

**АКАДЕМІЯ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

**БОНДАРЕНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 614.8

**РОЗРОБКА ГЕНЕРАТОРІВ ВОГНЕГАСЯЧОГО  
АЕРОЗОЛЮ ІЗ ПОКРАЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

21.06.02 – Пожежна безпека

Автореферат  
дисертації на здобуття  
наукового ступеня кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Академії цивільного захисту України МНС України

Науковий керівник – кандидат психологічних наук, доцент Росоха Володимир Омелянович, Академія цивільного захисту України, ректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Прохач Едуард Юхимович, Харківська філія Державного підприємства МО України "Воєнконверс-43", директор;

кандидат технічних наук, доцент Заїка Петро Іванович, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України, начальник кафедри.

Провідна установа – Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури МОН України.  
Кафедра безпеки життєдіяльності та інженерної екології.

**Захист відбудеться 24.02.2005 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради  
К 64.707.01 в Академії цивільного захисту України за адресою: вул.  
Чернишевського, 94, м. Харків, 61023.**

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Академії цивільного захисту України за адресою: вул. Чернишевського, 94, м. Харків, 61023.

Автореферат розісланий 22.01.2005 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.І. Кривцова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми.* Монреальська конвенція і ряд інших міжнародних угод, стали непереборною перешкодою перед вогнегасячими речовинами, що руйнують озоновий прошарок атмосфери Землі. Україна не залишилася осторонь від цього процесу, про що свідчить ратифікація міжнародних угод. Пошук ефективної альтернативи екологічно небезпечним хладонам, привів до створення принципово нового засобу — вогнегасячого аерозолю. Основною перевагою цього засобу є висока ефективність при гасінні пожеж класу В і підкласу А2 в обмежених обсягах. Одержують газоаерозольну суміш шляхом запалювання спеціально підібраної композиції безпосередньо в момент гасіння пожежі. Процес одержання аерозолю протікає в камері згорання генератора вогнегасячого аерозолю (ГВА).

Використання ГВА як виконавчого елемента системи автоматичного пожежогасіння дозволяє позбутися від ряду недоліків, властивих системам об'ємного пожежогасіння:

- наявність балонів або судин під тиском для збереження речовини;
- наявність магістральних і розподільних мереж трубопроводів для доставки вогнегасячої речовини;
- значна металоємність систем пожежогасіння.

Проте, час, необхідний для створення вогнегасячої концентрації в приміщенні, що захищається, в системах аерозольного гасіння, перевищує значення аналогічного показника інших систем об'ємного гасіння. Основну частину його складає час роботи ГВА.

Провідна роль у розробці і виробництві як аерозолеутворюючих сполук (АУС), так і генераторів вогнегасячого аерозолю, належить російським підприємствам. Зокрема, АТ "Граніт-Саламандра" (м. Москва), НВО ім. С.М. Кірова (м. Перм), Науково-дослідний інститут прикладної хімії (м. Сергієв Посад), Федеральний центр подвійних технологій "Союз" (м. Держинський, Московська область), Іноваційно-впроваджувальний центр "Техномаш" (м. Перм), фірма "Эпотос+" (м. Москва), ТОВ "Озон-Пермь" (м. Перм), Спеціальне конструкторське технологічне бюро "Технолог" (м. Санкт-Петербург).

В Україні над створенням систем аерозольного пожежогасіння працюють УкрНДПБ МНС України, СП "Паралакс", НВФ "Бранд-Майстер" (м. Київ), ТОВ "Крайз" (м. Полтава), ТОВ "Проектний інститут "Електропром", АЦЗУ МНС України (м. Харків).

До розробки засобів аерозольного гасіння виявляють інтерес і закордонні фірми. Фірмою Kidde Walter (США) виконано цикл експериментальних досліджень з гасіння пожеж в двигунах та багажних відсіках літаків за допомогою аерозольних сполук. Фірма Dinamit Nobel (Німеччина) сумісно з Люберецьким НВО "Союз" (Росія) налагодила випуск аерозольних генераторів для європейського споживача. Фірмою Kidde Deugra (Німеччина) сумісно з фірмою "Інтертехнолог" (Росія) створено рецептури аерозолеутворюючих сполук (АУС), які не утворюють токсичних продуктів та мають невелику температуру горіння.

Питання створення й удосконалювання систем аерозольного гасіння висвітлені в роботах А.М. Баратова, В.В. Агафонова, М.П. Копилова, В.М. Алікіна, Д.А. Корольченко. В їх роботах основна увага приділяється вирішенню наступних проблем: зниження пожежної небезпеки процесу отримання вогнегасячої речовини, вибору оптимальних схем розміщення ГВА для забезпечення рівномірного розподілу аерозолу в приміщенні, що захищається. Питанням удосконалення характеристик ГВА, таких як тривалість роботи, швидкодія, інтенсивність аерозолеутворення, практично не приділяється уваги. Відсутність математичних моделей, які пов'язують характеристики ГВА з параметрами заряду АУС, не дозволяє створювати нові модифікації ГВА з бажаними характеристиками. Тому задача з обґрунтування можливості створення генераторів вогнегасячого аерозолу з покращеними характеристиками, а також розробка рекомендацій з їх проектування, є актуальною.

***Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.*** Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи, яка виконувалась на замовлення Головного управління державної пожежної охорони МВС України – № ДР 0199U00430.

***Мета та задачі дослідження.*** Метою роботи є обґрунтування можливості створення генераторів вогнегасячого аерозолу з покращеними динамічними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз процесів, що протікають у камері згоряння ГВА;
- побудувати математичні моделі, які адекватно описують процеси, що відбуваються у камері згоряння ГВА;
- визначити параметри заряду АУС, параметри генератора, що забезпечують мінімальний час роботи ГВА при обмеженнях, які забезпечують певне значення масової витрати вогнегасячої речовини;
- створити експериментальну установку для дослідження динамічних характеристик ГВА;

- розробити методику експериментального визначення характеристик ГВА;
- оцінити адекватність отриманих математичних моделей;
- розробити рекомендації щодо проектування ГВА з покращеними характеристиками.

**Об'єкт дослідження** – генератор вогнегасячого аерозолю та процеси, що відбуваються в камері згоряння під час його роботи.

**Предмет дослідження** – характеристики і параметри генератора вогнегасячого аерозолю.

**Методи дослідження:** теорія операційного обчислення, закони термодинаміки, теорія планування експерименту, методи аналітичного і імітаційного моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- вперше створено комплекс математичних моделей, які описують процеси, що відбуваються в генераторі вогнегасячого аерозолю;
- вперше отримано комплекс технічних характеристик і параметрів, стосовно ГВА покращеного типу;
- вперше з використанням методів імітаційного моделювання водночас з методами теорії планування експерименту отримані залежності тривалості роботи ГВА та масової витрати від щільності, швидкості та температури горіння заряду АУС та геометричних характеристик корпусу генератора;
- вперше на основі використання критерію мінімуму часу формування вогнегасячої речовини розв'язана задача з вибору параметрів ГВА при обмеженнях, які накладаються на параметри заряду АУС.

**Практичне значення отриманих результатів.** Комплекс математичних моделей, які описують робочі процеси в ГВА, програми розрахунку їх характеристик, а також рекомендації з проектування генераторів являють собою науково-методичну базу для розробки нових модифікацій ГВА із покращеними характеристиками.

Результати досліджень впроваджені в НВФ "Бранд–Майстер" (м. Київ), Проектному інституті "Електропром" (м. Харків), ТОВ "Крайз" (м. Полтава) при розробці нових модифікацій ГВА та оптимізації характеристик систем аерозольного пожежогасіння, які створюються для різноманітних об'єктів. Позитивний ефект від результатів впровадження досягається внаслідок скорочення на 40% часу створення необхідної вогнегасячої концентрації в приміщенні, що захищається.

Отримані динамічні моделі ГВА використовуються в навчальному процесі при викладанні дисципліни "Засоби автоматичного протипожежного захисту" (розділ 1, тема 1), "Пожежна і виробнича автоматика" (розділ 1,

тема 1).

**Особистий внесок здобувача.** В роботах, які опубліковані в співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні доцільності використання генераторів вогнегасячого аерозолію для захисту особливих об'єктів [6], в аналізі переваг та недоліків сучасних систем аерозольного пожежогасіння [11].

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на III науково-практичній конференції "Пожежна безпека" (м. Київ, 1997 р.), XV науково-практичній конференції "Проблеми горіння і гасіння пожеж на рубежі століть" (м. Москва, 1999 р.), XVI науково-практичній конференції "Великі пожежі: запобігання та гасіння" (м. Москва, 2001 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми пожежної безпеки. Ліквідація аварій та їх наслідків» (м. Донецьк, 2002 р.), VI науково-практичній конференції «Пожежна безпека» (м. Харків, 2003 р.), науково-практичній конференції «Наглядово-профілактична діяльність в МНС» (м. Харків, 2004 р.), а також на науково-технічних семінарах АЦЗУ.

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових статей, з яких 6 – в виданнях, що входять до Переліку ВАК України, та 7 тез доповідей на наукових конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та додатку. Загальний обсяг дисертації складає 232 сторінки, вона містить 71 рисунок, 42 таблиці і 128 використаних літературних джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**В першому розділі** проведений аналіз сучасних автоматичних засобів об'ємного пожежогасіння та сформульовані задачі досліджень.

Аналіз сучасних вогнегасних речовин, що використовуються при об'ємному гасінні показав, що найбільшу ефективність мають бром, хлормісткі хладони, але, разом з тим, ці речовини руйнують озоновий прошарок атмосфери Землі, що може призвести до екологічної катастрофи в масштабах всієї планети. Показано, що вогнегасячі речовини, які позбавлені цього недоліку, мають значно меншу ефективність. Визначено, що розроблені останнім часом аерозолеутворюючі сполуки при використанні їх в обмежених просторах для гасіння пожеж класу В та підкласу А2 демонструють кращі показники ніж хладони.

Дослідження рецептур сучасних зарядів АУС і властивостей

одержуваних із них вогнегасячих аерозолей, показало, що сучасні аерозолеутворюючі сполуки мають високі експлуатаційні характеристики, наприклад, вогнегасяча концентрація у 3-5 разів нижче концентрації хладону 13В1, а коефіцієнт озоноруйнівної дії аерозолі при вогнегасячих концентраціях дорівнює нулю. Також продукти згоряння АУС безпечні для людей, не руйнують обладнання, що захищається. Разом з тим температура продуктів згоряння має достатньо високі значення.

Вивчення особливостей побудови та функціонування сучасних систем об'ємного пожежогасіння показало, що найперспективнішими є автоматичні системи аерозольного пожежогасіння. Основним виконуючим елементом яких є генератор вогнегасячого аерозолі.

Виявлені переваги систем пожежогасіння з використанням ГВА у порівнянні з традиційними, а саме: відсутність посудин під тиском для зберігання вогнегасячої речовини та мережі трубопроводів для її доставки, як наслідок цього – низька металоємність системи, простота технічного обслуговування та тривалий строк експлуатації системи. Але час роботи системи аерозольного пожежогасіння, порівняно з аналогічною характеристикою систем об'ємного гасіння, залишається досить великим. Значною мірою на це впливає тривалість роботи ГВА.

В результаті аналізу сфер застосування існуючих модифікацій ГВА та їх технічних характеристик, запропонована класифікація генераторів по 14 ознакам. Показано, що основними технічними характеристиками, які повинні бути враховані при проектуванні систем аерозольного пожежогасіння, створенні нових модифікацій ГВА, а також повинні бути наведені в паспорті на пристрій, є наступні показники: час роботи, швидкодія, маса заряду АУС та генератора, вогнегасна здатність аерозолі, закон зміни масової витрати, радіус високотемпературних зон, тип ініціюючого пристрою, габаритні розміри, умови експлуатації.

Проаналізовано схемні рішення існуючих модифікацій генераторів та визначено тенденції щодо вдосконалення їх конструкції, а саме: зниження температури вогнегасячого аерозолі і виключення можливості потрапляння не повністю окислених частин АУС в об'єм, що захищається. Визначено, що питанням удосконалення деяких характеристик ГВА, зокрема, часу спрацьовування, тривалості роботи, інтенсивності утворення аерозолі майже не приділяється уваги. Це пояснюється відсутністю математичних моделей, які б пов'язували характеристики ГВА з його геометричними параметрами та характеристиками заряду АУС. Показано, що використання методів математичного моделювання дозволить створювати ГВА з покращеними характеристиками.

На підставі цього сформульовано задачі дослідження та визначено шляхи їх розв'язання.

*Другий розділ* присвячено розробці математичної моделі процесів, що відбуваються в ГВА під час його роботи.

В основу математичної моделі генератора покладені рівняння збереження маси та енергії:

$$\frac{\partial(\rho \cdot F)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot \omega \cdot F) = \rho_T \cdot \Pi \cdot u; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left( \rho \cdot F \cdot \left( e + \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \cdot \omega \cdot F \left( h + \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \right) \right) = \rho_T \cdot \Pi \cdot u \cdot \chi \cdot h_T, \quad (2)$$

де  $\rho, \rho_T$  – щільність продуктів згоряння і заряду;  $\omega$  – швидкість руху продуктів згоряння;  $\Pi, F$  – периметр та площа перерізу;  $e, h$  – внутрішня енергія і ентальпія одиниці маси продуктів згоряння;  $\chi$  – середній за часом і об'ємом коефіцієнт теплових витрат в генераторі;  $h_T$  – повна ентальпія продуктів згоряння аерозолеутворюючого заряду;  $u$  – середня по периметру швидкість горіння заряду.

Рівняння (1), (2) доповнені рівнянням поверхні, що горить, та рівнянням стану ідеального газу:

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} = \Pi \cdot u; \quad (3)$$

$$p = \rho \cdot R \cdot T, \quad (4)$$

де  $T$  – температура продуктів згоряння;  $R$  – газова постійна.

Інтегруючи систему рівнянь (1)-(4) за довжиною заряду, а також враховуючи ряд припущень, маємо систему нелінійних диференціальних рівнянь, що пов'язує середньооб'ємні газодинамічні параметри генератора у вигляді:

$$\begin{cases} V_K \cdot \frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{R \cdot \bar{T}}{\bar{p}} [\rho_T \cdot S_3 \cdot \bar{u} \cdot (\chi \cdot k \cdot \bar{T}_T - \bar{T}) + \bar{T} \cdot (1 - k) \cdot m_*(\bar{p}, \bar{T})]; \\ V_K \cdot \frac{d\bar{p}}{dt} = R \cdot k \cdot [\rho_T \cdot S_3 \cdot \bar{u} \cdot \chi \cdot \bar{T}_T - m_*(\bar{p}, \bar{T}) \cdot \bar{T}]; \\ \frac{dV_K}{dt} = S_3 \cdot \bar{u}, \end{cases} \quad (5)$$



де  $V_K$  – вільний об'єм камери згоряння;  $T_\Gamma$  – температура горіння заряду АУС;  $S_3$  – площа поверхні горіння;  $k$  – показник адіабати;  $\bar{u}$  – середня по поверхні швидкість горіння заряду АУС, що визначається виразом:

$$\bar{u} = u_a \cdot \left( \frac{\bar{p}}{p_{\text{ATM}}} \right)^\nu \cdot e^{\beta \cdot T_H},$$

де  $u_a$  – швидкість горіння заряду АУС при атмосферному тиску;  $p_{\text{ATM}}$  – атмосферний тиск;  $\nu$  – показник ступеню;  $T_H$  – початкова температура заряду АУС;  $\beta$  – постійна, що залежить від початкової температури заряду;  $m_*(\bar{p}, \bar{T})$  – масова витрата вогнегасячої речовини при докритичному режимі її витоку:

$$m_*(\bar{p}, \bar{T}) = \mu \cdot S_B \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{\bar{p}^2}{R \cdot \bar{T}} \cdot \left( \frac{p_{\text{ATM}}}{\bar{p}} \right)^{\frac{2}{k}} \left( 1 - \left( \frac{p_{\text{ATM}}}{\bar{p}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)},$$

де  $S_B$  – площа вихідних отворів;  $\mu$  – коефіцієнт витрат.

Рішення системи (5) можливо лише в чисельному вигляді. Застосувавши процедуру лінеаризації, припускаючи, що в динамічному режимі відхилення середньооб'ємного тиску та температури від стаціонарних значень незначне, маємо:

$$\begin{cases} \tau_1 \cdot \frac{d \delta \bar{T}}{dt} = K_p \cdot \delta \bar{p} - \delta \bar{T} + k_{1T} \cdot \delta \bar{T}_H; \\ \tau_2 \cdot \frac{d \delta \bar{p}}{dt} = K_T \cdot \delta \bar{T} - \delta \bar{p} + k_{2T} \cdot \delta \bar{T}_H, \end{cases} \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{2 \cdot V_K \cdot p_{\text{CT}}}{T_{\text{CT}} \cdot R \cdot m_{\text{CT}}^* \cdot (1+k)}; \quad K_p = \frac{(2 \cdot \nu \cdot k - \varphi_p) \cdot (k-1)}{k \cdot (k+1)}; \quad k_{1T} = 2 \cdot \beta \cdot T_H \cdot \frac{k-1}{k+1}; \\ \tau_2 &= \frac{2 \cdot V_K \cdot p_{\text{CT}}}{T_{\text{CT}} \cdot R \cdot m_{\text{CT}}^* \cdot (\varphi_p - 2 \cdot k \cdot \nu)}; \quad K_T = \frac{k}{2 \cdot k \cdot \nu - \varphi_p}; \quad k_{2T} = \frac{2 \cdot \beta \cdot T_H \cdot k}{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot \nu}; \\ \varphi_p &= \frac{(k-1) \cdot (2 \cdot p_{\text{CT}}^\alpha - p_{\text{ATM}}^\alpha)}{p_{\text{CT}}^\alpha - p_{\text{ATM}}^\alpha}. \end{aligned}$$

В сталому режимі роботи генератора середньоб'ємний тиск  $p_{CT}$  в окремих випадках визначається наступними виразами:

1. При  $\nu=0,14$ :

$$p_{CT} = p_{ATM} \cdot \sqrt[3]{1 + \eta}.$$

2. При  $\nu=0,21$ :

$$p_{CT} = p_{ATM} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{\eta + \sqrt{\eta^2 + 4}}{2}\right)^2}.$$

3. При  $\nu=0,28$ :

$$p_{CT} = p_{ATM} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{1 - \eta}}.$$

4. При  $\nu=0,43$ :

$$p_{CT} = p_{ATM} \cdot \sqrt[3]{\frac{1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \eta}}{2 \cdot \eta}},$$

$$\text{де } \eta = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\rho_T \cdot S_3 \cdot u_1}{\mu \cdot S_B \cdot p_{ATM}} \right)^2 \cdot T_T \cdot \chi \cdot R \cdot \alpha; \quad \alpha = \frac{k-1}{k}.$$

На рис. 1, 2 наведено графічні залежності  $p_{CT}$  від параметрів заряду.

Аналіз залежностей показав, що при зміні параметрів у межах  $\rho_T=(1600 \div 2400) \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $T_T = (1500 \div 2500) \text{ К}$ ;  $S_3=(7.26 \div 10.9) \text{ см}^2$ ;  $S_B=(1 \div 1.4) \text{ см}^2$ , відносні зміни тиску складають 2 %.

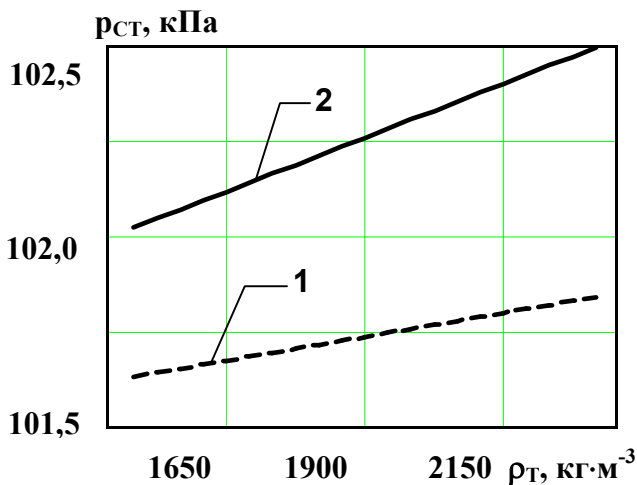


Рис. 1. Залежність  $p_{CT}$  від щільності заряду АУС за різної температури горіння: 1 –  $T_T=1500 \text{ К}$ ; 2 –  $T_T=2400 \text{ К}$

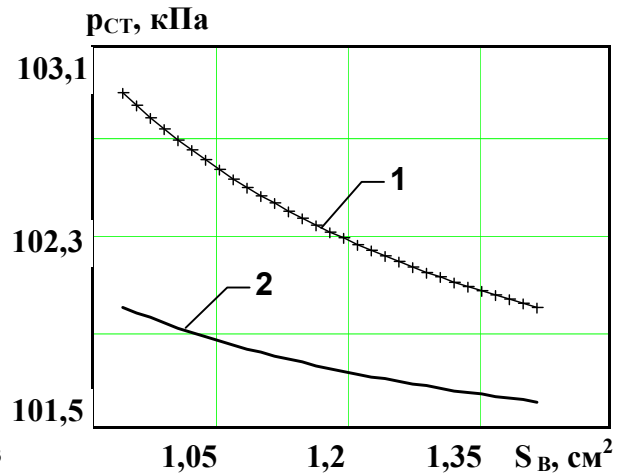


Рис. 2. Залежність  $p_{CT}$  від площі вихідних отворів: 1 –  $S_3=10,9 \text{ см}^2$ ; 2 –  $S_3=7,26 \text{ см}^2$

Виключаючи з системи (6)  $\delta T$  та застосовуючи до отриманого рівняння пряме перетворення Лапласу, отримуємо передаточну функцію – основну динамічну характеристику ГВА:

$$W_p(s) = \frac{k_{BX} \cdot (\tau' \cdot s + 1)}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \tau \cdot \zeta \cdot s + 1}, \quad (7)$$

де  $\tau$  – постійна часу;  $k_{BX}$  – коефіцієнт передачі;  $\zeta$  – коефіцієнт згасання, що визначаються з виразів:

$$\tau = \frac{p_{CT} \cdot V_K}{T_{CT} \cdot m_{CT}^* \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v}}; \quad \tau' = \frac{p_{CT} \cdot V_K}{T_{CT} \cdot m_{CT}^* \cdot R};$$

$$\zeta = \frac{\varphi_p + 1 + k \cdot (1 - 2 \cdot v)}{2\sqrt{2} \cdot \sqrt{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v}}; \quad k_{BX} = \frac{2 \cdot k \cdot \beta \cdot T_H}{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v}.$$

Доведено, що тривалість перехідного процесу визначається виразом:

$$t_{ПП} = \frac{\tau}{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \ln \left[ 10 \cdot \left( \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} + 1 \right) \right]. \quad (8)$$

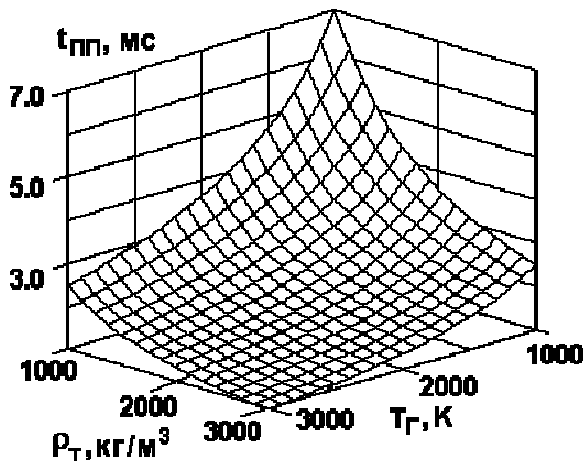


Рис. 3. Залежність тривалості перехідного процесу від щільності та температури горіння заряду АУС

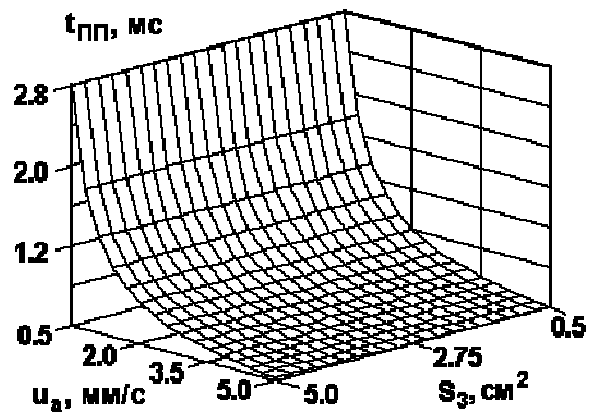


Рис. 4. Залежність тривалості перехідного процесу від швидкості горіння заряду та площі поверхні горіння

Дослідження залежності (8), представленої у графічному вигляді (рис. 3, 4) від параметрів заряду, показало, що при зміні  $T_G = (1000 \div 3000) \text{ K}$ ;

$\rho_T = (1000 \div 3000) \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $u_a = (0.5 \div 5) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $S_3 = (0.5 \div 5) \text{ см}^2$ , значний вплив здійснюють щільність заряду та швидкість його горіння.

*У третьому розділі* проведено дослідження характеристик ГВА.

Отримано комплекс математичних моделей, які пов'язують основні технічні характеристики ГВА: тривалість роботи, масову витрату аерозоля з параметрами заряду АУС. Аналіз залежностей, які представлені у графічному вигляді (рис. 5 – 8), показав, що значний вплив на вказані характеристики здійснюють щільність заряду, швидкість його горіння, початкова температура, довжина заряду та площа поверхні горіння.

В ході аналізу характеристик ГВА у сталому режимі роботи з'ясовано, що для забезпечення докритичного режиму витоку вогнегасячого аерозолю з генератора необхідно, щоб максимальне співвідношення між площею поверхні горіння заряду та площею випускних отворів ГВА не перевищувало значення 30. Найбільший вплив на  $S_3/S_B$  здійснюють такі параметри заряду АУС як його щільність та швидкість горіння при атмосферному тиску.

Аналітичним шляхом доведено, що маса вогнегасячого аерозолю, який утворюється під час роботи ГВА, еквівалентна масі заряду АУС.

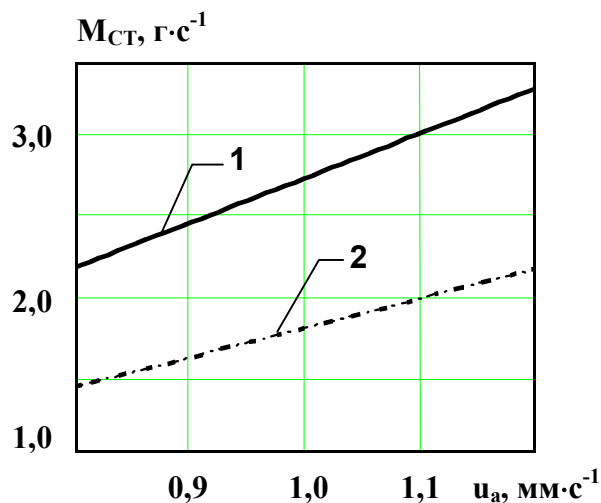


Рис. 5. Залежність масової витрати від швидкості горіння заряду:

1 –  $\rho_T = 2200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ; 2 –  $\rho_T = 1450 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$

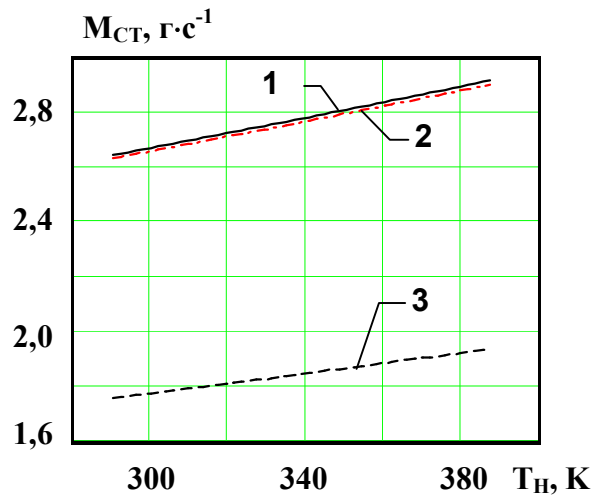


Рис. 6. Залежність масової витрати від початкової температури:

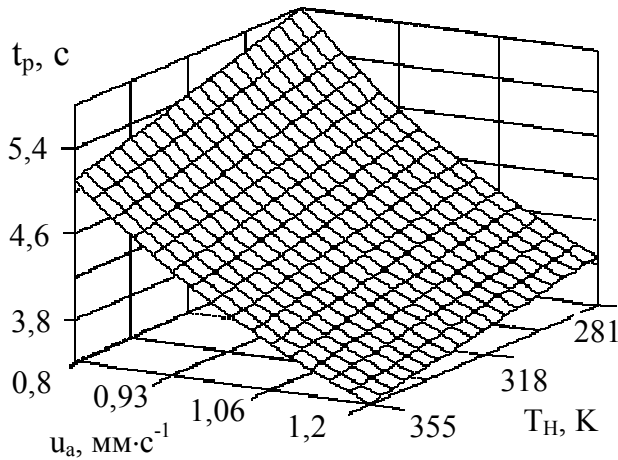
1 –  $\rho_T = 2200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $\nu = 0.43$ ;

2 –  $\rho_T = 2200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $\nu = 0.14$ ;

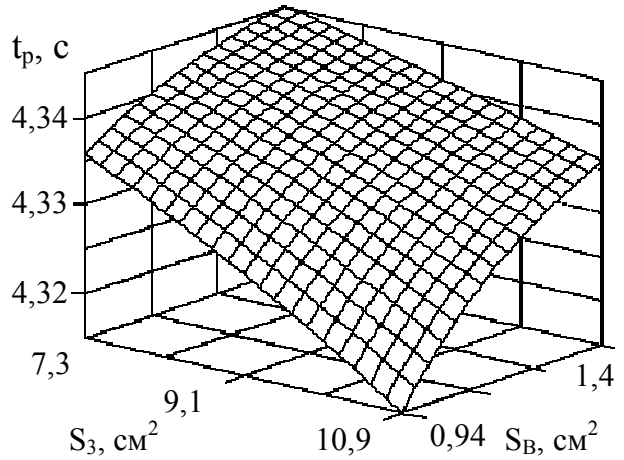
3 –  $\rho_T = 1450 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $\nu = 0.43$

Запропоновано шлях розв'язання задачі з удосконалення характеристик ГВА, який передбачає використання методів імітаційного моделювання в поєднанні з методами теорії планування експерименту і подальшим визначенням найкращого результату.

В основу імітаційних моделей, що реалізуються в оболонці MathCAD у вигляді пакетів прикладних програм, були покладені математичні моделі, які пов'язують комплекс технічних характеристик з параметрами ГВА.



**Рис. 7.** Залежність тривалості роботи ГВА від швидкості горіння та початкової температури заряду



**Рис. 8.** Залежність тривалості роботи ГВА від площі поверхні горіння та площі вихідних отворів

Визначення оптимального значення динамічних показників якості проводилось за критерієм

$$\min_{G_i \in G} t_{\text{ПП}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

де  $G$  – область припустимих значень параметрів ГВА, а тривалість перехідного процесу  $t_{\text{ПП}}$ , як функція параметрів цього ГВА, зображується у вигляді рівняння регресії

$$t_{\text{ПП}} = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^4 b_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (10)$$

де  $x_1$  – щільність заряду  $\rho_T$ ;  $x_2$  – висота вільного простору в камері ГВА  $h$ ;  $x_3$  – швидкість горіння заряду  $u_a$ ;  $x_4$  – відношення площі поверхні горіння до площі випускних отворів  $S_3/S_B$ .

При виборі діапазону варіювання факторів приймалась гіпотеза про нормальний закон їх зміни. Рівняння регресії, після оцінки значимості коефіцієнтів по критерію Стьюдента приймає наступний вигляд:

$$t_{\text{ПП}} = 266,7 + 45,33 \cdot x_1 + 87,17 \cdot x_2 + 68,08 \cdot x_3 + 156,17 \cdot x_4 + \\ + 14,5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 10,88 \cdot x_1 \cdot x_3 + 24,88 \cdot x_1 \cdot x_4 + 21,75 \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ + 48,75 \cdot x_2 \cdot x_4 + 37,63 \cdot x_3 \cdot x_4 + 22,05 \cdot x_4^2. \quad (11)$$

Адекватність моделі (11) підтверджена за допомогою критерію Фішера.

Оптимізаційна задача розв'язувалась з використанням узагальненого методу Лагранжу. Координати граничної точки, приймають наступних значень:  $x_1=1$ ,  $x_2=-1$ ,  $x_3=-1$ ,  $x_4=-1$ . Таким чином, тривалість перехідного процесу в ГВА буде найменшою і дорівнюватиме в  $t_{\text{ПП}} = 80,53$  мкс, при параметрах заряду:  $\rho_T = 2100 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $h = 2,75 \text{ см}$ ;  $u_a = 0,9 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $S_3/S_B = 7$ .

При розв'язанні задачі пошуку мінімуму часу роботи ГВА використовувалось рівняння регресії, коефіцієнти якого відповідають оцінкам за критерієм Стьюдента:

$$t_p = 60,64 - 0,3 \cdot x_1 + 7,6 \cdot x_2 - 9,6 \cdot x_3 - 2,48 \cdot x_4 - 0,38 \cdot x_5 \\ + 1,38 \cdot x_3^2 - 1,18 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,35 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,34 \cdot x_3 \cdot x_4, \quad (12)$$

де  $x_1$  – щільність заряду  $\rho_T$ ;  $x_2$  – довжина заряду  $L$ ;  $x_3$  – швидкість горіння заряду  $u_a$ ;  $x_4$  – початкова температура заряду  $T_H$ ;  $x_5$  – відношення площі поверхні горіння до площі випускних отворів  $S_3/S_B$ .

Перевірка рівняння (12) на відповідність до критерію Фішера підтвердила його адекватність.

Пошук екстремуму функції (12) показав, що в межах області дослідження стаціонарна точка відсутня, а мінімального значення функція приймає на межі цієї області в точці з координатами: (1; -1; 1; 1; 1). А тривалість роботи генератора дорівнює  $t_p = 43,53 \text{ с}$ .

Використовуючи аналогічний підхід, отримано модель у вигляді рівняння регресії залежності масової витрати аерозолу від параметрів заряду

$$M = 75,86 + 25,8 \cdot x_1 + 33,7 \cdot x_2 + 11,69 \cdot x_3 + 3,13 \cdot x_4 + \\ + 11,68 \cdot x_1 \cdot x_2 + 4,1 \cdot x_1 \cdot x_3 + 5,33 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,43 \cdot x_2 \cdot x_4. \quad (13)$$

де  $x_1$  – щільність заряду  $\rho_T$ ;  $x_2$  – площа поверхні горіння  $S_3$ ;  $x_3$  – швидкість горіння заряду  $u_a$ ;  $x_4$  – початкова температура заряду  $T_H$ .

Дослідження показало, що максимальне значення функції (13) досягається в тому разі, коли всі фактори приймають найбільших значень.

Показано, що рішенням задачі пошуку мінімуму часу роботи ГВА при обмеженнях, які накладаються на масову витрату аерозолю, є наступні значення параметрів заряду АУС:  $\rho_T = 2400 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ,  $u_a = 1,15 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $S_3 = 451,6 \text{ см}^2$ ,  $T_H = 318 \text{ К}$ ,  $L = 7 \text{ см}$ . Одночасно ці значення забезпечують максимальну масову витрату.

У *четвертому розділі* розглядаються питання оцінки адекватності отриманих математичних моделей та практичного впровадження результатів дослідження шляхом розробки рекомендацій щодо проектування ГВА із покращеними характеристиками.

Для оцінки адекватності комплексу математичних моделей, що описують процеси, які відбуваються в ГВА, проводились експериментальні дослідження. В ході яких визначались наступні характеристики дослідних зразків генераторів — тривалість перехідного процесу в ГВА, час роботи генератора, швидкість горіння заряду АУС. Структурну схему установки наведено на рис. 9.

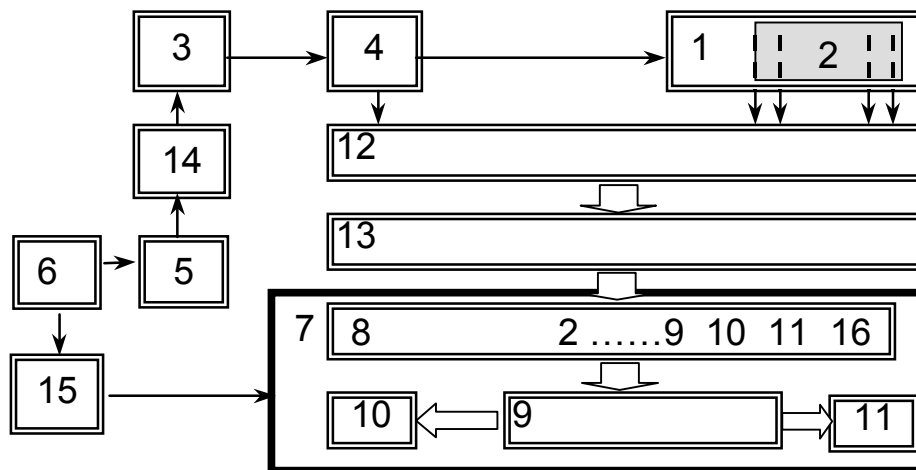


Рис. 9. Структурна схема експериментальної установки: 1 – генератор вогнегасячого аерозолю; 2 – заряд АУС; 3 – пристрій електричного пуску ГВА; 4 – легкоплавка вставка; 5 – пристрій для формування імпульсу струму; 6 – блок живлення; 7 – інформаційно-вимірювальний комплекс; 8 – порт LPT1; 9 – арифметичний логічний пристрій; 10 – пристрій для збереження результатів вимірів; 11 – пристрій відображення інформації (монітор); 12 – блок легкоплавких вставок; 13 – узгоджувальний пристрій; 14, 15 – комутатор

Порівнюючи розрахункові результати, які отримані аналітично, з експериментальними даними, слід відмітити, що похибка розбіжності складає не більш 15%.

Аналіз залежності середньоквадратичного відхилення від початкової температури заряду показав, що з її ростом помилка досліду зменшується.

В ході експерименту підтверджено, що з ростом початкової температури заряду швидкість його горіння зростає майже на 25%.

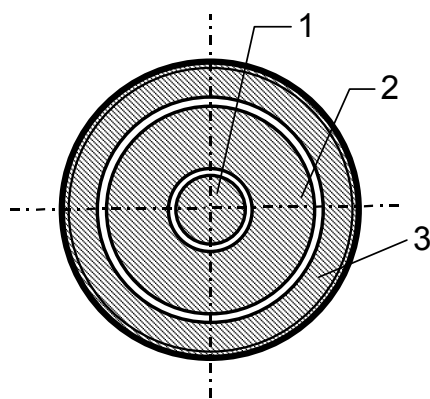
Показано, що тривалість роботи експериментальних зразків ГВА при варіюванні початкової температури заряду у межах  $T_H = \{(-50 \div +50) ^\circ\text{C}\}$  змінюється на 25% від загального часу роботи цих генераторів.

Розглянувши переваги та недоліки трьох варіантів компоновання заряду АУС, були розроблені рекомендації щодо вибору форми заряду, яка забезпечує мінімальну тривалість роботи ГВА при заданому значенні масової витрати для генераторів з різною масою заряду АУС.

В генераторах з масою заряду до 0,2 кг доцільно використовувати циліндричний заряд, що горить з торця. При цьому діаметр заряду повинен бути значно більший за його довжину. Сфера застосування таких генераторів — захист локальних об'ємів до  $4 \text{ м}^3$ .

Для захисту об'ємів від 5 до  $30 \text{ м}^3$ , за умови створення вогнегасячої концентрації  $50 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ , маса заряду АУС в генераторі повинна складати  $0,25 \div 1,5 \text{ кг}$ . В цьому випадку мінімум часу роботи ГВА можна досягти, використовуючи циліндричний заряд з центральним каналом. Його горіння повинно відбуватися з бокової та внутрішньої поверхні, що забезпечує постійне значення масової витрати. Порівняно з циліндричним зарядом без каналу час роботи ГВА зменшується в  $2 \div 2,5$  рази.

Доведено, що при формуванні заряду з масою понад 3 кг найкращі показники забезпечить телескопічна схема розміщення заряду, приклад якої наведено на рис. 10.



**Рис. 10.** Схема розміщення складного телескопічного заряду: 1 – центральний заряд; 2 – проміжний заряд; 3 – зовнішній заряд

Застосування такої схеми дозволяє знизити тривалість роботи ГВА в 4 рази порівняно з аналогічною характеристикою генератора АГС-2, при цьому масова витрата аерозолію зростає втричі.



## ВИСНОВКИ

У роботі отримані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують розв'язання науково-практичної задачі щодо обґрунтування можливості створення генераторів вогнегасячого аерозолі з покращеними характеристиками.

1. Показано, що серед сучасних вогнегасячих речовин, які використовуються при об'ємному гасінні пожеж класу В і підкласу А2, найефективнішими є вогнегасячі аерозолі.

2. Аналіз особливостей побудови систем аерозольного пожежегасіння показав, що вони мають ряд суттєвих переваг у порівнянні з традиційними системами об'ємного гасіння, а саме: відсутність ємностей, що знаходяться під тиском, для зберігання вогнегасячої речовини, відсутність трубопроводів для її доставки, низька металоємність системи, простота технічного обслуговування системи, тривалий строк експлуатації.

3. Аналіз особливостей схемних рішень існуючих ГВА та тенденцій щодо вдосконалення їх характеристик показав, що основними напрямками підвищення їх ефективності є зниження температури продуктів згоряння заряду АУС, виключення можливості потрапляння недоокислених компонентів в об'єм, що захищається, а також вдосконалення таких технічних характеристик ГВА, як час роботи, швидкодія, масова витрата вогнегасячого аерозолі.

4. Отримано комплекс математичних моделей, що описує процеси, які відбуваються в ГВА, в основі якого лежать закони збереження маси й енергії, а також рівняння стану ідеального газу, подані у виді системи нелінійних диференціальних рівнянь.

5. Показано, що динамічні властивості генератора адекватно визначаються характеристиками сукупності двох аперіодичних ланок (з різними постійними часу) та форсуючої ланки першого порядку.

6. З використанням методів імітаційного моделювання в сукупності з методами теорії планування експерименту отримані залежності тривалості перехідного процесу в ГВА, тривалості роботи ГВА, масової витрати аерозолі стосовно генераторів з покращеними характеристиками. І показано, що на тривалість перехідного процесу в генераторі істотно впливають щільність заряду, температура та швидкість його горіння.

7. З використанням критерію мінімуму часу формування вогнегасячої концентрації аерозолі в об'ємі, що захищається, розв'язана задача з вибору параметрів ГВА при обмеженнях, які накладаються на параметри заряду АУС.

8. Для проведення експериментальних досліджень створено установку, що дозволяє визначати тривалість перехідного процесу в камері генератора, час його роботи і швидкість горіння заряду АУС, а також запропоновано методику проведення експерименту для визначення технічних характеристик ГВА.

9. Експериментальні дослідження часу роботи ГВА підтвердили адекватність математичної моделі, отриманої теоретичним шляхом. При цьому показано, що отримана модель описує процеси з похибкою розбіжності не більш 15%.

10. Аналіз варіантів компонування заряду АУС показав, що найкращі характеристики має генератор з телескопічним зарядом, характеристики такого генератора перевершують існуючі серійні генератори за часом роботи в 4 рази, за величиною масової витрати – більш ніж у 3 рази. Показано, що при синтезі генератора з найменшим часом роботи при максимальній масовій витраті аерозолу, доцільно використовувати схему складного телескопічного заряду АУС.

11. Результати досліджень впроваджені в НВФ "Бранд–Майстер" (м. Київ), ТОВ "ПІ "Електропром" (м. Харків), ТОВ "Крайз" (м. Полтава) при розробці нових модифікацій ГВА та оптимізації характеристик систем аерозольного пожежогасіння, які створюються для різноманітних об'єктів. Позитивний ефект від результатів впровадження досягається внаслідок скорочення на 40% часу створення необхідної вогнегасячої концентрації в приміщенні, що захищається.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бондаренко С.Н. Применение генераторов огнетушащего аэрозоля в составе автоматических установок пожаротушения, вопросы математического моделирования // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. –Вып. 3. –Харьков: ХИПБ, 1998. – С. 25-28.
2. Бондаренко С.Н. Упрощенная математическая модель процессов в камере генератора огнетушащего аэрозоля // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. –Вып. 5.–Харьков: ХИПБ, 1999. – С. 50-53.
3. Бондаренко С.Н. Средства аэрозольного пожаротушения, как часть регулируемой системы автоматического пожаротушения // Пожежна безпека. Науковий збірник –Черкаси: ЧПБ МВС України, 1999. – С. 148–150.

4. Бондаренко С.Н. Оценка времени работы генератора огнетушащего аэрозоля // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. –Вып. 7. – Харьков: Фолио, 2000. – С. 32-35.
5. Бондаренко С.Н. Анализ динамических характеристик генератора огнетушащего аэрозоля // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. –Вып. 9. –Харьков: Фолио, 2001. – С. 20-25.
6. Тарахно О.В., Михайлюк О.П., Бондаренко С.М. Перспективи використання аерозолеутворюючих вогнегасних складів на судах //Підвищення бойової ефективності, обґрунтування тактичних та технічних характеристик систем озброєння та техніки військово-морських сил України: Зб. наук. пр. Живучість корабля і безпека на морі. –Вип. 2. – Севастополь: СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2001. – С.74–77.
7. Бондаренко С.Н. Обзор современных средств объемного тушения //Пожежна безпека 2001: Зб. наук. пр. –Львів: Сполом, 2001.– С. 174–176.
8. Бондаренко С.Н. Оценка массы огнетушащего аэрозоля, образуемого генератором // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. –Вып. 11. –Харьков: Фолио, 2002. – С. 30–34.
9. Бондаренко С.Н. Анализ моделей скорости горения твердотопливных зарядов // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. –Вып. 12. – Харьков: Фолио, 2002. – С. 43–47.
10. Бондаренко С.Н. Область применения генераторов огнетушащих аэрозолей в практике пожаротушения // Пожежна безпека: Матеріали III науково-практичної конференції. –К.: УкрНДПБ, 1997. – С. 317.
11. Бондаренко С.Н., Стреляный В.В. Анализ характеристик генераторов огнетушащих аэрозолей как перспективных средств объемного тушения // Пожежна безпека: Матеріали III науково-практичної конференції. –К.: УкрНДПБ, 1997. – С. 324–325.
12. Бондаренко С.Н. Упрощенная математическая модель камеры сгорания генератора огнетушащего аэрозоля // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков: Материалы XV науч.-практ. конф. –Ч.1. –М.: ВНИИПО, 1999. – С. 335–336.
13. Бондаренко С.Н. Анализ временных характеристик генератора огнетушащего аэрозоля // Крупные пожары: предупреждение и тушение: Материалы XVI науч.-практ. конф.–Ч.2. –М.: ВНИИПО, 2001. – С. 204–206.
14. Бондаренко С.Н. Анализ факторов, влияющих на скорость горения твердотопливных зарядов генераторов огнетушащего аэрозоля // Тезиси Междунар. науч.–практ. конф. «Ликвидация аварий и их последствий». – Донецк: Респиратор, 2002. – С. 23–24.

15. Бондаренко С.Н. Анализ современных средств объемного пожаротушения // Материалы VI науч.-практ. конф. «Пожарная безопасность». – Харьков: АПБУ, 2003. – С. 64–66.
16. Бондаренко С.М. Класифікація сучасних модифікацій генераторів вогнегасячого аерозолі // Матеріали наук.-практ. конф. «Наглядно-профілактична діяльність в МНС». – Харків: АЦЗУ, 2004. – С. 16–18.

### АНОТАЦІЯ

Бондаренко С.М. Розробка генераторів вогнегасячого аерозолі із покращеними характеристиками. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02. – Пожежна безпека. – Академія цивільного захисту України, Харків, 2004.

В роботі обґрунтовано можливість створення генератора вогнегасячого аерозолі з покращеними характеристиками шляхом побудови його математичної моделі з подальшою оптимізацією бажаних характеристик.

Розглянуто варіанти існуючих схемних рішень генераторів вогнегасячого аерозолі. Побудовано комплекс математичних моделей, які описують процеси, що відбуваються в генераторі під час його роботи. Отримано комплекс технічних характеристик і параметрів стосовно ГВА покращеного типу. Використовуючи методи імітаційного моделювання в сукупності з методами теорії планування експерименту, отримано залежності тривалості перехідного процесу, масової витрати аерозолі та тривалості роботи генератора від щільності, швидкості горіння і початкової температури заряду та геометричних характеристик генератора. Створена установка для визначення динамічних характеристик ГВА дозволила довести адекватність математичних моделей, отриманих аналітичним шляхом. Розроблені рекомендації, що дозволяють покращити характеристики генератора.

Ключові слова: математична модель, генератор вогнегасячого аерозолі, аерозолеутворююча сполука, покращення технічних характеристик, тривалість роботи, масова витрата.

### ABSTRACT

Bondarenko S.N. Elaboration of the generators of fireextinguishing aerosol with the improved characteristics. – Manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of engineering sciences on speciality 21.06.02. – Fire safety. – Civil Defence Academy of Ukraine, Kharkiv, 2004.

The opportunity of creation of the generator of fireextinguishing aerosol with the improved characteristics is proved by construction of its mathematical model with the following optimization of desirable characteristics.

Variants of existing schemes of generator of fireextinguishing aerosol (GOFA) are considered in the work. The complex of mathematical models describing the processes occurring in the generator during its work is designed. The complex of characteristics and parameters of GOFA improved type is received. Having applied methods of imitating simulating with methods of the experiment planning theory, dependences of duration of transient, the mass charge of an aerosol and operation time of the generator on density, speeds of burning and initial temperature of a charge and its geometrical characteristics are received. It is created installation for definition of dynamic characteristics of the GOFA allowing to prove adequacy of mathematical models received in the analytical way. Recommendations which allow to improve characteristics of the generator are developed.

Key words: mathematical model, the generator of fireextinguishing aerosol, fireextinguishing aerosol composition, improvement of characteristics, duration of work, the mass charge.

## **АННОТАЦИЯ**

Бондаренко С.Н. Разработка генераторов огнетушащего аэрозоля с улучшенными характеристиками. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.02. – Пожарная безопасность. – Академия гражданской защиты Украины, Харьков, 2004.

Решение проблемы по созданию экологически безопасных установок объемного пожаротушения привело к появлению принципиально новых средств — генераторов огнетушащего аэрозоля. Совершенствование технических характеристик новых модификаций генераторов, как правило происходит экспериментальным путем, который сопровождается значительными материальными затратами. Поэтому создание научно обоснованных рекомендаций по разработке генераторов с усовершенствованными характеристиками является актуальной задачей.

В работе обоснована возможность создания генератора огнетушащего аэрозоля с усовершенствованными характеристиками путем построения его

математической модели с последующей оптимизацией желаемых характеристик.

Рассмотрены варианты существующих схемных решений генераторов, исследованы тенденции по совершенствованию их технических характеристик. Показано, что математическое моделирование процессов, происходящих в генераторе, позволит связать комплекс его технических характеристик с параметрами заряда аэрозолеобразующего состава.

На основании закона сохранения массы и энергии, а также при условии малых отклонений относительно стационарного режима работы генератора получены модели, описывающие процессы протекающие в нем в динамическом режиме. С использованием метода линеаризации получены аналитические выражения временных характеристик и проведена оценка длительности переходного процесса в генераторе. Для установившегося режима работы получены зависимости, которые связывают основные технические характеристики генератора огнетушащего аэрозоля с параметрами заряда.

Используя методы имитационного моделирования в сочетании с методами теории планирования эксперимента, получены зависимости длительности переходного процесса, массового расхода и длительности работы генератора огнетушащего аэрозоля от плотности, скорости, температуры горения заряда и геометрических характеристик генератора.

Создана установка для проведения экспериментальных исследований динамических характеристик генераторов. Адекватность математических моделей, полученных аналитическим путем, подтверждена результатами эксперимента. Погрешность несовпадения составляет не более 15%.

Сравнительный анализ различных схем построения генераторов огнетушащего аэрозоля показал, что наилучшие характеристики имеет устройство с телескопической схемой размещения заряда аэрозолеобразующего состава. Разработаны рекомендации позволяющие улучшить характеристики генераторов.

Ключевые слова: математическая модель, генератор огнетушащего аэрозоля, аэрозолеобразующий состав, совершенствование технических характеристик, длительность работы, массовый расход.

---

Підп. до друку . . . р.

Друк ризограф.

Тираж 100 прим.

Формат 60×84 1/16

Умовно-друкар. арк. 1,25

Вид. № Зам. №

---