортування, а також проведених теоретико-експериментальних досліджень зовнішніх термічних впливів на поверхню зарядів сумішей та пожежовибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних виробів під час їх зберігання або транспортування.

Виклад основного матеріалу. Нижче наведено результати теоретичних досліджень температури на поверхнях зарядів сумішей різної геометричної форми (плоскі пластини, циліндричні стрижні, напівсферичні елементи, пластини подвійної кривизни) (рис. 1).

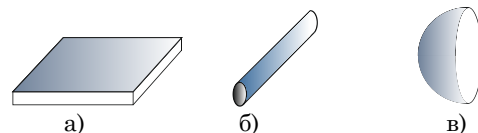


Рисунок 1 – Загальний вигляд зарядів сумішей загальнопромислових піротехнічних виробів (феєрверкові петарди та зірки, освітлювальні, сигнальні та імітувальні засоби тощо) [1–2]: плоскі пластини (а), циліндричні стрижні (б), напівсферичні елементи (в)

Розроблено (узагальнено) авторами

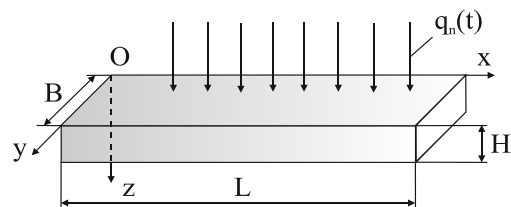


Рисунок 2 – Схема нагрівання плоскої пластини зовнішньою тепловою дією: B , H , L – ширина, товщина та довжина пластини, м; $B < L$, $H < B$; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м^2 .

Розроблено (узагальнено) авторами

Математична модель нагріву плоскої пластини. Під час зовнішньої теплової дії на поверхню пластини надходить рівномірно розподілений тепловий потік $q_n(t)$ (рис. 2). Водночас розглядається пластина, для якої $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (одномірність розподілу тепла углиб пластини), а також глибина зони термодії $\delta \approx H$ ($\delta = 2 \cdot \sqrt{a^2 \cdot \tau}$, де a^2 – коефіцієнт теплопровідності суміші (m^2/c);

τ – час зовнішньої теплової дії, с), тобто враховується теплообмін на нижньому боці пластини. Також вважається, що тепловтрати через випромінювання знехтувано малі (внаслідок малих значень температури поверхні заряду (не більше 1100...1300 К [1–2])).

Таким чином, розглядається така одномірна, нестационарна та нелінійна математична модель поверхневого нагріву пластини:

$$C_V(T(z, t)) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T(z, t)) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right), \quad 0 < z < H, t > 0, \quad (1)$$

$$T(z, t)|_{t=0} = T_0, \quad (2)$$

$$\lambda(T(z, t)) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = q_n(t), \quad (3)$$

$$\lambda(T(z, t)) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (4)$$

де $T(z, t)$ – температура в різних точках z по товщині пластини в різні моменти часу t , T_0 – початкова температура пластини, К.

Для знаходження розв'язку задачі (1) – (4) врахуємо залежності об'ємної теплоємності $C_V(T)$ і коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$ сумішей [1–2]:

$$C_V(T) = C_{V0} \cdot T^\nu, \quad \lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^\nu, \quad (5)$$

де C_{V0} , λ_0 , ν – емпіричні константи.

Зробимо заміну змінних

$$\theta(z, t) = T(z, t)^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad (6)$$

Одержуємо систему рівнянь

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2}, \quad (7)$$

$$\theta(z, t)|_{t=0} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \bar{q}_n(t), \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (10)$$

$$\text{де } \bar{q}_n = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t), \quad a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}}. \quad (11)$$

Для розв'язання системи рівнянь (7) – (11) використовуємо стандартне косинус-перетворення Фур'є та у підсумку отримуємо для функції $\theta(z, t)$ такий вираз:

$$\theta(z, t) = \bar{q}_n \cdot \left[\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + 2H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot t} \right]. \quad (12)$$

$$\text{Враховуючи (6) та } \bar{q}_n = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_{n0} \quad (q_{n0} = \text{const}),$$

остаточно отримуємо

$$T(z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0}}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (13)$$

Математична модель нагріву циліндричного стрижня. Розглядаються суцільні протяжні циліндричні стрижні з

радіусом R ($R \ll D$ – довжина циліндричного стрижня) із сумішей (рис. 3). Для значень R , які

використовуються на практиці ($R = (10...30) \cdot 10^{-3}$ м), виконується умова $R \gg \delta = 2\sqrt{a_0^2 \cdot \tau}$, тобто глибина проникнення теплової хвилі у стрижень набагато менша за його радіус. Тоді цей елемент можна розглядати як необмежений циліндр, бокова поверхня якого нагрівається тепловим потоком $q_n(t)$. Вважається, що здійснюється рівномірний нагрів поверхні стрижня, тоді $\frac{\partial T}{\partial \phi} = \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0$. Водночас тепловіддача внаслідок конвекції та радіації не враховується.

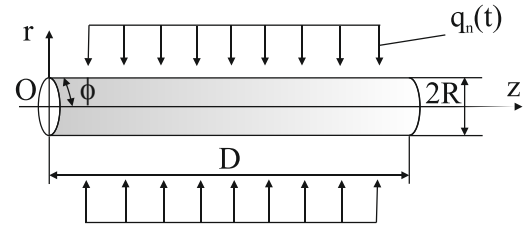


Рисунок 3 – Схема нагрівання циліндричного стрижня зовнішньою тепловою дією: R, D – радіус та довжина стрижня, м; $q_n(t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²; r, z, ϕ – циліндричні координати
Розроблено (узгалянено) авторами

Рівняння математичної моделі поширення тепла у необмеженому циліндричному стрижні мають вигляд :

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda(T) \cdot T], \quad t > 0, 0 < r < R, \quad (14)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (15)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_n(t), \quad (16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad T|_{r=0} \neq \infty, \quad (17)$$

де $T(r,t)$ – поточна температура залежно від радіуса та часу.

Із урахуванням $C_V(T)$ та $\lambda(T)$ (див. (5)) отримуємо

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial r} \right), \quad (18)$$

Із використанням відомих вище методів інтегральних перетворень (перетворення Лапласа по змінній r) та з урахуванням співвідношення $\tilde{q}_n(t) = const$ отримуємо розв'язок системи (18) – (21), як :

$$\tilde{\theta}(r, t) = \tilde{q}_n \cdot R \cdot \left[\frac{2a_0^2 \cdot t}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot I_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n^2 \cdot I_0(\mu_n)} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R} \right)^2 \cdot t} \right], \quad (24)$$

де μ_n – корні характеристичного рівняння $I_1(\mu) = 0$; I_0, I_1 – функції Беселя відповідно нульового та першого порядку.

Із урахуванням (22), (23) та $q_n(t) = q_{n0} = const$ отримуємо:

$$T(r, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot q_{n0} \cdot R}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{2a_0^2 \cdot t}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot I_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n^2 \cdot I_0(\mu_n)} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R} \right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}}, \quad (25)$$

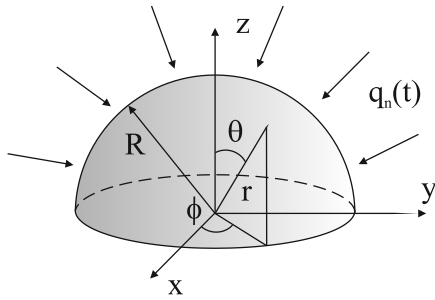


Рисунок 4 – Схема нагрівання напівсферичного елемента зовнішньою тепловою дією: R_w – радіус елемента, м; $q_n(t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²; r, θ, ϕ – сферичні координати
Розроблено (узагальнено) авторами

Ряд у виразі (25) достатньо швидко сходиться, тому для практичних розрахунків обмежуються декількома членами ряду (звичайно у межах 5 або 6). Для проведення розрахунків функції Беселя $I_0(\mu_n)$, $I_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right)$ з високим ступенем точності (відносна похибка не

Рівняння математичної моделі поширення тепла у напівсферичному елементі мають вигляд :

$$\frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \bar{T}(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R_w, \quad t > 0 \quad (26)$$

$$\bar{T}|_{t=0} = f(r), \quad (27)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right|_{r=R_w} = \frac{1}{\lambda} \cdot q_n(t), \quad (28)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (29)$$

де $\bar{T} = T^{\nu+1}$, $f(r)$ – деякий початковий розподіл температури по товщині обтічника; $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\nu+1}$ (з урахуванням (5)).

Для розв’язання задачі (26) – (29) використовуємо кінцеве інтегральне перетворення Фур’є [22–23]:

$$r \cdot \bar{T}(r, t) \rightarrow F_p(p, t) = \int_0^{R_w} r \cdot \bar{T}(r, t) \cdot \frac{\sin(p,r)}{p} dr, \quad (30)$$

де значення параметра p знаходяться з рівняння:

$$\sin(p \cdot R_w) - p \cdot R_w \cdot \cos(p, r) = 0. \quad (31)$$

перевищує $10^{-5}\%$) апроксимуються поліномами [24–25].

Математична модель нагріву напівсферичного елемента. Розглядаються суцільні напівсферичні елементи з радіусом R_w (рис. 4). Для використовуваних на практиці значень R_w ($R_w = (20 \dots 60) \cdot 10^{-3}$ м) виконується умова $R_w \gg \delta = 2 \cdot (a_0^2 \cdot \tau)^{\frac{1}{2}}$, тобто глибина проникнення теплової хвилі в елемент набагато менше його радіуса, тоді його можна розглядати як симетричний сферичний елемент, зовнішня поверхня якого нагрівається тепловим потоком $q_n(t)$. Розглядається тепловий потік, який рівномірно розподілений по зовнішній поверхні зразка ($\frac{\partial T}{\partial \phi} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$). В цьому разі ми маємо симетричне відносно центра сфери температурне поле $T(r, t)$, тобто температурні поля верхньої та нижньої напівсфер однакові. Вважається, що конвективні та радіаційні тепловтрати знехтувано малі.

Зворотний перехід від зображення $F_p(p, t)$ до його оригіналу $\bar{T}(r, t)$ здійснюється за формулою

$$F_p(p, t) \rightarrow \bar{T}(r, t) = \frac{3}{R_w^3} \cdot F_p(0, t) + \frac{2}{R_w} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n}{\sin^2(p_n \cdot R_w)} \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{r} \cdot F_s(p, t). \quad (32)$$

Застосуємо перетворення (30) і врахуємо умову (29), тоді отримаємо розв'язок, як:

$$\begin{aligned} \bar{T}(r, t) = & \frac{3}{R_w^3} \cdot \int_0^{R_w} r^2 \cdot f(r) \cdot dr + \frac{3 \cdot a_0^2}{\lambda \cdot R_w} \cdot \int_0^t q_{II}(\tau) \cdot d\tau + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n}{\sin^2(p_n \cdot R_w)} \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{p_n} \cdot e^{-a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot t} \cdot \frac{2}{R_w} \cdot \int_0^{R_w} r \cdot f(r) \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{p_n} \cdot dr + \\ & + \frac{a_0^2}{\lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_w p_n \cdot \sin(p_n \cdot R_w)}{p_n \cdot \sin^2(p_n \cdot R_w)} \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{r} \cdot e^{-a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot t} \cdot \frac{2}{R_w} \cdot \int_0^t q_{II}(\tau) \cdot e^{a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot \tau} \cdot d\tau. \quad (33) \end{aligned}$$

Позначаючи $\mu_n = p_n \cdot R_w$ та використовуючи рівняння

$$\sin \mu = \mu \cdot \cos \mu, \quad (34)$$

розв'язками якого є нескінченний ряд чисел $\mu_1 = 7,7251$; $\mu_2 = 10,9037$; $\mu_3 = 14,0656$; $\mu_4 = 17,2203$, остаточно отримуємо розв'язок:

$$\begin{aligned} \bar{T}(r, t) = & \frac{3}{R_w^3} \cdot \int_0^{R_w} r^2 \cdot f(r) \cdot dr + \frac{3 \cdot a_0^2}{\lambda \cdot R_w} \cdot \int_0^t q_{II}(\tau) \cdot d\tau + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot R_w}{\mu_n^2 \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \frac{\mu_n \cdot \sin\left(\frac{\mu_n \cdot r}{R_w}\right)}{r} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot t} \cdot \\ & \int_0^t q_{II}(\tau) \cdot e^{\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot \tau} \cdot d\tau. \quad (35) \end{aligned}$$

Для випадку (реалізованого на практиці), що розглядається, якщо

$$T(r, 0) = f(r) = T_0, \quad q_{II}(t) = q_{II0} = const, \quad (36)$$

одержуємо такий розв'язок розглядуваної задачі:

$$T(r, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{q_{II0} \cdot R_w \cdot (v+1)}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{3 \cdot a_0^2 \cdot t}{R_w^2} - \frac{3 \cdot R_w^2 - 5 \cdot r^2}{10 \cdot R_w^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \frac{R_w \cdot \sin\left(\frac{\mu_n \cdot r}{R_w}\right)}{r \cdot \mu_n} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}} \quad (37)$$

Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів, перевищення яких призводить до передчасного займання та вибухонебезпечного розвитку горіння зарядів сумішей та пожежонебезпечного руйнування виробів. Отримані формули (15), (25) та (37) за допомогою відомих фізико-технічних характеристик сумішей, а також стандартного програмного забезпечення [1] дають змогу проводити розрахунки в діалоговому режимі та режимі реального часу на сучасних ПК розподілів температур у поверхневих

шарах широкого класу зарядів багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей різної геометричної форми та розмірів (плоскі пластини, циліндричні стрижні, напівсферичні елементи) залежно від основних параметрів зовнішніх термодій (величини теплового потоку q_{II} та часу його дії t), яким можуть піддаватись піротехнічні вироби за їх зберігання та транспортування (наприклад, в умовах пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби або під час їх транспортування в умовах

займання навколишніх палих матеріалів з високими температурами полум'я (табл. 1)).

Унаслідок проведених досліджень (рис. 5–7) встановлено, що зростання теплового потоку q_n від $1,9 \cdot 10^5$ Вт/м² до $3,6 \cdot 10^6$ Вт/м² призводить до зростання температури поверхні заряду T_n (максимальної температури у разі поверхневого нагрівання сумішей) у 5...6 разів, у разі часу термічного впливу $t = 40 \dots 50$ с, а за $t \geq 60 \dots 70$ с відбувається різке зростання T_n (більше ніж у 10...20 разів).

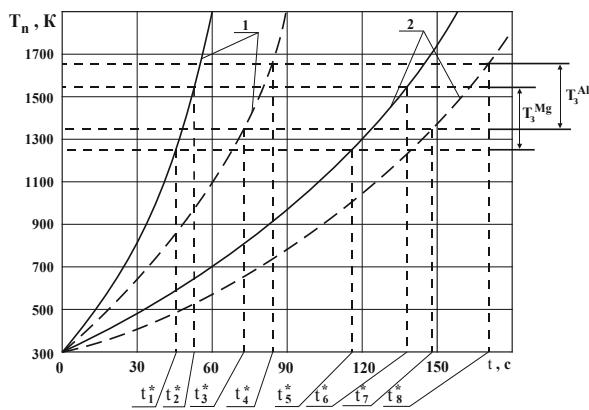


Рисунок 5 – Залежності температури поверхні заряду суміші як плоскої пластини від зовнішнього теплового потоку q_n та часу його дії t : 1 – $q_n = 3,6 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,9 \cdot 10^5$ Вт/м²; ——— – суміш на основі Mg + NaNO₃; - - - - - Al + NaNO₃

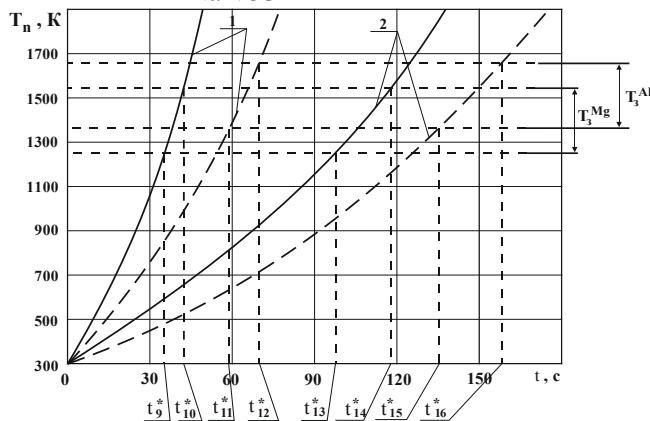


Рисунок 6 – Залежності температури поверхні заряду суміші як циліндричного стрижня від зовнішнього теплового потоку q_n та часу його дії t : 1 – $q_n = 3,6 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,9 \cdot 10^5$ Вт/м²; ——— – суміш на основі Mg + NaNO₃; - - - - - Al + NaNO₃

Розроблено (узагальнено авторами)

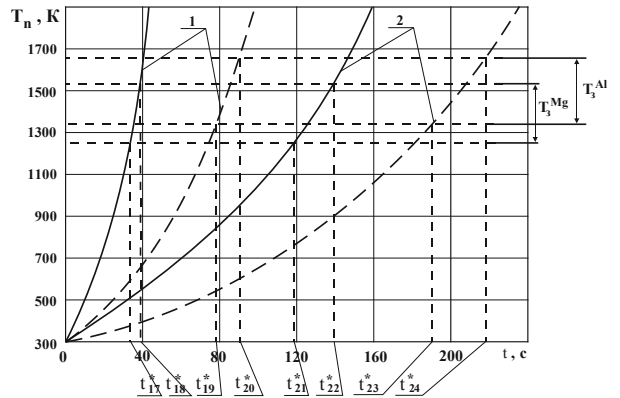


Рисунок 7 – Залежності температури поверхні заряду суміші як напівсферичного елемента від зовнішнього теплового потоку q_n та часу його дії t : 1 – $q_n = 3,6 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,9 \cdot 10^5$ Вт/м²; ——— – суміш на основі Mg + NaNO₃; - - - - - Al + NaNO₃

Розроблено (узагальнено) авторами

Як пожежонебезпечні термодії на поверхню піротехнічних виробів на основі розглядуваних нітратно-металізованих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування беруться дії, що мають критичні значення параметрів (значення зовнішніх теплових потоків від одиничних джерел тепла (q_{nj}^* , $j = 1, 2, \dots$) та часу їх теплового впливу (t_j^* , $j = 1, 2, \dots$), за яких температури поверхонь зарядів сумішей задовольняють такі умови:

$$T_n > T_3^i, \quad i=1, 2, \dots, \quad (38)$$

де T_n – температура поверхні заряду суміші; T_3^i – температура, за якої починається саморозігрів заряду i -ї суміші внаслідок процесу екзотермічного окиснення металевого пального у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача та добавок розглядуваних речовин (так звана температура займання T_3 частинок металів у активних газоподібних продуктах [1; 8; 17]), яка залежить від технологічних параметрів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності) та зовнішніх умов (температури, тиску навколишнього середовища).

Невиконання умов (38) призводить до швидкого займання заряду суміші (в межах $10^{-3} \dots 10^{-2}$ с) з подальшим прискоренням процесу його горіння в умовах зростаючих температур нагріву та зовнішніх тисків, що спричиняє передчасне спрацьовування та пожежонебезпечне руйнування виробів та викид у навколишнє середовище

високотемпературних (до 3000...4000 К [1–2]) конденсованих продуктів згоряння (високотемпературного конденсату), а також нагрітих частин зарядів, що не згоріли, які здатні спалахувати та руйнувати навколишні об'єкти [1–2; 5].

Таблиця 1 Значення температур полум'я та ступені їх чорноти основних палих матеріалів [1–2]

№	Пальний матеріал	Температура полум'я, К	Ступінь чорноти
1	Торф, мазут	1273	0,88
2	Деревина, буре вугілля, сира нафта, дизельне паливо, тракторний гас	1373...1423	0,6
3	Кам'яне вугілля, каучук та вироби з нього, бензин	1473...1523	0,9
4	Антрацит, сірка	1573	0,6
5	Горючі гази	1773...1973	0,7
6	Метали	> 2373...2623	0,45

Примітка. Діапазон зміни зовнішнього теплового потоку $q_n = 1,9 \cdot 10^5 \dots 3,6 \cdot 10^6$ Вт/м².

Аналіз досліджень поведінки компонентів розглядуваних сумішей в умовах підвищених температур нагріву дають змогу встановити такі особливості високотемпературного окиснення та займання частинок Mg та Al в активних окиснювальних середовищах (O₂, O₂ + N₂, CO, CO₂ та ін.), які є основними газоподібними продуктами розкладання NaNO₃ та розглядуваних добавок за температур, притаманних к-фазі сумішей за умов горіння (1100...1300 К) [1–2]. Добавки неорганічних речовин (фториди металів) за вказаних температур не розкладаються та є практично інертними [1]. Процес їх розкладання та участь у хімічних реакціях відбувається вже у зоні полум'я та суттєво впливають на температуру продуктів згоряння сумішей та вміст у них високотемпературного конденсату. Крім цього, встановлено, що основним активним газоподібним продуктом розкладання сумішей є O₂ (відносна масова концентрація C_{O₂} = 0,4...0,5), а решта активних газоподібних продуктів розкладання сумішей становлять

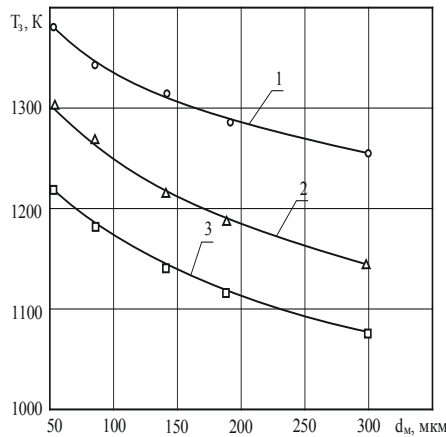
соті частки C_{O₂} та не надають суттєвого впливу на T₃ⁱ. Наявні дані є обмеженими та не дають змоги комплексно оцінювати вплив на T₃ⁱ таких важливих параметрів, як середній розмір частинок металевих пального (d_m, мкм), відносний масовий вміст кисню у газоподібних продуктах розкладання сумішей (C_{O₂}) та тиск навколишнього середовища (P, Па), що характеризують їх здатність до прискорення процесу займання та розвитку горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків [1–2].

Унаслідок проведених досліджень встановлено, що для використовуваних на практиці діапазонів зміни розглядуваних параметрів (d_m, C_{O₂}, P) процеси займання частинок металів протікають стабільно та не мають вибухового характеру. Усі дослідження проводились на стандартному піротехнічному обладнанні з використанням відомих методик [1]. За температуру займання (T₃, К) частинок металів у газоподібному середовищі, що нагріваються, брали їх мінімальну температуру, за якої починався процес їх горіння. Крім цього, зміна вказаних керованих параметрів суттєво впливає на характер поведінки температури займання частинок металів: збільшення d_m і C_{O₂} призводить до зменшення T₃ відповідно у 1,2...1,3 раза та у 1,1...1,2 раза (для частинок Mg); у 1,15...1,2 раза та у 1,2...1,25 раза (для частинок Al), а збільшення P – до зростання T₃ у 1,25...1,35 раза (для частинок Mg) та у 1,2...1,25 раза (для частинок Al) (рис. 8–10).

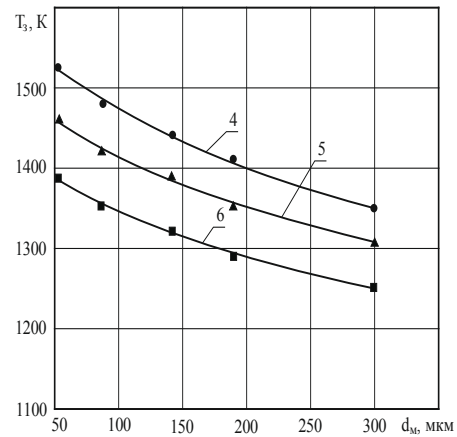
Отримані експериментальні дані (рис. 8–10) дали змогу встановити діапазони змін температури займання частинок металів у газоподібних продуктах термічного розкладання сумішей: T₃ = 1250...1530 К – для частинок магнію (54 ≤ d_m ≤ 305 мкм; 0,4 ≤ C_{O₂} ≤ 0,6; 10⁵ ≤ P ≤ 10⁷ Па); T₃ = 1370...1680 К – для частинок алюмінію (54 ≤ d_m ≤ 310 мкм; 0,4 ≤ C_{O₂} ≤ 0,6; 10⁵ ≤ P ≤ 10⁷ Па).

Порівнюючи отримані вище діапазони температури $T_{п}$ із вказаними діапазонами зміни температур T_3^i , можна встановити, що, дійсно, тільки за певних значень розглядуваних параметрів зовнішніх термодій ($q_{пj}^*$ ($j = 1, 2, \dots$) та t_j^* ($j = 1, 2, \dots$)) значення температури $T_{п}$

починають перевищувати T_3^i (рис. 7–9). Зокрема, з результатів, наведених на рис. 6–8, випливає, що пожежонебезпечні термодії на поверхню зарядів сумішей визначаються природою сумішей та геометричною формою їх зарядів (табл. 2).



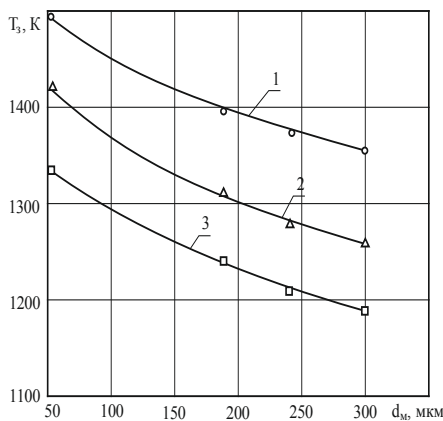
а)



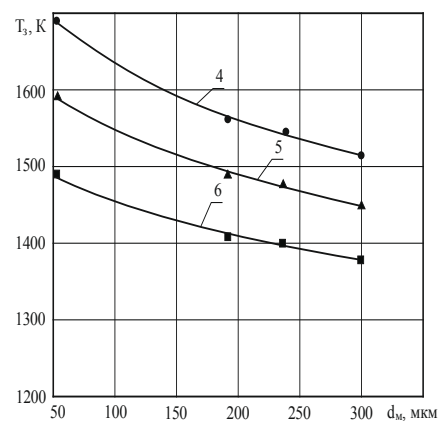
б)

Рисунок 8 – Вплив відносної масової концентрації кисню (а) та зовнішнього тиску (б) на залежність температури займання частинки магнію у газоподібних продуктах розкладання сумішей від її середнього розміру: а) – вплив C_{O_2} ($P = 10^5$ Па); 1 – $C_{O_2} = 0,4$; 2 – $C_{O_2} = 0,5$; 3 – $C_{O_2} = 0,6$; б) – вплив P ($C_{O_2} = 0,4$); 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па; \circ , \bullet , Δ , \blacktriangle , \blacksquare , \square – експериментальні дані

Зіставлення отриманих розрахункових значень параметрів $q_{пj}^*$ та t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) з отриманими експериментальними даними (рис. 11–13) показує, що відмінності між ними не перевищують 6...8%.



а)



б)

Рисунок 9 – Вплив відносної масової концентрації кисню (а) та зовнішнього тиску (б) на залежність температури займання частинки алюмінію у газоподібних продуктах розкладання сумішей від її середнього розміру: а) – вплив C_{O_2} ($P = 10^5$ Па); 1 – $C_{O_2} = 0,4$; 2 – $C_{O_2} = 0,5$; 3 – $C_{O_2} = 0,6$; б) – вплив P ($C_{O_2} = 0,4$); 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па; \circ , \bullet , Δ , \blacktriangle , \blacksquare , \square – експериментальні дані

Розроблено (узгальнено) авторами

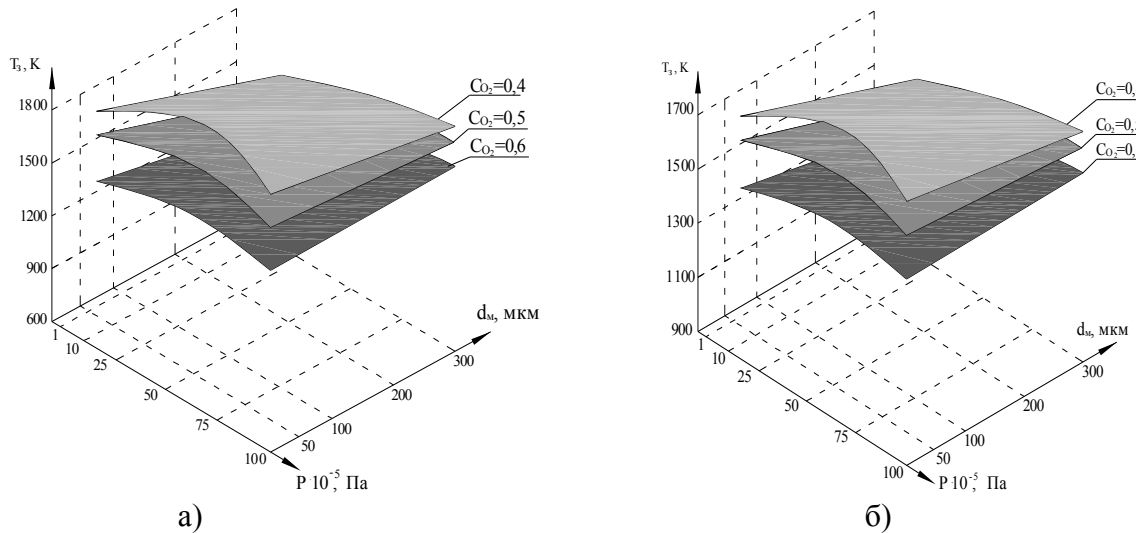


Рисунок 10 – Зображення залежностей температури займання частинок магнію (а) та алюмінію (б) у газоподібних продуктах розкладання сумішей від C_{O_2} , d_m та P

Нагрів зарядів сумішей, що призводить до їх спрацьовування здійснювався на стандартному піротехнічному обладнанні [1] з використанням керованого ГЧ-нагріву кварцовими лампами типу

Розроблено (узагальнено) авторми КГМ-220-1000-1 із застосуванням РИФ-101 для контролю температури на поверхні суміші в діапазоні 300...1900 К та зовнішніх теплових потоків в діапазоні $10^5 \dots 10^7$ Вт/м² [2].

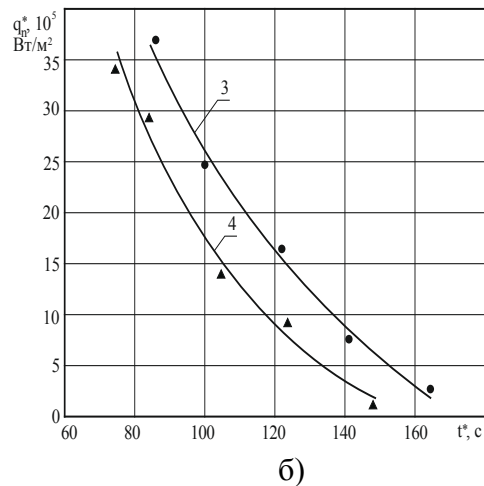
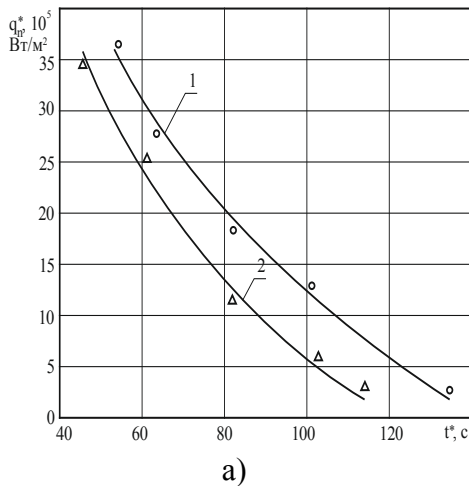


Рисунок 11 – Залежності $q_n^*(t^*)$ заряду суміші на основі Mg + NaNO₃ (а) та Al + NaNO₃ (б) як плоскої пластини ($C_{O_2} = 0,6$; $P = 10^5$ Па): 1 – $d_m = 54$ мкм (Mg); 2 – $d_m = 305$ мкм (Mg); 3 – $d_m = 56$ мкм (Al); 4 – $d_m = 310$ мкм (Al); ——— розрахункова крива; ○, ●, △, ▲ – експериментальні дані

Розроблено (узагальнено) авторами

Нагрів зарядів сумішей, що призводить до їх спрацьовування здійснювався на стандартному піротехнічному обладнанні [1] з використанням керованого ГЧ-нагріву кварцовими лампами типу

КГМ-220-1000-1 з застосуванням РИФ-101 для контролю температури на поверхні суміші в діапазоні 300...1900 К та зовнішніх теплових потоків в діапазоні $10^5 \dots 10^7$ Вт/м² [2].

Таблиця 2 Діапазони зміни критичних значень зовнішніх теплових потоків q_{nj}^* ($j = 1, 2, \dots$) та часів їх дії t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) на заряди сумішей різної геометричної форми

Суміш \ Параметр	q_{nj}^* , Вт/м ²	t_j^* , с
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (заряд у вигляді плоскої пластини)	3,6·10 ⁶	$t_1^* > 47$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
		$t_2^* > 53$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
	1,9·10 ⁵	$t_5^* > 113$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
		$t_6^* > 135$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (заряд у вигляді циліндричного стрижня)	3,6·10 ⁶	$t_9^* > 32$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
		$t_{10}^* > 43$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
	1,9·10 ⁵	$t_{13}^* > 96$ при $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
		$t_{14}^* > 119$ при $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (заряд у вигляді напівсферичного елемента)	3,6·10 ⁶	$t_{17}^* > 35$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
		$t_{18}^* > 39$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
	1,9·10 ⁵	$t_{21}^* > 117$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
		$t_{22}^* > 141$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (заряд у вигляді пластини подвійної кривизни)	3,6·10 ⁶	$t_{25}^* > 49$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
		$t_{26}^* > 61$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
	1,9·10 ⁵	$t_{29}^* > 137$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
		$t_{30}^* > 163$ за $T_n > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (заряд у вигляді плоскої пластини)	3,6·10 ⁶	$t_3^* > 72$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
		$t_4^* > 84$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ К
	1,9·10 ⁵	$t_7^* > 143$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
		$t_8^* > 162$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ К
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (заряд у вигляді циліндричного стрижня)	3,6·10 ⁶	$t_{11}^* > 59$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
		$t_{12}^* > 74$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ К
	1,9·10 ⁵	$t_{15}^* > 135$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
		$t_{16}^* > 158$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ К
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (заряд у вигляді напівсферичного елемента)	3,6·10 ⁶	$t_{19}^* > 78$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
		$t_{20}^* > 92$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ К
	1,9·10 ⁵	$t_{23}^* > 183$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
		$t_{24}^* > 215$ за $T_n > (T_3^{Al})_{\max} = 1680$ К

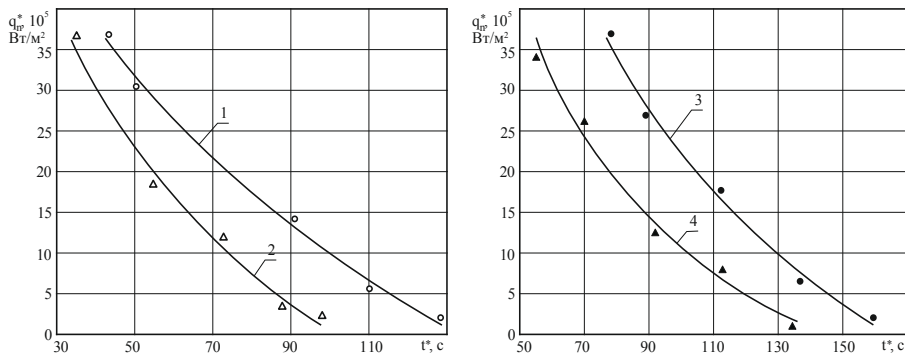


Рисунок 12 – Залежності $q_n^*(t^*)$ заряду суміші на основі Mg + NaNO₃ (а) та Al + NaNO₃ (б) у вигляді циліндричного стрижня ($C_{O_2} = 0,6$; $P = 10^5$ Па): 1 – $d_M = 54$ мкм (Mg); 2 – $d_M = 305$ мкм (Mg); 3 – $d_M = 56$ мкм (Al); 4 – $d_M = 310$ мкм (Al); ——— розрахункова крива; ○, ●, △, ▲ – експериментальні дані.
Розроблено (узагальнено) авторами

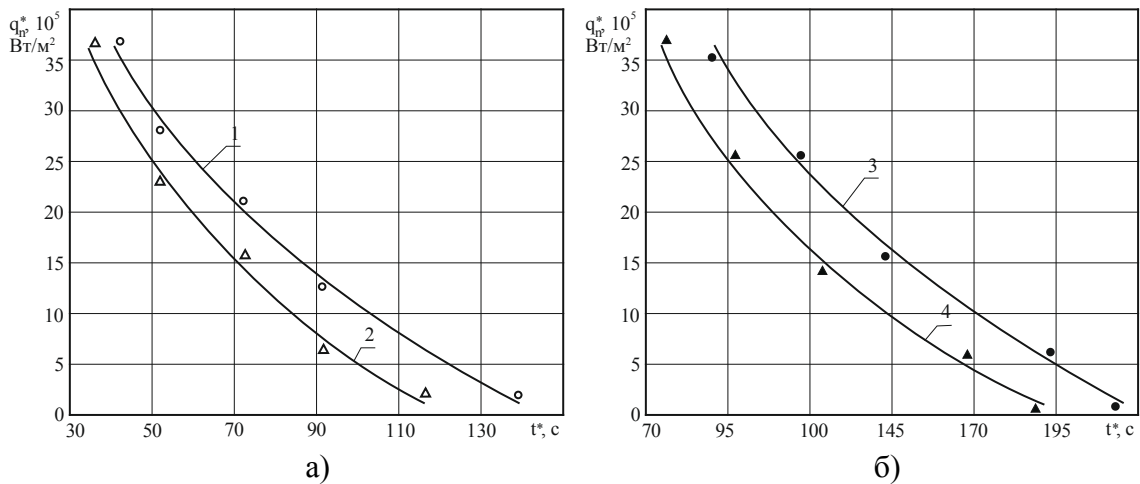


Рисунок 13 – Залежності $q_n^*(t^*)$ заряду суміші на основі Mg + NaNO₃ (а) та Al + NaNO₃ (б) у вигляді напівсферичного елемента ($C_{O_2} = 0,6$; $P = 10^5$ Па): 1 – $d_m = 54$ мкм (Mg); 2 – $d_m = 305$ мкм (Mg); 3 – $d_m = 56$ мкм (Al); 4 – $d_m = 310$ мкм (Al); ——— розрахункова крива; ○, ●, △, ▲ – експериментальні дані

Висновки та напрями подальших досліджень

1. Уточнено математичні моделі зовнішніх термічних впливів на заряди піротехнічних нітратно-металізованих сумішей в умовах їх зберігання або транспортування через врахування: геометричної форми заряду суміші (плоскі пластини, циліндричні стрижні, напівсферичні елементи); термомеханічних властивостей та технологічних параметрів сумішей; температурних залежностей теплофізичних властивостей сумішей (об'ємної теплоємності $CV(T)$ та коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$), що дало змогу більш точно (відносно похибку знижено до 6...8% замість 10...12% – у моделей) розраховувати розподіл температур у заряді суміші.

2. Унаслідок проведених теоретико-експериментальних досліджень зовнішніх термічних впливів на поверхню зарядів сумішей отримано такі нові результати: під час зростання зовнішнього

теплого потоку від $1,9 \cdot 10^5$ Вт/м² до $3,6 \cdot 10^6$ Вт/м² температура поверхні заряду (максимальна температура за поверхневого нагрівання суміші) зростає у 5...6 разів за часу термічного впливу $t > 40...50$ с, а у разі $t > 60...70$ с відбувається вже різке зростання температури (у понад 10...20 разів); розроблено науково-обґрунтований метод, який дає можливість з відносною похибкою 6...8% визначати критичні значення параметрів зовнішніх термічних дій (теплових потоків, часу їх дії), перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей та пожежовибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних виробів у разі їх зберігання або транспортування. Це дає змогу через використання необхідних технологічних рекомендацій, а також засобів контролю запобігати вказаним небезпечним ситуаціям.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Процессы горения металлизированных конденсированных систем : монография / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, В. В. Цыбулин. Київ : Наукова думка, 2008. 745 с.
2. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. Київ : Наукова думка, 2012.
3. Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових сумішей : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня : 21.06.02 «Пожежна безпека» / НУЦЗ. Харків, 2020. 26 с.
4. Фатеев В. М., Приходько Ю. П., Таборов Л. І. Піротехніка : курс лекцій. Київ : Наукова думка, 2017, 470 с.
5. Kyrychenko Ie., Diadiushenko O, Kyrychenko O, Dibrova O. Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures. 2022. № 334. С. 115–123.
6. Марич В. М., Ревуцький А. В., Гук Р. І. Забезпечення безпеки у виробництвах, де використовується магній та його сплави. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації*. Матеріали міжнар. наук.-практич. конференції, Львів, 20–21 жовт. 2016 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2016. С. 316–318.
7. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Тищенко Є. О., Цибулін В. В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 2018. № 2. С. 5–11.
8. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієвомагнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*, 2019. № 2(8). С. 81–85.
9. Пожежна безпека. Загальні положення : ДСТУ 8828:2019 [Чинний від 01.01.2020]. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 84 с.
10. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація : ДСТУ 8829:2019. [Чинний від 01.01.2020]. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 75 с.
11. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Цибулін В. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 2. С. 123–133.
12. Діброва О. С., Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *International Scientific Journal «Intenauka»*. 2020. № 5/5799.
13. Діброва О. С., Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *International Scientific Journal «Intenauka»*. 2020. № 5/5798.
14. Dibrova O., Kyrychenko O., Motrychuk R., Tomenko M., Melnyk V. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 1/1 (51). P. 44–49.
15. Кириченко Є. П. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація»*. 2021. № 2. С. 37–51.
16. Кириченко Є. П. Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2022. № 2. С. 53–63.
17. Кириченко Є. Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошоків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація»*, 2022. Т. 6. № 1. С. 29–42.
18. Pulpea B. G., Nuță C.-V., Pulpea D., Rotariu A., Trană E., Toader G., Rotariu T., Dîrloman F., Șomoiag P., Ungureanu M. I. Characterization of pyrotechnic composition used in tracer ammunitions. *UPB Scientific Bulletin, Series B : Chemistry and Materials Science*, 2023 Volume 85. № 2, С. 185–198.
19. León, David, Castells, Blanca, Amez, Isabel, Casín, Juan, García-Torrent, Javier, Experimental Quantification of Fire Damage Inside Pyrotechnic Stores. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023, Volume 13, Issue 10, 6181

REFERENCES

1. Vashchenko, V. A., Kyrychenko, O. V., Leha, Yu. H., Zayka, P. I., Yatsenko, Y. V., Tsybulin, V. V (2008). Protsessy gorennya metallizirovannykh kondensirovannykh system [Combustion processes of metallized condensed systems]. Kyiv: Naukova dumka. [In Russian].
2. Kyrychenko, O. V., Pashkovskiy, P. S., Vashchenko, V. A., Leha Yu. H (2012). Osnovy pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisykh vyrobiv v umovakh zovnishnykh termovplyviv [Basics of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in conditions of external thermal effects. Kyiv: Naukova dumka. [In Ukrainian]
3. Dibrova, O. S. (2020) Pidvyshchennya pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishey [Increasing the fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures]. (Extended abstract of candidate's thesis). National University of Civil Defense. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Fatieiev, V. M., Prykhodko, Yu. P., Taborov, L I. (2017) Pirotechnika [Pyrotechnics]. Kyiv: Naukova dumka. [In Ukrainian].
5. Kyrychenko, Ie., Diadiushenko, O., Kyrychenko, O., Dibrova, O. (2022). Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures. *Solid State Phenomena*, 334, 115–123. doi:10.4028/p-kww878 [in English].
6. Marych, V. M., Revuts'kyi, A. V., Huk, R. I. (2016). Zabezpechennya bezpeky u vyrobnytstvakh, de vykorystovuyet'sya mahniy ta yoho splavy [Ensuring safety in industries where magnesium and its alloys are used], *Pozhezhna ta tekhnohenna*

- bezpeka. Teoriya, praktyka, innovatsiyi, materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi [Fire and technological safety. Theory, practice, innovations. Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Lviv. [in Ukrainian].
7. Kyrychenko, O. V., Dibrova, O. S., Motrichuk, R. B., Tyshchenko, YE. O., Tsybulin V. V. (2018). Vyznachennya dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumishey pry yikh ekspluatatsiyi [Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu*, 2, 5 – 11, doi: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2018> [in Ukrainian].
 8. Kyrychenko, O. V., Dibrova, O. S., Motrichuk, R. B., Vashchenk, V. A., Kolin'ko, S. O. (2019). Doslidzhennya spalakhuvannya ta horinnya chastynok alyuminiyevomahniyevykh splaviv u produktakh rozkladannya tverdykh pirotekhnichnykh palyviv [Research on ignition and burning of particles of aluminum-magnesium alloys in decomposition products of solid pyrotechnic fuels]. *Naukovyy visnyk: Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2(8), 81–85, doi: <https://doi.org/10.33269/nvez.2019.2> [in Ukrainian].
 9. Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia [Fire Security. Terms]. (2019). DSTU 8828:2019 from January 2020 Kyiv: UkrNDICZ [in Ukrainian].
 10. Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. No-menklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Classification]. (2019). DSTU 8829:2019 from January 2020 Kyiv: UkrNDICZ [in Ukrainian].
 11. Kyrychenko, O. V., Dibrova, O. S., Motrichuk, R. B., Vashchenko, V. A., Kolin'ko, S. O., Butenko, T. I., Tsybulin, V. V. (2020). Vyznachennya krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy [Determination of critical modes of development of combustion processes of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal effects]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu*, 2, 123–133, doi: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2020> [in Ukrainian].
 12. Dibrova, O. S., Kyrychenko, O. V., Motrichuk, R. B., Vashchenko, V. A. (2020). Pidvyshchennya pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy [Patterns of influence of technological parameters on the fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in conditions of external thermal actions], *Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal «Internauka»*, 5/5798, doi: 10.15587/2312-8372.2020.199252 [in Ukrainian].
 13. Dibrova, O. S., Kyrychenko, O. V., Motrichuk, R. B., Vashchenko, V. A. (2020). Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhnu bezpeku pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy [Patterns of influence of technological parameters on the fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in conditions of external thermal actions], *Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal «Internauka»*, 5/5798. doi: 10.15587/2312-8372.2020.199252 [in Ukrainian].
 14. Dibrova, O., Kyrychenko, O., Motrychuk, R., Tomenko, M., Melnyk, V. (2020) Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. *Technology audit and production reserves*, 1/1(51), 44–49, doi: 10.15587/2312-8372.2020.199252 [in English].
 15. Kyrychenko, Ye. P. (2021) Doslidzhennya protsesiv zovnishnikh termoudarnykh diy na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh postrilu ta pol'otu [Research of the processes of external thermoshock actions on pyrotechnic metal oxide products under the conditions of shot and flight], *Zbirnyk naukovykh prats' Cherkas'koho instytutu pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya Natsional'noho universytetu tsyvil'noho zakhystu Ukrainy «Nadzvychni situatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya»*, 2, 37–51, doi: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-37-50> [in Ukrainian].
 16. Kyrychenko, Ye. P. (2022). Metodyka vyznachennya krytychnykh znachen' parametriv zovnishnikh termichnykh diy na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh ekspluatatsiyi [Methodology for determining the critical values of the parameters of external thermal effects on pyrotechnic metal oxide products under operating conditions], *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu*, 2, 53-63, doi: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2022> [in Ukrainian].
 17. Kyrychenko, Ye. P. (2022). Doslidzhennya protsesiv zaymannya ta rozvytku horinnya dvokomponentnykh pirotekhnichnykh sumishey z poroshkiv mahniyu, alyuminiyu ta oksydiv metaliv pry pidvyshchennykh temperaturakh nahrivu ta zovnishnikh tyskakh [Investigation of the processes of ignition and development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures of magnesium, aluminum and metal oxide powders at elevated heating temperatures and external pressures], *Zbirnyk naukovykh prats' Cherkas'koho instytutu pozhezhnoyi bezpeky imeni Heroyiv Chornobylya NUTSZ Ukrainy «Nadzvychni situatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya»*, Volume 6, 1, 29-42, doi: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1> [in Ukrainian].
 18. Pulpea, B. G., Nuță, C.-V., Pulpea, D., Rotariu, A., Trană, E., Toader, G., Rotariu, T., Dîrloman, F., Șomoiaș, P., Ungureanu, M. I. (2023). Characterization of pyrotechnic composition used in tracer ammunitions. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, Volume 85, 2, 185–198
 19. León, D., Castells, B., Amez, I., Casin, J., García-Torrent, J. (2023). Experimental Quantification of Fire Damage Inside Pyrotechnic Stores. *Applied Sciences (Switzerland)*, Volume 13, Issue 10, 6181, doi:10.3390/app13106181.

DETERMINATION OF CRITICAL VALUES OF PARAMETERS OF EXTERNAL THERMAL EFFECTS ON PYROTECHNIC PRODUCTS BASED ON NITRATE-METAL MIXTURES IN THE CONDITIONS OF THEIR STORAGE AND TRANSPORTATION

N. Koziar, O. Kyrychenko, V. Kovbasa, O. Diadiushenko, V. Vaschenko, S. Kolinko

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

fire safety,
pyrotechnic products,
pyrotechnic mixtures,
external thermal
effects, thermal
processes.

ANNOTATION

The properties of pyrotechnic products for various purposes (signaling and tracing devices, pyrotechnic flares, rocket and space technology elements, etc.) based on multicomponent compacted mixtures of metal propellants powders (magnesium, aluminum, aluminum-magnesium alloys (AMA), etc.), nitrate-containing oxidizers (nitrates of alkali and alkaline earth metals, etc.) and additives of various organic (paraffin, stearin, naphthalene, anthracene, urotropin, iditol, etc.) and inorganic substances (metal fluorides, etc.). It has been established that during storage and transportation, they can be exposed to intense external thermal effects (e.g., fires in warehouses where products are stored, fires in nearby flammable objects, in combat zones, etc.), resulting in premature ignition of the charges of the mixtures, which leads to the destruction of products with the formation of high-temperature combustion products (up to 3000...4000 K), which fly in different directions and pose a fire hazard to surrounding objects (fuels and lubricants, wooden buildings, launchers with service personnel, etc.) Mathematical models of external thermal effects on the surface of charges of nitrate-metallized mixtures with additives of organic and inorganic substances for pyrotechnic products for various purposes in storage or transportation conditions have been developed, taking into account the geometric shape of the charges (flat plates, cylindrical rods and hemispherical elements); thermomechanical properties and technological parameters of the mixture; temperature dependences of the thermophysical properties of the mixtures. The temperature distributions in the charges of the mixtures were calculated and the critical values of the external heat flux and its action time were determined, the excess of which leads to premature ignition of the charges of the mixtures, explosive development of their combustion and, ultimately, to the fire-hazardous destruction of pyrotechnic products and surrounding objects.