

*О. О. Ковальов, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов*  
Національний університет цивільного захисту України

## РОЗРОБКА ОКРЕМИХ АСПЕКТІВ КОНТЕЙНЕРНОГО МЕТОДУ ПОЖЕЖОГАСІННЯ

Сьогодні актуальною науково-технічною проблемою є створення принципово нових технічних засобів пожежогасіння та розробка нових методів доставки вогнегасних речовин на віддалену відстань при гасінні складних пожеж. Пожежна техніка, що використовується в даний час територіальними підрозділами державної служби України з надзвичайних ситуацій, не дозволяє зробити доставку вогнегасних речовин на відстань понад 100 м. Є технічні засоби пожежогасіння призначені для доставки води, водних розчинів і пін на відстань до 100 м, а також порошкових складів на відстань до 70 м. Сьогодні різними дослідниками ведеться розробка технічних засобів і способів подачі на віддалену відстань аерозолеутворюючих сумішей, вогнегасні порошкові суміші, вогнегасні хладони, твердий двоокис вуглецю й металоорганічні з'єднання. При цьому, застосування розглянутих вогнегасних сумішей не набуло поширення в пожежно-рятувальних підрозділах через недостатнє опрацювання технічних засобів і способів подачі. Для вирішення проблеми доставки вогнегасних речовин на далеку відстань при гасінні складних пожеж запропоновано використання ствольної установки пожежогасіння, що забезпечує високоточну доставку методом метання по балістичній траєкторії контейнерів начинених вогнегасною речовиною безпосередньо в зону горіння. Проведений аналіз різних вогнегасних речовин і складів для використання в контейнерах показав, що для досягнення найбільшої ефективності пожежогасіння доцільно використовувати порошкові вогнегасні склади.

В результаті дослідження застосування порошкових вогнегасних складів в якості наповнювачів контейнерів, досліджена механіка вогнегасної дії порошкових складів при їх викиді в результаті руйнування контейнера надлишковим тиском, створюваним продуктами детонації вибухових речовин. Розроблено методик визначення сумарної маси порошкових складів і необхідної кількості контейнерів начинених вогнегасними порошковими складами для гасіння пожеж класів А, В.

**Ключові слова:** пожежогасіння, ствольна установка, контейнер, порошкові вогнегасні склади.

**Постановка проблеми.** Переважна більшість пожежної техніки котра використовується на теперішній час в територіальних підрозділах ДСНС України не дозволяє доставляти вогнегасні речовини (ВР) на відстань більше 100 м. Наявні в Україні різні типи пожежних автоцистерн з різним набором технічних засобів пожежогасіння, здатні з використанням лафетних стволів доставити воду на відстань до 70 м, максимальна відстань подачі розчинів вогнегасних пін низької та середньої кратності, з використанням установок комбінованого гасіння пожеж типу «Пурга», становить 100 м. При використанні пожежних автомобілів порошкового пожежогасіння, максимальна дальність подачі вогнегасних порошоків становить 70 м [1]. З числа наявних у розпорядженні ДСНС України зразків пожежної техніки, найбільшу дальність подачі вогнегасних речовин забезпечує імпульсна багато ствольна установка «Імпульс-3М». Цей тип ствольних установок був створений на Київському танкоремонтному заводі за замовленням головного ракетно-артилерійського управління МО СРСР на базі шасі танків Т-62. Установка Імпульс-3М забез-

печує дальність імпульсної подачі 200 кг. вогнегасних порошоків на відстань 120 м, або 150 л води на відстань 75 м [2].

На сьогодні створені різні типи нових вогнегасних речовин і їх сумішей, вогнегасна здатність яких за багатьма параметрами перевершує водні розчини і піни, такі як: аерозолеутворюючі склади, вогнегасні порошки (ВП) різних рецептур, екологічно чисті хладони, твердий двоокис вуглецю і металоорганічні сполуки, при цьому на озброєнні протипожежні підрозділи на сьогодні не оснащені технічними засобами та пожежною технікою здатними ефективно високоточно подавати їх до осередку пожежі з відстані більше 100 м [1, 3, 4].

Тому в даний час гостро стоїть проблема створення принципово нових технічних засобів пожежогасіння та розробка нових методів доставки ВР на значну відстань при гасінні складних пожеж. Найбільш раціональним розв'язанням цієї проблеми є використання пневматичної ствольної установки пожежогасіння (СУП) – пневматичної гармати, що забезпечує високоточну кон-

тейнерну доставку різного виду вогнегасних речовин безпосередньо в зону горіння.

Використання СУП дозволить ефективно вирішувати завдання віддаленої доставки різних ВР і сумішей методом метання в контейнерах при гасінні складних пожеж на особливо небезпечних об'єктах (зони хімічного зараження, території мінних загороджень, пожежі на арсеналах і т. д.), забезпечуючи при цьому безпеку особового складу пожежних підрозділів.

#### *Аналіз останніх досягнень і публікацій*

Застосування ВП в контейнерах є одним з перспективних напрямків в пожежогасінні. Основними проблемами, що стримують їх використання є: відсутність ефективної конструкції контейнера (капсули) начиненого ВП, невизначеність необхідної маси ВП та його вогнегасної ефективності при контейнерній доставці, а також відсутність технічних засобів для організації доставки ВП в контейнерах на віддалену відстань в зону горіння, що може бути успішно вирішено за допомогою СУП.

Доцільність використання та ефективність застосування СУП залежить від ефективності застосування контейнерів начинених ВР. Контейнер являє собою порожнисту капсулу наповнену вогнегасним однокомпонентним або багатоконпонентним складом. При попаданні контейнера в зону горіння, капсула руйнується, вивільняючи вогнегасний склад. Основними способами механічного викиду вогнегасної речовини з капсули і обробки зон горіння є:

- розсипання або розлив вогнегасної речовини по поверхні в зоні горіння;
- викид маси вогнегасної речовини в результаті розділення контейнера на окремі компоненти, подальший розліг розділених компонентів контейнера з одночасною обробкою зони горіння ВР;
- розпилення в результаті розриву капсули від внутрішнього надлишкового тиску викликаного продуктами хімічної реакції;
- вибуховий викид вогнегасної речовини, в тому числі і зі струменем вогню, що дозволяє збити полум'я в зоні горіння;

При цьому можливі різні способи приведення в дію механізму пожежогасіння контейнера, такі як: механічне руйнування від удару об поверхню; активація термочутливим механізмом або під впливом променевої енергії; активація електричним або електромагнітним імпульсом; розрив від надлишкового внутрішнього тиску; інерційний викид ВР через соплову або дифузорну частину контейнера та інші.

Проведений аналіз різних вогнегасних речовин і складів для використання в контейнерах СУП показав, що для досягнення найбільшої ефективності гасіння пожеж доцільно викорис-

товувати (ВП) різних рецептур, що випускаються в досить широкому асортименті. ВП володіють високою ефективністю гасіння практично на всьому інтервалі реальних температур експлуатації і застосовуються для гасіння газів, рідин, твердих горючих речовин і матеріалів, пилу, порошоків лужних і лужноземельних металів [5-7]. При цьому також можуть використовуватися рідинні, газові, аерозольні або комбіновані вогнегасні наповнювачі для контейнерів.

#### *Постановка завдання та її вирішення.*

Проведення дослідження ВП в якості наповнювачів контейнерів потребує вирішення насамперед таких завдань:

- дослідження механіки дії ВП в контейнерах;
- визначення необхідної розрахункової маси порошкових складів, що містяться в контейнерах та подаються до осередку пожежі за допомогою СУП;
- визначення критичної маси ВП для припинення горіння.

Відомі два основних механізми вогнегасної дії ВП, перший заснований на гасінні полум'я шляхом відбору енергії, що виділяється при горінні, другий – на інгібуванні процесу горіння за допомогою обриву ланцюгових реакцій, відповідальних за його розвиток [8]. У свою чергу можливі два механізми інгібування полум'я при застосуванні ВП: гетерогенний, що полягає в рекомбінації активних центрів на поверхні твердих частинок, і гомогенний, заснований на взаємодії активних центрів з газоподібними продуктами випаровування або розкладання порошоків [6-9].

Тому можна сформулювати основні методи пожежогасіння із застосуванням ВП у контейнерах:

- розведення горючого середовища газоподібними продуктами розкладання порошку;
- охолодження зони горіння в результаті витрат тепла на нагрів частинок порошку, їх часткове випаровування і розкладання в полум'ї;
- забезпечення ефекту вогнеперешкоди, що досягається проходженням полум'я через вузькі канали між частинками порошкової хмари;
- інгібування хімічних реакцій відповідальних за розвиток процесу горіння газоподібними продуктами випаровування і розкладання ВП;
- гетерогенний обрив ланцюгів на поверхні часток або твердих продуктів розкладання;
- гомогенне інгібування, що полягає у взаємодії з активними центрами горіння газоподібних часток, які утворюються при випаровуванні і розкладанні ВП;
- екранування палаючої поверхні від теплового потоку, що надходить від зони горіння;
- ізоляція палаючої поверхні від зони горін-

ня шаром часток ВП, що не розклалися внаслідок теплового впливу.

Домінуючий метод гасіння і вогнегасна ефективність ВП залежать від характеристик горючої речовини, режиму горіння, рецептури ВП а також способу його подачі в зону горіння [10]. Так, наприклад, при горінні металів основним принципом гасіння є ізоляція палаючої поверхні від зони горіння шаром порошкової вогнегасної речовини. При горінні інших речовин і матеріалів, основним принципом гасіння є механізм гетерогенного інгібування (гальмування) процесу горіння за допомогою обриву ланцюгових реакцій, відповідальних за його розвиток [9, 10]. При цьому також враховується вплив інших перерахованих факторів.

Інгібування протікає на поверхні частинок ВП, де на відміну від вогнегасних характеристик хладонів, гинуть не тільки водневі атоми  $H_2$ , а також й інші активні частинки, зокрема, атоми кисню  $O_2$ . Саме ця властивість інгібування робить ВП більш ефективними, ніж інші вогнегасні речовини [11]. При цьому залежно від співвідношення кінетичних факторів, вираз для визначення вогнегасної здатності ВП різних рецептур буде різним [12].

У кінетичній області [13] (в зону горіння надходить заздалегідь приготована і перемішана горюча суміш).

$$C_{PV} = \frac{2 \cdot \beta \cdot \rho_{PS} \cdot d_{PS}^{SR}}{3 \cdot v_{PS}^{SR} \cdot \gamma}, \quad (1)$$

де  $v_{PS}^{SR}$  – середня швидкість руху частинки порошку в шарі газу, м  $s^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність частки ВП,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\beta$  – мінімальне значення константи гетерогенної рекомбінації, при якому спостерігається гасіння полум'я,  $s^{-1}$ ;  $d_{PS}^{SR}$  – середній діаметр частинки порошкового складу, м;  $\gamma$  – коефіцієнт, що враховує температуру в зоні підготовки до горіння;

В дифузійній області [7, 9, 14] (горюча суміш утворюється в зоні горіння)

$$C_{PV} = \frac{\beta \cdot d_{PS}^{SR^2} \cdot \rho_{PS}}{12 \cdot \varepsilon}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт дифузії частинок порошкового складу в газовому середовищі зони підготовки до горіння,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність частки ВП,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\beta$  – мінімальне значення константи гетерогенної рекомбінації, при якому відбувається гасіння полум'я,  $s^{-1}$ ;  $d_{PS}^{SR}$  – середній діаметр частинки порошкового складу, м.

Оскільки на пожежах в основному наявне дифузійне горіння [15], то найбільший інтерес для дослідження вогнегасної ефективності контейнерів, начинених порошковими складами,

представляє формула (2), яка описує залежність вогнегасної концентрації порошкових складів від різних факторів при дифузійному горінні.

Найбільш раціональним способом вивільнення ВП з контейнера, при потраплянні його в зону горіння, є руйнування контейнера внаслідок надлишкового тиску, створюваного продуктами детонації вибухових речовин. Внаслідок цього вогнегасний порошоків склад практично в повному обсязі (за винятком 2-3 % порошкового складу, що осідає на внутрішній поверхні капсули) вивільняється і надходить у зону горіння. При розпилюванні ВП в зоні горіння на поверхні частинки порошкового складу відбувається гетерогенна реакція рекомбінації атомарного кисню. Оскільки основна реакція хімічної взаємодії частинки ВП з атомарним киснем протікає в зоні горіння, то розрахунок необхідної для гасіння кількості порошку будемо вести на середню площу полум'я, яку можливо визначити з усередненої пожежі в приміщенні. Для визначення середніх значень площі полум'я та площі пожежі був проведений аналіз щорічних статистичних звітів Міжнародної асоціації пожежно-рятувальних служб (СТІФ). Згідно з проведеним аналізом, середньосвітова площа пожежі в приміщенні залежить від компіляції різних факторів: географічного положення та рівня розвиненості держави, а також організації роботи та рівня оснащення пожежно-рятувальних служб.

За результатами проведеного статистичного аналізу встановлено, що середня площа пожежі (F) в приміщенні для розвинених країн становить майже  $38 m^2$ , а для країн, що розвиваються –  $36 m^2$ . Досить незначна різниця середньої площі пожежі в приміщенні обумовлена тим, що в розвинених країнах, при значно більшій площі виробничих та житлових приміщень, забезпечується високий рівень оснащення та оперативної готовності пожежно-рятувальних служб, тому пожежі в приміщеннях не розповсюджуються на значні площі.

При відомій середній площі пожежі класів А і В, можна визначити характеристичний розмір полум'я  $I = F^{\frac{1}{2}}$  [16, 17], а також об'єм зони горіння:

$$V_{ZG} = F_{ZG}^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

де  $F_{ZG}$  – середнє значення площі пожежі (зони горіння),  $m^2$ .

Враховуючи те що  $C_{PV}$  – вогнегасна концентрація порошку в обсязі зони горіння

$$\left( C_{PV} = \frac{m_B}{V_{ZG}} \right), \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \text{ то (2) набуває вигляду:}$$

$$\frac{m_{PS}^R}{V_{ZG}} = \frac{\beta \cdot d_{PS}^{SR2} \cdot \rho_{PS}}{12 \cdot \varepsilon}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт дифузії частинок порошкового складу в газовому середовищі зони підготовки до горіння,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність частки ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\beta$  – мінімальне значення константи гетерогенної рекомбінації, при якому спостерігається гасіння полум'я,  $\text{с}^{-1}$ ;  $d_{PS}^{SR}$  – середній діаметр частинки порошкового складу,  $\text{м}$ ;  $\gamma$  – коефіцієнт, що враховує температуру в зоні підготовки до горіння.

Після перетворення отримаємо:

$$m_{PS}^R = \frac{\beta \cdot d_{PS}^{SR2} \cdot V_{ZG} \cdot \rho_{PS}}{12 \cdot \varepsilon}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт дифузії частинок порошкового складу в газовому середовищі зони підготовки до горіння,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність частки ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\beta$  – мінімальне значення константи гетерогенної рекомбінації, при якому спостерігається гасіння полум'я,  $\text{с}^{-1}$ ;  $d_{PS}^{SR}$  – середній діаметр частинки порошкового складу,  $\text{м}$ ;

При відомих фізико-хімічних властивостях ВП формула (5) дає змогу визначити мінімальну масу порошкового складу, яка здатна припинити горіння в полум'ї певного обсягу. Підставляючи (3) в (4), отримуємо мінімальну масу порошкового складу, здатну припинити горіння на розрахунковій площі (за умови розпилення порошкового складу в зоні горіння).

$$m_{PS}^R = \frac{\beta \cdot d_{PS}^{SR2} \cdot F_{PG}^{\frac{3}{2}} \cdot \rho_{PS}}{12 \cdot \varepsilon}, \quad (6)$$

де  $\beta$  – мінімальне значення константи гетерогенної рекомбінації, при якому спостерігається гасіння полум'я,  $\text{с}^{-1}$ ;  $d_{PS}^{SR}$  – середній діаметр частинки порошкового складу,  $\text{м}$ ;  $F$  – площа пожежі,  $\text{м}^2$ ;  $\varepsilon$  – коефіцієнт дифузії частинок порошкового складу в газовому середовищі зони підготовки до горіння,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність частки ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Аналіз виразу (6) показує, що при гасінні однаковими за хімічним складом порошковими сумішами, у яких коефіцієнти швидкості гетерогенної реакції рекомбінації атомарного кисню  $\beta$  і середні діаметри частинок порошку  $d_{PS}^{SR}$  практично однакові, основну роль в зниженні маси ВП, що необхідна для гасіння пожежі, грає коефіцієнт дифузії частинок порошку в зоні горіння.

Якщо припустити, що частка порошку при русі в зоні горіння підпорядковується загальноприйнятій теорії руху частинок в газах [15, 17], то оцінити залежність коефіцієнта дифузії від швидкості руху часток порошкового складу і довжи-

ни вільного пробігу можна виходячи з кінетичної теорії газів. Тоді, згідно з [10, 12].

$$\varepsilon = \frac{v_{PS}^{SR} \cdot \lambda}{3}, \quad (7)$$

де  $v_{PS}^{SR}$  – середня швидкість руху частинки порошку в шарі газу,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\lambda$  – довжина вільного пробігу частинки порошку,  $\text{м}$ .

Підставивши (7) в (5), отримаємо залежність зміни розрахункової маси порошкового складу від швидкості руху частинок при відомих характеристиках ВП, довжині вільного пробігу частинки порошку і площі пожежі.

$$m_{PS}^R = \frac{\beta \cdot d_{PS}^{SR2} \cdot F_{PG}^{\frac{3}{2}} \cdot \rho_{PS}}{4 \cdot v_{PS}^{SR} \cdot \lambda_{PS}}, \quad (8)$$

де  $\beta$  – мінімальне значення константи гетерогенної рекомбінації, при якому спостерігається гасіння полум'я,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність частки ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

З формули (8) випливає, що забезпечити збільшення ефективності застосування ВП, можна шляхом підвищення швидкості руху частинок ВП в зоні горіння, що викидаються з порожнини капсули.

Таким чином, маса окремо взятого порошкового складу, яка необхідна для гасіння розрахункової площі пожежі (якщо розглядати основний механізм вогнегасної дії гетерогенної рекомбінації атомарного кисню), є обернено пропорційною до швидкості руху частинок порошкового складу в зоні горіння. У загальному вигляді:

$m_{PSO} = f(v_{PS}^{SR}, \beta, d_{PS}^{SR}, \rho_{PS}, F_{PG}, \lambda_{PS})$ . Тоді кількість контейнерів, здатних припинити горіння на заданій площі, можна розрахувати:

$$N_{PS}^R = \frac{m_{PS}^R}{m_{PS}}, \quad (9)$$

де  $m_{PS}$  – маса порошкового складу, що міститься в одній капсулі,  $\text{кг}$ .

Підставимо (8) в (9) отримаємо:

$$N_{PS}^R = \frac{\beta \cdot d_{PS}^{SR2} \cdot F_{PG}^{\frac{3}{2}} \cdot \rho_{PS}}{4 \cdot v_{PS}^{SR} \cdot \lambda_{PS} \cdot m_{PS}}, \quad (10)$$

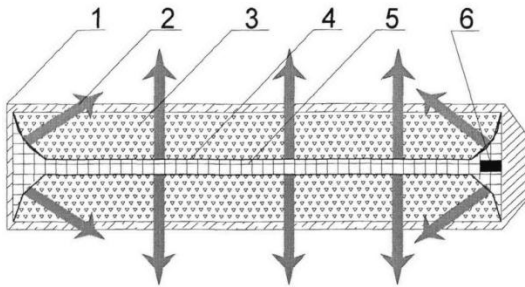
де  $\beta$  – мінімальне значення константи гетерогенної рекомбінації, при якому спостерігається гасіння полум'я,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $m_{PS}$  – маса порошкового складу, що міститься в одній капсулі,  $\text{кг}$ .

Аналітична залежність (10) дає змогу розрахувати кількість контейнерів, начинених вогнегасними порошковими складами, для гасіння пожеж класів А, В.

При використанні СУП для досягнення максимальної ефективності пожежогасіння з використанням контейнерів начинених ВП, необхідно

забезпечити максимальну рівномірність розпилення вогнегасного заряду в розрахунковому обсязі  $V_{ZG}$ . Вибухові речовини фугасної дії (амонал, амоніт, гексоген та ін.) [17, 18-20] дозволяють досягти максимальної ефективності завдяки викиду вогнегасної речовини енергією, що виділяється при детонації вибухових речовин (рис. 1).

При попаданні в зону горіння під дією внутрішніх сил контейнер розривається, звільняючи інертні продукти детонації і порошок складу.



**Рисунок 1** – Дія сил в контейнері при викиді ВП енергією, що виділяється при детонації вибухової речовини  
1 – корпус контейнера, 2 – напрям дії сил викиду ВП, 3 – ВП у диспергованому стані, 4 – еластична газопроникна оболонка, 5 – пірозбудник, 6 – піропатрон

При цьому флегматизація процесу горіння крім вогнегасної дії порошкових складів досягається: 1) відривом фронту полум'я від горючого навантаження; 2) дробленням фронту полум'я на окремі ділянки, які не здатні підтримувати горіння; 3) розбавленням зони горіння інертними продуктами вибуху.

Швидкість розльоту продуктів вибуху (а разом з ними і порошкових складів) залежить від форми та маси оболонки контейнера, а також характеристик і маси детонуючої речовини [21].

При вибуху у контейнері конденсованих (твердих) вибухових речовин виділення енергії внаслідок детонації може бути описано рівнянням балансу [21-23]:

$$E_K = S_E - S_M, \quad (11)$$

де  $S_E$  – сумарний тепловий ефект вибухового перетворення і розширення енергоносія – вибухового джерела (енергія вибухової хвилі);  $S_M$  – сумарна величина внутрішньої потенційної  $E_P$ , кінетичної  $E_K$  енергій продукту детонації, енергії переданої осколками контейнера навколишньому середовищу  $E_{os}$ , а також енергії, що йде на деформацію і руйнування оболонки  $E_r$ ;  $E_K$  – кінетична енергія розлітання осколків оболонки, Дж.

Кінетична енергія осколків визначається [22, 23]

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m_{OB} \cdot v_0^2, \quad (12)$$

де  $m_{OB}$  – маса оболонки, кг;  $v_0$  – швидкість осколків,  $m \cdot s^{-1}$ , під якою розуміється їх швидкість в момент максимального розгону.

Під масою оболонки розуміється маса речовини, що огортає вибухову речовину, її розраховуємо за формулою:

$$m_{OB} = m_K + m_{PS}, \quad (13)$$

де  $m_K$  – маса корпусу контейнера, кг;  $m_{PS}$  – маса ВП, що міститься в контейнері, кг.

Для конденсованих вибухових речовин [23-25]

$$S_E = m_Z \cdot Q_V, \quad (14)$$

де:  $m_Z$  – маса заряду вибухової речовини (ВР), кг;  $Q_V$  – теплота вибуху, Дж.

Для енергії  $E_K$  та  $E_P$  запишемо співвідношення:

$$E_K = \frac{1}{\Psi} \cdot m_Z \cdot v_0^2, \quad (15)$$

де  $\Psi$  – константа форми контейнера: для сферичного –  $\Psi = 3,34$ , для циліндричного –  $\Psi = 4$  [25];  $v_0$  – швидкість осколків,  $m \cdot s^{-1}$ , тобто їх швидкість в момент максимального розгону;  $m_Z$  – маса заряду вибухової речовини (ВР), кг.

$$E_P = \frac{1}{\rho_{PD} \cdot (\gamma - 1)} \cdot m_Z \cdot P \quad (16)$$

де  $P$  – тиск навколишнього середовища, Па;  $\rho_{PD}$  – щільність продуктів детонації до моменту повного розгону матеріалу оболонки,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\gamma$  – показник, що характеризує схильність продуктів детонації до розширення (зентропа), для конденсованих вибухових речовин  $\gamma = 3$ ;  $m_Z$  – маса заряду вибухової речовини (ВР), кг.

Нехтуючи енергією, що витрачається на руйнування оболонки, і енергією переданою осколками навколишньому середовищу, в сумі, що не перевищує близько 8% [23, 25] від величини  $S_M$ , з (12) отримаємо початкову швидкість польоту осколків контейнера:

$$v_0 = \sqrt{\left( Q - \frac{P}{\rho_{PD} \cdot (\gamma - 1)} \right) \cdot \frac{2 \cdot \frac{m_Z}{m_{OB}}}{1 + 2 \cdot \frac{m_Z}{m_{OB} \cdot \Psi}}} \quad (17)$$

де  $P$  – тиск навколишнього середовища, Па;  $\rho_{PD}$  – щільність продуктів детонації до моменту повного розгону матеріалу оболонки,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\gamma$  – показник, що характеризує схильність продуктів детонації до розширення (зентропа), для конденсованих вибухових речовин  $\gamma = 3$ ;  $m_Z$  – маса заряду вибухової речовини (ВР), кг;  $\Psi$  – константа форми контейнера: для сферичного контейнера  $\Psi = 3,34$ , для циліндричного контейнера  $\Psi = 4$  [25];  $m_Z$  – маса заряду вибухової речовини (ВР), кг;  $m_{OB}$  – маса оболонки, кг;  $Q$  – теплота вибуху, Дж.

Введемо швидкість детонації конденсованих вибухових речовин –  $W$

$$W = 4 \cdot \sqrt{\left( Q - \frac{P}{\rho_{PD} \cdot (\gamma - 1)} \right)}, \quad (18)$$

де  $P$  – тиск навколишнього середовища, Па;  $\rho_{PD}$  – щільність продуктів детонації до моменту повного розгону матеріалу оболонки,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\gamma$  – показник, що характеризує схильність продуктів детонації до розширення (зентропа), для конденсованих вибухових речовин  $\gamma = 3$ ;  $Q$  – теплота вибуху, Дж.

Підставляючи (18) в (17) виведемо формулу залежності початкової швидкості руху фронту вибухової хвилі від швидкості детонації, маси вибухових речовин і оболонки

$$v_0 = \frac{W}{2} \cdot \sqrt{\frac{m_Z \cdot \psi}{2 \cdot (m_{OB} \cdot \psi + 2 \cdot m_Z)}}, \quad (19),$$

де  $\psi$  – константа форми контейнера: для сферичного –  $\psi = 3,34$ , для циліндричного –  $\psi = 4$  [25];  $m_Z$  – маса заряду вибухової речовини (ВР), кг;  $m_{OB}$  – маса оболонки, кг;  $W$  – швидкість детонації вибухових речовин,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Застосовуючи (19) для конденсованих ВР в циліндричній оболонці і прирівнюючи швидкість польоту осколків до швидкості польоту частинок порошкових складів  $v_0 = v_{PS}^{SR}$ , отримуємо початкову швидкість польоту частинок порошкового складу при детонації ВР

$$v_{PS}^{SR} = \frac{W}{2} \cdot \sqrt{\frac{m_Z}{2 \cdot m_{OB} + m_Z}}, \quad (20)$$

де  $m_Z$  – маса заряду ВР, кг;  $m_{OB}$  – маса оболонки, кг;  $W$  – швидкість детонації вибухових речовин,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Підставляючи (20) в (8) отримуємо аналітичну залежність для розрахунку мінімальної кількості порошкового складу, яка необхідна для гасіння вогнища пожежі площею  $F_{PG}$

$$m_{PS}^R = \frac{\beta \cdot d_{PS}^{SR2} \cdot F_{PG}^{\frac{3}{2}} \cdot \rho_{PS}}{2 \cdot W \cdot \sqrt{\frac{m_Z}{2 \cdot (m_K + m_{PS}) + m_Z}} \cdot \lambda_{PS}}, \quad (21),$$

де  $\beta$  – мінімальне значення константи гетерогенної рекомбінації, при якому спостерігається гасіння полум'я,  $\text{с}^{-1}$ ;  $d_{PS}^{SR}$  – середній діаметр частинки порошкового складу, м;  $F_{PG}$  – площа горіння,  $\text{м}^2$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність частки ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\lambda_{PS}$  – довжина вільного пробігу частинки порошку, м;  $m_K$  – маса корпусу контейнера, кг;  $m_{PS}$  – маса порошкового складу, що міститься в контейнері, кг;  $m_Z$  – маса заряду ВР, кг;  $W$  – швидкість детонації вибухових речовин,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

За аналогією з (9) отримаємо кількість контейнерів, необхідних для гасіння при викиді порошкових складів внаслідок впливу вибухової речовини

$$N_{PS}^{RW} = \frac{\beta \cdot d_{PS}^{SR2} \cdot F_{PG}^{\frac{3}{2}} \cdot \rho_{PS}}{2 \cdot W \cdot \sqrt{\frac{m_Z}{2 \cdot (m_K + m_{PS}) + m_Z}} \cdot \lambda_{PS} \cdot m_{PS}}, \quad (22),$$

де  $d_{PS}^{SR}$  – середній діаметр частинки порошкового складу, м;  $F_{PG}$  – площа горіння,  $\text{м}^2$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність частки ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\lambda_{PS}$  – довжина вільного пробігу частинки порошку, м;  $m_K$  – маса корпусу контейнера, кг;  $m_{PS}$  – маса порошкового складу, що міститься в контейнері, кг;  $m_Z$  – маса заряду ВР, кг;  $W$  – швидкість детонації вибухових речовин,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\rho_{PS}$  – щільність ВП,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Аналітична залежність (22) дозволяє розрахувати кількість контейнерів, начинених ВП різних рецептур, для гасіння пожеж класів А, В, при викиді ВП в результаті детонації вибухових складів.

### Висновки

1. Результати аналітичних досліджень дозволяють стверджувати про можливість ефективного застосування контейнерів, начинених ВП різних рецептур під час ліквідації пожеж класів А та В;

2. Аналітично виведені залежності дають можливість розрахувати необхідну кількість контейнерів з ВП, необхідних для гасіння пожеж класів А, В в закритих приміщеннях;

3. Обґрунтовано причини збільшення вогнегасної ефективності ВП різних рецептур у контейнерах порівняно з іншими способами їх доставки:

– вибуховий викид вогнегасного порошку безпосередньо в осередку зони горіння забезпечує майже 100% використання маси вогнегасного порошку на цілі пожежогасіння;

– значне підвищення швидкості польоту частинок ВП завдяки надлишковому тиску, створюваному продуктами детонації вибухових речовин;

– відрив фронту полум'я від горючого навантаження;

– подібнення фронту полум'я на окремі ділянки, які не здатні підтримувати самостійне горіння;

– розбавлення зони горіння інертними продуктами вибуху.

4. Визначено, що існує кореляція між швидкістю руху частинок ВП і його вогнегасною ефективністю.

### Список літератури:

1. Довідник керівника гасіння пожежі. К.: ДСНС. 2015. 358 с.
2. Макет модуля универсальной установки пожаротушения (УУПТ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.igps.ru/publication/Perenosnaya\\_ekspres-laboratoriya\\_dlya\\_operativnogo\\_opredeleniya\\_agressivnosti\\_sred](https://www.igps.ru/publication/Perenosnaya_ekspres-laboratoriya_dlya_operativnogo_opredeleniya_agressivnosti_sred).
3. Моисеев Ю. Н., Терехнев В. В. Пожарная техника : учебн. пособие. Книга 2. Мобильные средства пожаротушения. Екатеринбург: ООО "Издательство "Калан", 2015. 184 с.
4. Звіт Міжнародної асоціації пожежно-рятувальних служб (СТІФ) за 2018 рік. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ctif.org/commissions-and-groups/ctif-center-fire-statistics/news>.
5. Kent R. Crawford An Estimation of the Pneumatic Gun's Effectiveness / Kent R. Crawford, Nicholas W. Mitiukov, Patrick McSherry// Voennyi Sbornik. 2014, Vol. 4, No. 2, pp. 89-94
6. Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования. Методы испытаний: НПБ 170-98. М., 1999. 17 с.
7. Порошки огнетушащие специального назначения. Общие технические требования. Методы испытаний. Классификация: НПБ 174-98. М., 1998. 10 с.
8. Агаларова С. М., Сабинин О. Ю. Огнетушащие порошки. Проблемы. Состояние вопроса // Пожаровзрывобезопасность, 2007. Т.16, № 6.
9. Kusumanindyah Nur. The role of powder physicochemical properties on the extinction performance of an extinguishing powder for sodium fires / Kusumanindyah Nur , Brissonneau Laurent, Gilardi Thierry, Gatamel Cendrine, Berthiaux Henri // Nuclear Engineering and Design. 2019. Volume 346, May 2019, Pages 24-34 <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.02.017>
10. Ye Yan. Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K-powder fire extinguishing agent /Ye Yan, Zhiyue Han, Lingshuang Zhao, Zhiming Du, Xiaomin Cong // Fire and Materials. 2019. Volume42, Issue3 April 2018 Pages 336-344 <https://doi.org/10.1002/fam.2500>
11. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. К.Г. Бромштейна; Под ред. А.Ю. Кошмарова, В.Е. Макарова. М., 1990. 424 с.
12. Сабинин О. Ю. Оптимальные характеристики огнетушащих порошков и параметры их подачи для импульсных модулей порошкового пожаротушения; автореф. дис....к.т. н. М., 2008.
13. Добриков В. В., Федотов А. П., Ковальчук В. Ю. Расчет испарения частиц огнетушащих порошков в пламени // Пожарная профилактика : сб. науч. тр. М., 1997. С. 23-26.
14. Баратов А. Н. Горение Пожар Взрыв Безопасность. М., 2003. 364 с.
15. De-xuDu. Experimental Study on Fire Ex-

tinguishing Properties of Compound Superfine Powder / De-xuDu, Xu-haiPan, MinHua // Procedia Engineering. 2018. Volume 211, 2018, Pages 142-148 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.126>

16. Dongmei Huang. Influence of Particle Size and Heating Rate on Decomposition of BC Dry Chemical Fire Extinguishing Powders / Dongmei Huang, Xinqun Wang & Jian Yang // Particulate Science and Technology Volume 33, 2015 Issue 5: Nanoparticle Adhesion and Removal Pages 488-493 <https://doi.org/10.1080/02726351.2015.1013591>

17. Абдурагимов И. М., Андросов А. С., Исеева Л. К. Процессы горения. М., 1984. 383 с.

18. Безбородько М.Д., Учебник Пожарная техника, Москва, 2004.

19. Повзик Я.С. Пожарная тактика: М., 1999. 416 с.

20. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества. Издание третье, переработанное. М., 1972. 177 с.

21. Захматов В.Д. Разработка способов взрывной подачи огнетушащих порошков в очаг пожара: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. М., 1983. 26 с.

22. Захматов В. Д., Кожемякин А. С. Перспективные импульсные устройства и автоматические системы пожаровзрывозащиты радиационно зараженных объектов / Пожарная безопасность зданий, сооружений и объектов тушения пожаров : сб. науч. тр. М., 1999. С. 33 - 36.

23. Кукиб Б. Н., Росси Б.Д. Высокопредохранительные взрывчатые вещества. М., 1980. 172 с.

24. Кочетков К. Е., Котляревский В. А. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий / Под ред. Забегаяева А.В. М., 1996. 384 с.

25. Ловля С. А., Каплан Б. Л., Майоров В. В. Взрывное дело. Издание второе, переработанное. М., 1976. 272 с.

### References:

1. The Statute of the Extraordinary Situation Organs of the Administration and the Operational and Responsive Service of the Civil Service. К. : MVS, approved by order No. 340 from April 26, 2017.

2. Firefighting guide's guide. К. : DSNS. 2015. 358 pp.

3. Kent R. Crawford An Estimation of the Pneumatic Gun's Effectiveness / Kent R. Crawford, Nicholas W. Mitiukov, Patrick McSherry// Voennyi Sbornik – 2014, Vol. 4, No. 2, pp. 89-94

4. General purpose fire extinguishing powders. General technical requirements. Test methods: NPБ 170-98. М., 1999. 17 p.

5. Special purpose fire extinguishing powders. General technical requirements. Test methods. Classification: airbag 174-98. М., 1998. 10 p.

6. Agalarova S.M., Sabinin O. Yu. Fire extinguishing powders. Problems. The state of the issue // Fire and Explosion Safety, 2007. Vol. No. 16, No. 6
7. Nesterenko N.A., Taran E.N. Spectroscopic study of the mechanism of inhibition by diethylamine and halogen-containing compounds of the combustion process of acetylene-air flame. 1978. V. 14. P. 96.
8. Baratov A.N., Tropinov A.G., Zhartovsky V.M. Interaction of mixtures of diammonium phosphate and potassium chloride with active radicals of heptane flame // Kinetics and catalysis: Coll. scientific tr. M., 1988. T. 29. P. 524-529.
9. Dreisdel D. Introduction to the dynamics of fires / Trans. from English K.G. Bromshteyna; Ed. A.Yu. Koshmarova, V.E. Makarova. M., 1990. 424 p.
10. Sabinin O.Y. Optimum characteristics of fire extinguishing powders and parameters of their supply for pulse modules of powder fire extinguishing. Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. M., 2008.
11. Dobrikov V.V., Fedotov A.P., Kovalchuk V.Yu. Calculation of evaporation of particles of fire extinguishing powders in a flame // Fire prevention: Sat. scientific tr. M., 1997. C. 23-26.
12. Baratov A.N. Burning Fire Explosion Security. M., 2003. 364 p.
13. Demidov P.G., Shandyba V.A., Scheglov P.P. Combustion and properties of combustible substances. Second edition, revised. M., 1981. 272 p., II.
14. Wol K., Shipmen K. Diffusion flames // Combustion processes: Sat. scientific tr. M., 1961. S. 306-328.
15. Abduragimov I.M., Androsov A.S., Isaeva L.K. Combustion processes. M., 1984. 383 p.
16. GOST 27331-87 Fire equipment. Fire classification. M., 1988. 3 p.
17. Kiselev Ya.S. Physical models of combustion in a fire warning system. SPb., 2000. 264 p.
18. Pawzik Y.S. Fire tactics: M., 1999. 416 p.
19. Sharovarnikov A.F., Salem. P.P., C.S. Voyevoda. General and special chemistry: textbook. M., 2005. 458 p.
20. Salem. P.P., Sharovarnikov A.F. General chemistry. M., 2002. 472 p.
21. Salem P.P., Sharovarnikov A.F. Thermodynamics of chemical, phase and electrochemical transformations. M., 1999. 393 p.
22. Horst A.G. Gunpowder and explosives. Third edition, revised. M., 1972. 177 p.
23. Zakhmatov V.D. Development of methods for the explosive supply of fire extinguishing powders in the fire: Author. dis. Cand. tech. sciences. M., 1983. 26 p.
24. Zakhmatov V.D., Kozhemyakin A.S. Promising impulse devices and automatic fire and explosion protection systems for radiation-contaminated objects / Fire safety of buildings, structures and fire extinguishing objects: Coll. scientific tr. M., 1999. Pp. 33 - 36.
25. Kukib B.N., Rossi B.D. High safety explosives. M., 1980. 172 p.
26. Kochetkov K.E., Kotlyarevsky V.A. Accidents and disasters. Prevention and liquidation of consequences / Ed. Zabegaeva A.V. M., 1996. 384 p.
27. Lovlya S. A., Kaplan B. L., Mayorov V. V. Explosive case. Second edition, revised. M., 1976. 272 p.

*O. O. Kovalev, A. Y. Kalinovsky, O. G. Polivanov*

## DEVELOPMENT OF INDIVIDUAL ASPECTS OF CONTAINER METHOD OF FIRE EXTINGUISHING

Currently, the creation of fundamentally new technical means of fire extinguishing and the development of new methods for delivering fire extinguishing substances to a remote distance when extinguishing complex fires is the actual scientific and technical problem. The fire fighting equipment currently used in the territorial divisions of the SES of Ukraine does not allow delivering of fire extinguishing substances at a distance of 100 m and more. Existing fire fighting equipment is designed to deliver water, aqueous solutions and foams at a distance of up to 100 meters, as well as dry chemicals at a distance of up to 70 meters. Today various researchers are developing technical means and methods for remote delivery of such fire extinguishing agents as aerosol-forming compounds, dry chemical powders, fire extinguishing freons, solid carbon dioxide and organometallic compounds. At the same time, the use of the considered fire extinguishing agents did not become widespread in the fire and rescue units due to insufficient development of technical means and methods of delivery. To solve the problem of delivering fire extinguishing substances to a remote distance while extinguishing complex fires, it was proposed to use a barrelled fire extinguishing system, which ensures high-precision delivery by throwing the containers filled with extinguishing agent directly into the combustion zone along the ballistic trajectory. The analysis of various fire extinguishing substances and compositions for use in containers showed that to achieve the highest efficiency of fire extinguishing, it is advisable to use dry chemical powders.

As a result of the study of the use of dry chemical powders as container fillers, the mechanics of the fire extinguishing action of dry chemical compositions after releasing from the container by excessive pressure, created by detonation products of explosives, was investigated. A method for determining the total mass of dry chemical powder and the required number of containers filled with dry chemical powder for extinguishing class A and B fires has been developed.

**Keywords:** fire extinguishing, barrelled fire extinguishing system, container, dry chemical powder.