

О. В. Кириченко¹, д.т.н., с.н.с., завідувач кафедри пожежно-профілактичної роботи

О. С. Діброва¹, ад'юнкт

Р. Б. Мотрічук¹, ад'юнкт

e-mail: okskir@meta.ua

Є. О. Тищенко², к.т.н., доцент, заступник начальника з навчальної та виробничої роботи

В. В. Цибулін³, викладач

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України,

вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

²Навчально-методичний центр цивільного захисту та безпеки життєдіяльності Черкаської області

вул. 30 років Перемоги, 26, м. Черкаси, 18034, Україна

³Черкаський державний технологічний університет,
бул. Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ РЕЖИМІВ НАГРІВУ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

На стадії проектування піротехнічних сумішей необхідно прогнозувати допустимі режими їх нагріву, перевищення яких призводить до займання зарядів сумішей під металевими оболонками виробів, що призводить до пожежовибухонебезпечних для оточуючих об'єктів руйнувань сумішей. Розроблено уточнену математичну модель нагріву піротехнічних сумішей зовнішнім тепловим потоком, що враховує температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу оболонки та заряду суміші (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності) та дозволяє більш точно розраховувати розподіл температури по товщині виробу. Встановлено, що збільшення величини теплового потоку призводить до зростання температури нижньої поверхні оболонки, що контактує з зарядом суміші. Вперше визначено гранично допустимі значення параметрів термовпливів на поверхню металевих оболонок піротехнічних сумішей, перевищення яких веде до інтенсивного саморозігріву реакційноздатної суміші аж до її займання та прискорення горіння, що, у кінцевому підсумку, призводить до пожежовибухонебезпечних руйнувань сумішей.

Ключові слова: піротехнічні вироби, параметри термовпливу, процеси горіння сумішей.

Вступ. Нині піротехнічні вироби на основі ущільнених сумішей з порошків металевих горючих (магнію, алюмінію, цирконію та ін.), нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних, лужноземельних металів та ін.) та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену і ін.) широко використовуються в різних галузях народного господарства і військової техніки (фесерверочні склади, освітлювальні і трасуючі засоби, піротехнічні ІЧ-випромінювачі, елементи ракетно-космічної техніки та ін.) [1 – 4]. Всі піротехнічні вироби при їх зберіганні і транспортуванні [5, 6] можуть піддаватися зовнішнім термовпливам (наприклад, в умовах пожежі в складських приміщеннях, де зберігаються вироби, або при їх транспортуванні в умовах спалаху оточуючих горючих матеріалів з високими температурами полум'їв (табл. 1)).

В результаті відбувається суттєвий нагрів зарядів сумішей, реакційноздатних до підвищених температур (рис. 1), що призводить до їх передчасних локальних займань під герметичними корпусами і подальшого розвитку процесу горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву і зовнішніх тисків. При цьому в одних випадках вироби нагріваються без видимих руйнувань, а в інших – відбуваються їх вибухонебезпечні руйнування з утворенням різних чинників пожежі (полум'я або високотемпературний потік продуктів згоряння, дисперговані продукти (уламки металевих корпусів, розігріті частини зарядів сумішей, іскри тощо)).

Тому на стадії проектування і розробки піротехнічних сумішей необхідно вміти прогнозувати допустимі режими їх нагріву, перевищення яких призводить до запалювання зарядів сумішей під металевими оболонками

виробів, прискорення процесу їх горіння при зростаючих температурах нагріву та зовнішніх тисках, що в кінцевому підсумку призводить до пожежовибухонебезпечних для оточуючих об'єктів руйнувань сумішей. На сьогоднішній день, вказана задача не вирішена, оскільки відсутні результати досліджень з моделювання і розрахунку температурних полів у металевих оболонках та зарядах сумішей, які контактують з ними, в умовах зовнішніх термовпливів, а також дані про температури

на нижніх сторонах оболонок та зіставлення їх з температурами спалахування частинок металевих паливних в активних газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювачів і добавок органічних речовин. Отже, **метою даної роботи** є побудова математичних моделей нагріву піротехнічних сумішей зовнішніми джерелами тепла та розробка методів визначення допустимих діапазонів зміни їх параметрів, що не призводять до пожежовибухонебезпечних руйнувань сумішей.

Таблиця 1

Значення температур полум'їв і ступенів їх чорноти основних горючих матеріалів [7]

№ п/п	Горючий матеріал	Температура полум'я, К	Ступінь чорноти
1	Торф, мазут	1273	0,88
2	Деревина, буре вугілля, сира нафта, дизельне паливо	1373...1423	0,6
3	Кам'яне вугілля, каучук й 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	0,66

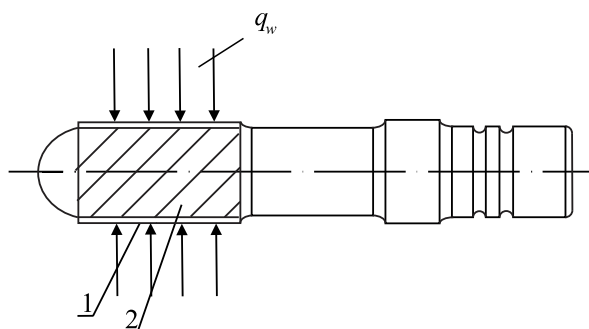


Рис. 1. Схематичне зображення зовнішнього нагріву зарядів піротехнічних сумішей:

q_n – тепловий потік, що надходить на поверхню оболонок суміші від зовнішніх джерел тепла (зони пожежі, осередків загоряння різних паливних речовин (див. табл. 1) і ін.); 1 – металева оболонка; 2 – заряд піротехнічної суміші

Результати досліджень та їх аналіз.
Математична модель процесу нагрівання піротехнічних сумішей зовнішнім тепловим потоком q_w . Розглядається металева оболонка у вигляді плоского шару товщиною H_1 зі сталі 12X18H10T [4], який контактує з плоским

$$C_{Vi}(T) = C_{Vi0} \cdot T_i^\nu,$$

де індекси “1” та “2” відповідають матеріалу оболонки та суміші.

Для використовуваних на практиці значень H_1 та H_2 ($H_1 = 8 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$ м,

$$\delta_1 = 2(a_1^2 \cdot \tau)^{1/2} \approx H_1,$$

де δ_i ($i = 1, 2$) – глибина проникнення теплової хвилі у матеріал оболонки та заряд суміші,

шаром заряду суміші товщиною H_2 (рис. 2). При цьому на основі існуючих експериментальних даних [3, 4] враховуються температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу оболонки і суміші (відносна похибка 5...8 %):

$$\lambda_i(T) = \lambda_{i0} \cdot T_i^\nu \quad (i = 1, 2), \quad (1)$$

$H_2 = (2 \dots 4) \cdot 10^{-2}$ м [4, 5], використовуються наступні умови [8]:

$$\delta_2 = 2(a_2^2 \cdot \tau)^{1/2} \ll H_2, \quad (2)$$

м; $a_i^2 = \frac{\lambda_i(T)}{C_{Vi}(T)}$ – температуропровідність матеріалу оболонки та суміші відповідно, м²/с.

Таким чином, глибина проникнення теплової хвилі співрозмірна з товщиною першого шару і набагато менше товщини другого шару. Тому необхідно враховувати теплообмін на межі розділу шарів і можна знехтувати теплообміном на нижній стороні другого шару.

У припущенні рівномірності зовнішніх термовпливів вздовж поверхні металевої оболонки ($q_w = q_{w0} = \text{const}$), рівняння математичної моделі нагріву розглядуваної двошарової системи мають вид [9]:

$$C_{V1}(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} \right], \quad t > 0, \quad 0 < z < H_1, \quad (3)$$

$$C_{V2}(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} \right], \quad t > 0, \quad H_1 < z < +\infty, \quad (4)$$

$$T_1|_{t=0} = T_2|_{t=0} = T_0, \quad (5)$$

$$-\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_{w0}, \quad (6)$$

$$T_1|_{z=H_1} = T_2|_{z=H_1}, \quad (7)$$

$$\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = \lambda_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=H_1}, \quad (8)$$

$$T_2 \rightarrow T_0, \quad \left(\frac{\partial T_2}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow +\infty. \quad (9)$$

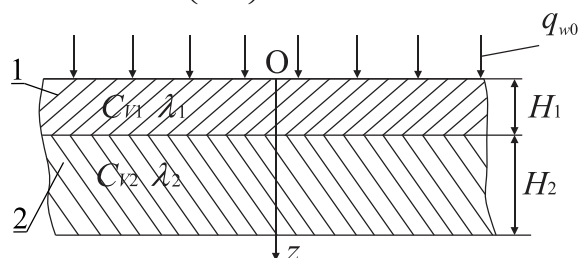


Рис. 2. Схема нагріву двошарової системи, що складається з шарів металевої оболонки та заряду піротехнічної суміші, які контактують: 1 – металева оболонка; 2 – заряд піротехнічної суміші; H_1, H_2 – товщини оболонки та заряду суміші відповідно, м

Лінеаризуючи систему рівнянь (4) – (9) за допомогою заміни змінних

$$\theta_i(z, t) = T_i^{\nu+1} - T_0^{\nu+1} \quad (i = 1, 2), \quad (10)$$

а також використовуючи пряме і зворотне перетворення Лапласа по змінній t [9] для знаходження функцій $\theta_1(z, t)$ та $\theta_2(z, t)$, а також враховуючи (10), отримуємо рішення вихідної задачі:

$$T_1(z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{4(\nu+1) \cdot q_{w0} \cdot a_{10} \cdot \sqrt{t}}{\lambda_{10}} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} b^n \operatorname{ierfc} \left(\frac{2H_1 n + z}{2a_{10} \cdot \sqrt{t}} \right) - \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{2H_1 n - z}{2a_{10} \cdot \sqrt{t}} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}, \quad (11)$$

$$T_2(z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{4(\nu+1) \cdot q_{w0} \cdot a_{10} \cdot \sqrt{t}}{\lambda_{10} \cdot (1 + d_0)} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{H_1 n}{a_{10} \cdot \sqrt{t}} + \frac{z}{2a_{20} \cdot \sqrt{t}} \right) \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (12)$$

Результати розрахунків розподілів температури по товщині металевої оболонки. Під пожежонебезпечними термовпливами на поверхню піротехнічних сумішей в умовах їх зберігання та транспортування приймаються [5, 6] ті граничні значення параметрів цих впливів (наприклад, значення зовнішніх теп-

лових потоків ($q_{w0j}^*, j = 1, 2, \dots$) та часів теплового впливу ($t_j^*, j = 1, 2, \dots$), при яких температура нижньої сторони оболонки, що контактує з піротехнічною сумішшю, задовольняє наступним умовам:

$$T_n \geq T_g, \quad (13)$$

де T_n – температура нижньої сторони оболонки, К; T_g – температура, при якій починається саморозігрів заряду суміші в результаті процесу екзотермічного окислення металевих пального в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача, так звана температура займання частинок металу у вказаних середовищах [4, 10]. Виконання умови (13) призводить до швидкого осередкового займання заряду суміші (в межах $10^{-3} \dots 10^{-2}$ с [10]) з подальшим прискоренням процесу горіння суміші у закритому об'ємі, в якому відбувається різке збільшення температури нагріву і тиску навколишнього середовища, що, зрештою, призводить до руйнування окремих частин металеві оболонки та викиду у навколишнє середовище високотемпературних (до $3000 \dots 4000$ К [4]) продуктів згоряння суміші, а також нагрітих залишків оболонки і незгорілих залишків суміші, здатних займати та руйнувати навколишні об'єкти.

Для проведення розрахунків по формулам (11) та (12) були використані усі необхідні фізико-хімічні дані [4, 10], а також спеціалізоване програмне забезпечення MathCAD v.15 [11]. При цьому з врахуванням значень температур полум'їв найбільш використовуваних паливних матеріалів та ступеня їх чорноти (див. табл. 1) для зовнішнього теплового потоку, що нагріває поверхню металевих оболонок сумішей в результаті можливого займання вказаних матеріалів, використовується наступний діапазон його зміни $q_{w0} = 1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², а також металева оболонка товщиною $H_1 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Результати розрахунків, представлених на рис. 3 та 4, показують, що температура нижньої

сторони оболонки сильно залежить від величини зовнішнього теплового потоку та часу його впливу на поверхню металеві оболонки. При цьому, зростання величини q_{w0} в діапазоні $1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² призводить до збільшення значень T_n у 5...6 разів для $t = 5 \dots 10$ с, а збільшення t до 10^2 с та більше веде до зростання T_n більше, ніж у 15...20 разів. Зіставлення результатів розрахунків з отриманими експериментальними даними (використовувались стандартні термомпари ТПП-0679-01 та ТПР-0679-01 [4, 10], відносна похибка вимірювання температури не перевищує 1...2 %) показує, що відмінності між ними не перевищують 5...7 %.

Визначення можливих пожежовибухо-небезпечних термовпливів на поверхню оболонки. Згідно експериментальним даним [4, 10] температури займання частинок широко використовуваних металів (Mg, Al, Zr) у кисневмісних середовищах лежать в наступних діапазонах: $T_g^{(i)} = 700 \dots 970$ К (індекс “i” відповідає: “1” – Mg, “2” – Al, “3” – Zr).

З порівняння вказаних вище діапазонів зміни температур $T_g^{(i)}$ ($i = \overline{1,3}$) з представленими на рис. 3 температурами T_n видно, що при певних значеннях теплових потоків q_{w0j}^* ($j = 1, 2, \dots$) та часів теплового впливу t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) значення температури T_n стають значно вище $T_g^{(i)}$ (рис. 4). Таким чином, пожежовибухонебезпечні термовпливи на поверхню металевих оболонок виробів визначаються наступними співвідношеннями (табл. 2).

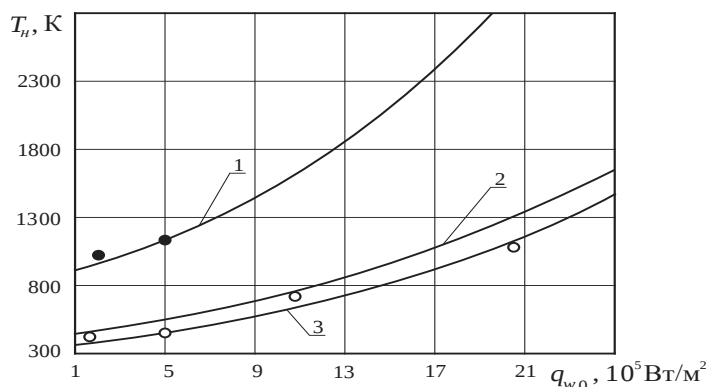


Рис. 3. Залежність температури нижньої поверхні оболонки від величини зовнішнього теплового потоку для різних значень часу теплового впливу ($T_0 = 300$ К; $H_1 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м): 1 – $t = 10^2$ с (● – експериментальні дані); 2 – $t = 60$ с; 3 – $t = 50$ с (○ – експериментальні дані)

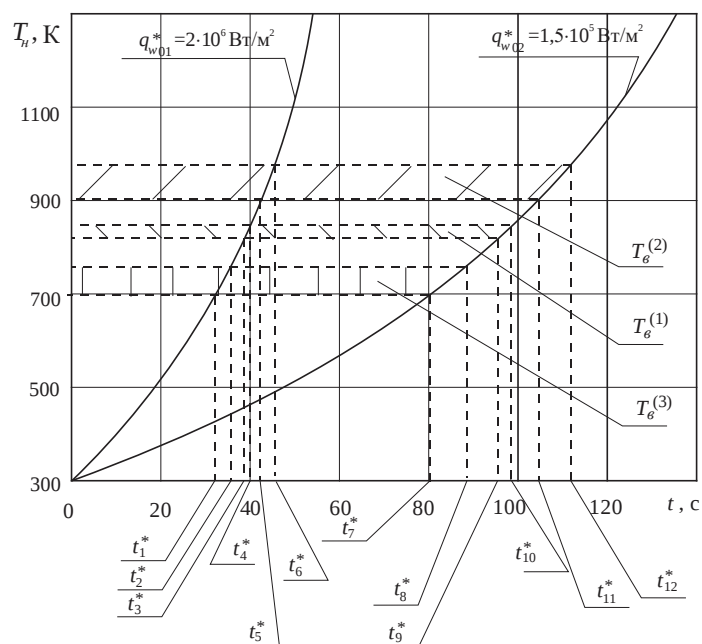


Рис. 4. Значення параметрів q_{w0j}^* и t_j^* для металевих зарядів піротехнічних сумішей

Висновки

1. Розроблено уточнену математичну модель нагріву піротехнічних сумішей зовнішнім тепловим потоком, що враховує температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу оболонки та заряду суміші (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності) та дозволяє більш точно розраховувати розподіл температури по товщині виробу (відносну похибку знижено до 5...7 % замість 10...12 % у існуючих моделях).

2. Встановлено, що збільшення величини теплового потоку від $1,5 \cdot 10^5$ до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² призводить до зростання температури нижньої поверхні оболонки, що контактує з зарядом суміші, у 4...6 рази для часів тепло-

вого впливу $t = 5 \dots 15$ с; при збільшенні t до 100 с та більше, її значення зростають вже більше, ніж на порядок.

3. Вперше визначено гранично допустимі значення параметрів термовпливів (величини теплового потоку q_{w0j}^* та часів зовнішніх термовпливів t_j^* ($j = 1, 2, \dots$)) на поверхню металевих оболонок піротехнічних сумішей, перевищення яких веде до інтенсивного саморозігріву реакційноздатної суміші аж до її займання та прискорення горіння, що, у кінцевому підсумку, призводить до пожежовибухонебезпечних руйнувань сумішей.

Таблиця 2

Діапазони зміни гранично допустимих значень зовнішніх теплових потоків ($q_{w0j}^{(i)}$, $j = 1, 2, \dots$) та часів їх впливу (t_j^* , $j = 1, 2, \dots$) на металеві оболонки виробів

Суміш	Параметр	$q_{w0j}^{(1)}$, Вт/м ²	t_j^* , с
Mg + NaNO ₃ + органічна добавка		$2 \cdot 10^6$	$t_3^* < 39$
		$1,5 \cdot 10^5$	$t_7^* < 97$
Al + NaNO ₃ + органічна добавка		$2 \cdot 10^6$	$t_5^* < 41$
		$1,5 \cdot 10^5$	$t_{11}^* < 103$
Zr + NaNO ₃ + органічна добавка		$2 \cdot 10^6$	$t_1^* < 32$
		$1,5 \cdot 10^5$	$t_7^* < 80$

Список літератури

1. Шидловский А. А. Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973. 320 с.
2. Шидловский А. А., Сидоров А. И., Силин Н. А. Пиротехника в народном хозяйстве. М.: Машиностроение, 1978. 231 с.
3. Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. и др. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем. М.: Машиностроение, 1982. 232 с.
4. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Лега Ю. Г., Заика П. И., Яценко И. В., Цыбулин В. В. Процессы горения металлизированных конденсированных систем. К.: Наукова думка, 2008. 745 с.
5. Кириченко О. В. Определение участков на поверхности металлических корпусов пиротехнических изделий, подвергающихся разрушениям в условиях эксплуатации. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 1. С. 149–154.
6. Кириченко О. В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2009. № 2. С. 89–94.
7. Рябова І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А. Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. Навчальний посібник. Харків: НУЦЗУ, 2010. 344 с.
8. Ващенко В. А., Котельников Д. И., Лега Ю. Г., Краснов Д. М., Яценко И. В., Кириченко О. В. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. К.: Наукова думка, 2006. 368 с.
9. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 1985. 324 с.
10. Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. и др. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем. М.: Машиностроение, 1976. 320 с.
11. Алексеев Е. М. Решение задач вычислительной математики в пакетах MathCAD, MATLAB, Maple9. 2006. 496 с.
2. Shidlovskii, A. A., Sidorov, A. I. and Silin, N. A. (1978) Pyrotechnics in the national economy. Moscow: Mashinostroenie, 231 p. [in Russian].
3. Silin, N. A., Vaschenko, V. A., Kashporov, L. Y. and others (1982) Combustion of metallized heterogeneous condensed systems. Moscow: Mashinostroenie, 232 p. [in Russian].
4. Vaschenko, V. A., Kiritchenko, O. V., Lega, Y. G., Zaika, P. I., Yatsenko, I. V., Tsybulin, V. V. (2008) Combustion processes of metallized condensed systems. Kyiv: Naukova dumka, 745 p. [in Russian].
5. Kiritchenko, O. V. (2008) Determination of areas on the surface of metal casings of pyrotechnic products subject to destruction under operating conditions. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 1, pp. 149–154 [in Russian].
6. Kiritchenko, O. V. (2009) Increase of efficiency of pyrotechnic nitrate-containing products in conditions of their application. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 2, pp. 89–94 [in Russian].
7. Ryabova, I. B., Saychuk, I. V. and Sharshanov, A. Y (2010) Thermodynamics and heat transfer in the fire. Tutorial. Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine, 344 p. [in Ukrainian].
8. Vaschenko, V. A., Kotelnikov, D. I., Lega, Y. G., Krasnov, D. M., Yatsenko, I. V. and Kiritchenko, O. V. (2006) Thermal processes in the electronic processing of optical materials and the operation of products based on them. Kyiv: Naukova dumka, 368 p. [in Russian].
9. Kartashov, E. M. (1985) Analytical methods in the theory of the thermal conductivity of solids. Moscow: Vyshaya shkola, 324 p. [in Russian].
10. Silin, N. A., Vaschenko, V. A., Kashporov, L. Y. and others (1976) Metallic combustible heterogeneous condensed systems. Moscow: Mashinostroenie, 320 p. [in Russian].
11. Alekseev, E. M. (2006) Solving the problems of computational mathematics in packages MathCAD, MATLAB, Maple9, 496 p. [in Russian].

References

1. Shidlovskii, A. A. (1973) Basics of pyrotechnics. Moscow: Mashinostroenie, 320 p. [in Russian].

O. V. Kirichenko¹, *Dr.Tech.Sc.*,

¹ *Senior Researcher, Head of the Department of Fire and Prophylactic Work*

O. S. Dibrova¹, *adjunct*,

R. B. Motrichuk¹, *adjunct*,

E. O. Tyschenko², *Ph.D., Associate Professor, Deputy Head of Educational and Production Work*

V. V. Tsybulin³, *lecturer*

¹ *Cherkasy Institute of Fire Safety,*

Onoprienko str., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

² *Educational and methodical center of civil protection and life safety Cherkasy region*

30 Years of Victory str., 26, Cherkasy, 18034, Ukraine

³ *Cherkasy State Technological University*

Shevchenko blvd., 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

DEFINING THE ACCEPTABLE HEATING MODE PYROTECHNIC MIXTURE AT THEIR OPERATION

At the stage of designing and developing pyrotechnic mixtures, one must be able to predict the permissible modes of their heating, the excess of which leads to the ignition of charges of mixtures under metal shells of products, acceleration of their combustion with increasing heating temperatures and external pressures, which ultimately leads to fire explosives for surrounding objects destruction of mixtures.

The purpose of this work is to construct mathematical models of heating pyrotechnic mixtures with external heat sources and to develop methods for determining acceptable ranges of changes in their parameters, which do not lead to fire explosive fracturing of mixtures.

The refined mathematical model of heating of pyrotechnic mixtures with external thermal flow is developed, taking into account the temperature dependences of the thermophysical properties of the shell material and the charge of the mixture (volumetric heat, heat transfer coefficient) and allows more accurately calculate the temperature distribution along the thickness of the product. It was established that an increase in the value of the heat flux leads to an increase in the temperature of the lower surface of the shell that is in contact with the charge of the mixture. For the first time, the maximum allowable values of the parameters of thermal influences on the surface of metal shells of pyrotechnic mixtures, excess of which leads to intensive self-heating of the reactive mixture, up to its ignition and acceleration of combustion, which ultimately leads to fire-explosive fracturing of mixtures.

Keywords: *pyrotechnic products, the parameters of the thermal influences, processes of burning of mixtures.*