

*В.В. Ковалишин, д-р техн. наук, ст. наук. співр., А.В. Антонов, канд. техн. наук, ст. наук. співр., І.М. Зінченко канд. техн. наук (Український науково-дослідний інститут цивільного захисту), С.І. Гончаренко (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

## МОДЕЛЮВАННЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ В ЗАКРИТИХ ОБ'ЄМАХ ІНГІБИТОРАМИ ГОРІННЯ

Процес гасіння оцінюється дивлячись як зменшується площа горіння, температура та концентрація кисню. Узагальнений підхід до оцінки впливу різних засобів пожежогасіння в протяжних об'єктах здійснюється із врахуванням зменшення площі горіння поверхні (порошки) або з одночасним охолодженням пожежних газів при випаровуванні крапель рідини (диспергована вода, піна), а також завдяки зменшенню вмісту кисню в зоні горіння (рециркуляція, парогазові суміші, інертний газ). Вогнегасна речовина має одночасно декілька механізмів гасіння. Як правило ці моделі не розділяють окремо вплив охолодження і інгібування, а в цілому описують час гасіння через зменшення площі гасіння, температуру в зоні горіння та зміну концентрації кисню в часі. Необхідно встановити емпіричні коефіцієнти, що враховують процес інгібування, для визначення оптимального інгібітора горіння.

**Ключові слова:** пожежа, інгібітори горіння, засоби пожежогасіння, закриті об'єми.

Не тільки вид горючого матеріалу, але й конкретна стадія його гасіння повинні визначати вибір вогнегасного засобу. Застосування на об'єктах диспергової води, піни середньої або низької кратності для дистанційного гасіння розвинених пожеж різних класів має обмежені можливості, а вогнегасні порошки найбільш ефективні для ліквідації полум'яного горіння.

Тактику і технологію при дистанційному гасінні пожежі на об'єктах підвищеної небезпеки визначають такі основні фактори:

- місце виникнення пожежі;
- тривалість горіння і характер розвитку пожежі (зосереджена у визначеному місці або швидко переміщується у міру вигорання горючих матеріалів);
- вид горючих матеріалів на об'єкті;
- наявність обставин, що ускладнюють гасіння (висока задимленість і температура на підступах до осередку пожежі, небезпека вибухів, пролив хімічно небезпечних речовин, імовірність ураження електричним струмом, руйнування конструкцій на об'єкті та ін.).

В раніше проведених дослідженнях [1-6] оцінка гасіння проводиться за зменшенням площі горіння, температури в зоні горіння та концентрації кисню. Вперше використаний в роботах В. В. Ковалишина узагальнений підхід до оцінки впливу різних засобів пожежогасіння в протяжних об'єктах із врахуванням зменшення площі горіння поверхні (порошки) або з одночасним охолодженням пожежних газів при випаровуванні крапель рідини (диспергована вода, піна), а також завдяки зменшенню вмісту кисню в зоні горіння (рециркуляція, парогазові суміші, інертний газ). Як правило кожна вогнегасна речовина має одночасно декілька механізмів гасіння: тонкорозпилена вода з добавками – охолодження, інгібування, зменшення концентрації кисню, вогнегасний порошок – інгібування, зменшення концентрації кисню, охолодження, піна – ізолювання, охолодження. Як правило ці моделі не розділяють окремо вплив охолодження і інгібування, а в цілому описують час гасіння через зменшення площі горіння, температуру в зоні горіння та зміну концентрації кисню в часі.

Розглянемо ці процеси на прикладі вогнегасних порошоків.

Зазвичай вважається, що вогнегасний вплив на осередок пожежі порошоків полягає в інгібуванні полум'я, в розриві ланцюгів хімічних реакцій продуктів горіння з киснем і утворенні плівки на горючих матеріалах, що перешкоджає проникненню кисню вглиб твердої речовини.

Для моделювання використовуємо таку ж квазістаціонарну модель теплогазопереносу і систему рівнянь, як в роботі [1].

Будемо вважати, що на процеси горіння флегматизуюче впливає концентрація вогнегасного порошку, розподілена довжиною каналу за експоненційною залежністю в осередку

пожежі [2]. Порошок зменшує як інтенсивність, так і площу горіння. Це дає змогу функцію інтенсивності горіння, згідно з [1,2], подати у вигляді:

$$q = \frac{\chi v_0 H_c}{1 + aZ_0 \exp(-\gamma x / u)} \frac{b}{S} \frac{C}{C_0} \exp(-k\tau_i), \quad (1)$$

де  $q$  – інтенсивність тепловиділення при горінні, кВт/м<sup>3</sup>;  
 $\chi$  – коефіцієнт неповноти згоряння горючого матеріалу;  
 $H_c$  – теплота згоряння летких речовин, кДж/кг;  
 $C$  – наявна концентрація кисню в повітрі, об. частки;  
 $C_0$  – концентрація кисню у потоці повітря, яке надходить (приймається рівною 0,21);  
 $S$  – площа поперечного перерізу каналу, в якому проходить горіння, м<sup>2</sup>;  
 $a$  – емпірична константа, м<sup>3</sup>/кг;  
 $v_0$  – початкова масова швидкість надходження і вигорання продуктів піролізу в потоці повітря, кг/(м<sup>2</sup>·с);  
 $x$  – наявна відстань від місця виникнення пожежі, м;  
 $u$  – швидкість руху повітря, м/с;  
 $k$  – константа швидкості реакції при піролізі, 1/с;  
 $G = \gamma h / u_0$  – критерій втрат порошку через зіткнення зі стінками;  
 $Z_0$  – початкова концентрація порошку, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\gamma$  – швидкість сублимації порошку, 1/с;  
 $\tau$  – час, с.

Тоді, як і раніше, підставляючи формулу (1) у систему рівнянь [1], отримаємо в безрозмірному вигляді:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} = - \frac{AB}{1 + aZ_0 \exp(-\gamma x / u)} e^{-K\bar{\tau}_i} \bar{C}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = -St\bar{T} + \frac{B}{1 + aZ_0 \exp(-\gamma x / u)} e^{-K\bar{\tau}_i} \bar{C}.$$

Завдання, що стоять в першому рівнянні системи (2) в чисельнику параметри представляють собою константи відносно змінної  $x$ . В цьому випадку, розділяючи змінні, рішення першого рівняння системи (2) представимо у вигляді:

$$\bar{C} = \left[ \frac{aZ_0 + 1}{aZ_0 + \exp(\gamma x / u)} \right]^b, \quad (3)$$

Параметр  $b$  для скорочення запису прийнято рівним:

$$b = \frac{AB}{\gamma / u} \exp(-K\bar{\tau}_i).$$

Очевидно, за відсутності порошку ( $Z_0=0$ ), формула (3) перетворюється на формулу

$$\bar{C} = \exp(-ABe^{-K\bar{\tau}_i} \bar{x}). \quad (4)$$

де  $St = \frac{\alpha \Pi l}{2 \rho c_p Q}$  – критерій Стантона теплообміну потоку повітря з навколишнім масивом;

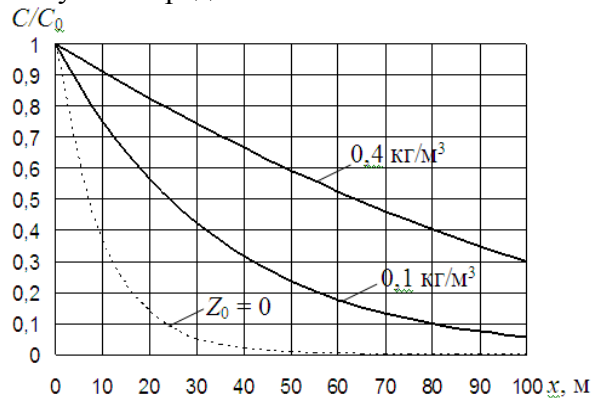
$K = \frac{kl}{u}$  – критерій швидкості піролізу;

$B = \frac{\chi v_0 F H_c}{\rho c_p T_0 Q}$  – критерій теплової енергії пожежі;

$A = \frac{\rho c_p T_0 C_0}{\rho_k H_c}$  – критерій теплоємності повітря.

Більш детально ці критерії описані в [1,2].

На рис. 1 представлено результати моделювання розподілу концентрації кисню у разі впливу вогнегасного порошку на осередок пожежі.



**Рис. 1.** Розподіл концентрації кисню при впливі вогнегасного порошку на осередок пожежі

Моделювання проводили за такими параметрами:  $\bar{\tau}_i = 0$ ;  $AB = 0,1$  1/с;  $a = 25$  м<sup>3</sup>/кг. Відношення параметрів  $\gamma/h$  визначали з використанням формули [2] при висоті каналу  $h = 2$  м.

Результати моделювання показують, що до гасіння пожежі концентрація кисню різко знижується майже до нуля на ділянці 40-50 м. При подачі порошку зниження концентрації кисню тим менше, чим більша його витрата.

Оскільки функція концентрації кисню відома (2), то друге рівняння системи (2) являє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку, рішення якого можна представити у вигляді [7]:

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{\tau}) = e^{-S\bar{x}} \int_0^{\bar{x}} \frac{B \exp(-K\bar{\tau}_i St \xi)}{1 + aZ_0 \exp(-\gamma\xi/u)} \bar{C}(\xi, \bar{\tau}) d\xi, \quad (5)$$

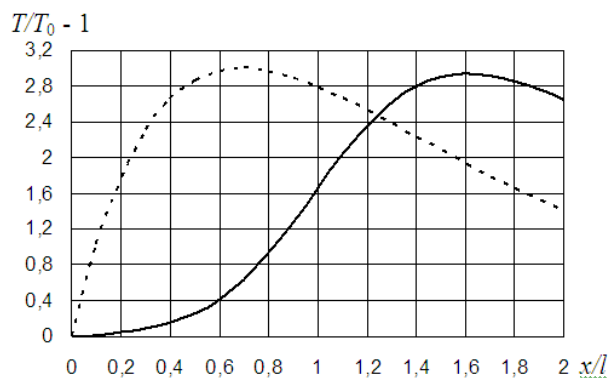
де  $\xi$  – змінна інтегрування.

Очевидно, при  $\bar{x} = 0$  розв'язок перетворюється в нуль. Виносячи за знак інтеграла константи по відношенню до змінної  $\xi$ , замість (5) отримаємо

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{\tau}) = B e^{-(K\bar{\tau}_i + S)\bar{x}} \int_0^{\bar{x}} \frac{e^{St\xi}}{1 + aZ_0 e^{-\gamma\xi/u}} \bar{C}(\xi, \bar{\tau}_i) d\xi. \quad (6)$$

Інтеграл, який увійшов до формули (6) обчислювався методом трапецій.

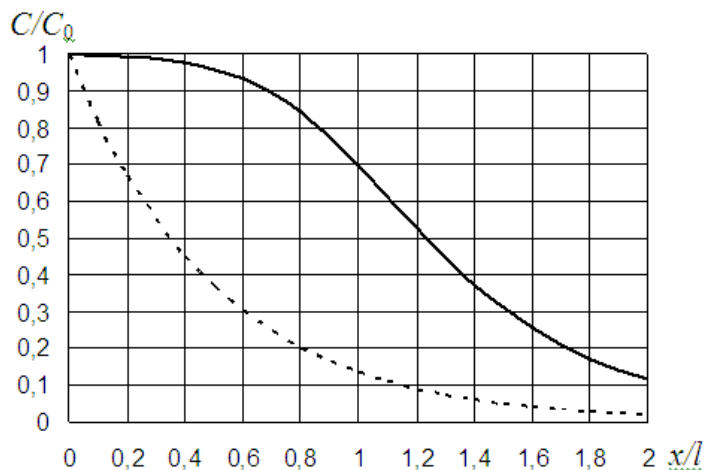
На рис. 2 представлено результати моделювання впливу на осередок пожежі вогнегасним порошком за таких вихідних даних:  $K = 0$ ;  $St = 1$ ;  $AB = 2$ ;  $B = 12$ ;  $aZ_0 = 100$ ;  $\gamma l/u = 5$ .



**Рис. 2.** Криві розподілу відносної температури по довжині каналу до подачі порошку на осередок пожежі (штрихова лінія) і при подачі порошку (суцільна лінія)

Результати моделювання показують, що вплив порошку на осередок пожежі найбільш інтенсивний на початку зони горіння, і слабшає з просуванням углиб зони. Під час великома-сштабних пожеж у результаті припинення горіння на початку осередку пожежі під впливом порошку відбувається зміщення зони горіння углиб каналу.

Флегматизувальна дія порошку позначається на концентрації кисню, який не задіяний у горінні на початку осередку пожежі, про що свідчать дані математичного моделювання (рис. 3).



**Рис. 3.** Розподіл відносної концентрації кисню по довжині каналу до подачі вогнегасного порошку (штрихова лінія) і при подачі порошку (суцільна крива)

Таким чином, спочатку порошок у зоні своєї дії розриває ланцюги хімічних реакцій газоподібних продуктів горіння з киснем, що позначається на температурі пожежних газів та зміщує її максимум углиб каналу.

Моделювання дії на осередок пожежі вогнегасних порошків з рециркуляцією продуктів згоряння проводилося чисельним методом за комбінованою схемою (з однаковою питомою вагою явної і неявної схем). Такий підхід дає змогу отримати більш точний результат розрахунку. З використанням системи рівнянь [1], приймаючи  $\bar{D} = \bar{a}_1 = 0$ , одержуємо в кінцевих різницях таку систему для комбінованої схеми:

$$\begin{cases} \bar{C}_m^{n+1} = \frac{[1 - (Cu + AB\bar{q}_m^n)/2]\bar{C}_m^n + Cu\bar{Z}_m^n}{1 + (Cu + AB\bar{q}_m^n)/2}; \\ \bar{T}_m^{n+1} = \frac{[1 - Cu(1 + St)/2]\bar{T}_m^n + St\bar{\theta}_m^n + B\bar{q}_m^n Cu(\bar{C}_m^n + \bar{C}_m^{n+1})/2}{1 + Cu(1 + St)/2}; \\ \bar{\theta}_m^{n+1} = \frac{(1 - \bar{a}_2/2)\bar{\theta}_m^n + \bar{a}_2\bar{T}_m^n}{1 + \bar{a}_2/2}. \end{cases} \quad (7)$$

Параметр  $\bar{Z}_m^n$  означає відносну концентрацію кисню перед осередком пожежі. За нормальних умов у розімкненому контурі ця концентрація кисню  $\bar{Z}_m^n$  дорівнює 1. У замкнутому контурі при рециркуляції параметр  $\bar{Z}_m^n$  визначається з використанням рівняння:

$$V_1 \frac{dZ}{d\tau} = -(Z - C)Q + (C_0 - C)Q_1, \quad (8)$$

де  $V_1$  – об'єм зони рециркуляції пожежних газів за винятком зони горіння, м<sup>3</sup>;  
 $Q$  – витрата пожежних газів, м<sup>3</sup>/с;  
 $Q_1$  – підсоси повітря, м<sup>3</sup>/с.

Аналіз рівняння (8) показує, що зміна концентрації кисню за тривалістю в зоні рециркуляції за межами осередку пожежі відбуватиметься завдяки надходженню в цей об'єм кис-

ню з осередку пожежі і кисню із зовнішнього середовища. Так, за умови відсутності підсосів чистого повітря ( $Q_I=0$ ), що в реальних умовах навряд чи можна здійснити, створюється повністю замкнений контур, а при підсосах чистого повітря він повністю розімкнений ( $Q_I=Q$ ), і до осередку пожежі надходить чисте повітря з концентрацією кисню  $Z = C_0$ .

Представимо рівняння (8) також в кінцевих різницях:

$$\bar{Z}_m^{n+1} = (1 - Cu_1)\bar{Z}_m^n + (1 - \bar{Q}_1)Cu_1\bar{C}_m^n + Cu_1\bar{Q}_1, \quad (9)$$

де  $Cu_1 = Q\Delta\tau / V_1$  – число Куранта перед зоною горіння;

$\bar{Q}_1 = Q_1 / Q$  – відносна величина підсосу повітря.

Будемо вважати, що на процеси горіння флегматизуюче впливає концентрація вогнегасного порошку. Порошок зменшує як інтенсивність, так і площу горіння. Це дає змогу функцію інтенсивності горіння представити у вигляді (1).

Одержана система рівнянь (8) і (9) з урахуванням (1) дає можливість моделювати процеси горіння в кабельному каналі як без рециркуляції продуктів згорання, так і за їх рециркуляції.

Результати розрахунків за формулами (8) в розімкненому контурі при горінні в кабельному тунелі повністю збігаються з результатами, які отримані раніше.

Для проведення експериментальних досліджень дії на осередок пожежі порошоків і дії рециркуляції в лабораторних умовах використовувалася одна й та ж камера.

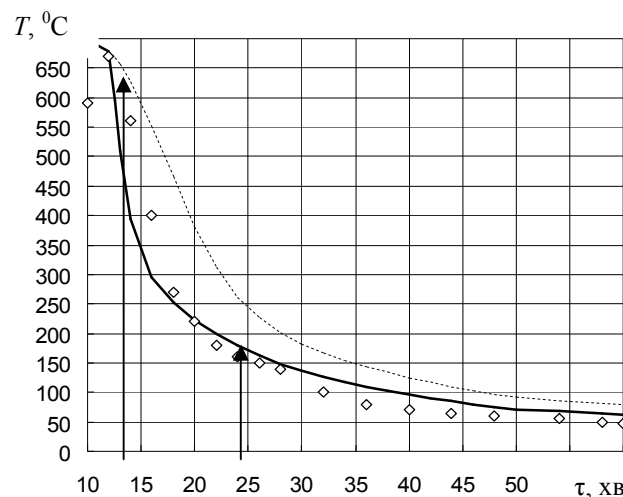
При цьому, застосування методів гасіння в лабораторних умовах здійснювалось на момент розповсюдження горіння до 85-90% (15-та хв) по довжині кабельної ділянки. При цьому температура сягала максимуму на 12-й хвилині від початку випробування.

Вільне горіння до припинення зростання температури триває 5-6 хвилин, а це 700 - 750 °С. Гасіння проводилося при досягненні температури 700 °С.

На рис. 5 наведено експериментальні і розрахункові дані динаміки температури продуктів згорання тільки при їх рециркуляції.

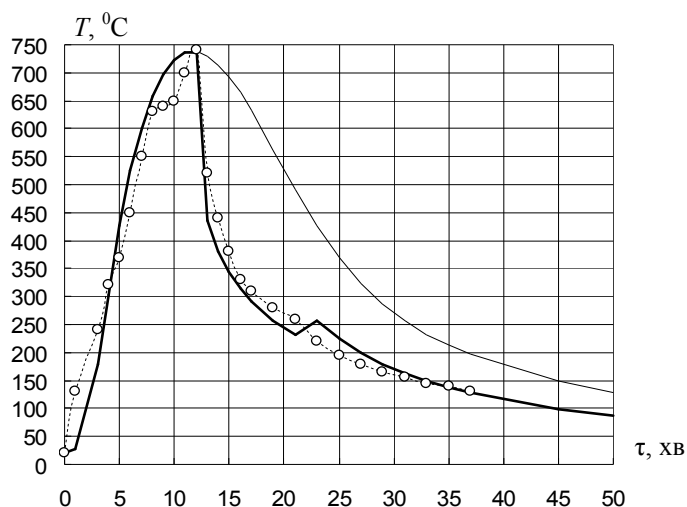
Стрілками вказано початок і кінець рециркуляції. Очевидно, що більш тривала рециркуляція привела б до більшого ефекту.

При розрахунках для найкращої збіжності розрахункових і експериментальних даних прийнято число Куранта в рециркулюючому потоці  $Cu_1=0,05$  і відносні підсоси повітря  $\bar{Q}_1 = 0,1$ . Решта параметрів прийнято рівними:  $Cu = 0,5$ ;  $A = 0,02$ ;  $B = 600$ ;  $St = 4,5$ .



**Рис. 5.** Динаміка максимальної температури продуктів згорання при їх рециркуляції в кабельному тунелі (маркери – експериментальні дані, суцільна крива – розрахункові дані при рециркуляції, переривиста лінія – розрахункові дані без рециркуляції)

На рис. 6 наведено розрахункові і експериментальні дані дії на осередок пожежі двох кілограмів вогнегасного порошку протягом 50 с і рециркуляцією продуктів згоряння протягом 10 хв.



**Рис. 6.** Динаміка температури продуктів згоряння при їх тривалій рециркуляції протягом 10 хв і подачі 2 кг порошку протягом 50 с в кабельному тунелі (маркери – експериментальні дані, жирна лінія – розрахункові дані при рециркуляції, тонка – розрахункові дані без рециркуляції і без подачі порошку)

Більш тривала подача порошку привела б, відповідно до розрахункових даних, до зменшення поверхні горіння на 30 %, внаслідок чого параметр  $B$  зменшено з 700 до 500.

За результатами експериментальних досліджень (рис. 5 і 6) можна зробити висновок, що триваліша рециркуляція продуктів згоряння протягом 10 хв і подача порошку з інтенсивністю близько 2 кг/хв, хоча б протягом хвилини, призводять до ефективної дії на вогнище пожежі.

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень встановлено, що короткочасна і періодична подача порошку до осередку пожежі разом з рециркуляцією продуктів згоряння достатньо ефективно впливає на осередок пожежі і дає змогу економно використовувати порошок.

В той же час, як показали результати порівняння експериментальних даних НДІГС «Респіратор» в натурних умовах з нашими розрахунковими даними, гасіння вогнища горіння порошком при великомасштабних пожежах потребує тривалої подачі порошку і повинно проводитися протягом 10-12 хв до зниження температури 100 – 200 °С, після чого необхідно перейти на режим рециркуляції продуктів згоряння або використовувати інші засоби пожежогасіння.

Із запропонованих математичних моделей важко встановити, яка частка припадає на гасіння завдяки інгібуванню, а яка завдяки іншим механізмам гасіння (охолодження, зменшення концентрації кисню тощо). Це дало б можливість правильно оцінити вогнегасні якості вогнегасної речовини з інгібувальними властивостями.

При моделюванні розвитку і гасіння пожежі ще враховувався вплив води (порошку) на палаючу поверхню твердого матеріалу, збиваючи полум'я, зволожуючи поверхню і припиняючи піроліз на деякій її частині.

Таким чином, залежно від часу гасіння пожежі диспергованою водою (або іншою вогнегасною речовиною) з добавками-інгібіторами, частина поверхні горючого матеріалу зменшується до деякої величини. Якщо припустити, що швидкість зміни площі поверхні горіння пропорційна цій же площі і витраті рідини (порошку) на кілограм горючого матеріалу, то можна записати:

$$F'(\tau) = -\delta G_2 F / M . \quad (10)$$

Інтегруючи рівняння (10) з початковою умовою  $F(0) = F_0$ , отримаємо

$$\begin{cases} F = F_0 & \text{при } \tau < \tau_1; \\ F = F_0 \exp[-\delta G_2(\tau - \tau_2) / M] & \text{при } \tau_1 < \tau < \tau_2; \\ F = F_0 \exp[-\delta G_2(\tau_1 - \tau_2) / M] & \text{при } \tau > \tau_2 \end{cases} \quad (11)$$

де  $F_0$  – початкова площа поверхні горючого матеріалу, м<sup>2</sup>;  
 $\delta$  – емпірична константа;  
 $M$  – загальна маса горючого матеріалу, кг;  
 $\tau_1$  і  $\tau_2$  – час відповідно початку і кінця гасіння пожежі, хв.

Відносна площа палаючої поверхні, що змінюється в часі, повинна включатися в критерій  $B$  теплової енергії пожежі. Ці ж рівняння можна використати коли розглядаємо процес гасіння вогнегасними порошками.

#### **Висновки:**

1. Із запропонованих математичних моделей важко встановити, яка частка припадає на гасіння завдяки інгібуванню, а яка завдяки іншим механізмам гасіння, що в свою чергу дає можливість правильно оцінити вогнегасні якості вогнегасної речовини з інгібувальними властивостями.
2. При подачі порошку або іншої речовини з інгібіторними властивостями треба врахувати ріст температури горіння через проходження реакції хімічного гальмування.
3. Необхідно встановити емпіричні коефіцієнти, що враховують процес інгібування.

#### **Список літератури:**

1. **Ковалишин В. В.** Моделювання виникнення і розвитку пожеж в закритих об'ємах великої протяжності / В. В. Ковалишин // Пожежна безпека : Зб. наук. праць. – Львів, 2011. – № 18. – С. 21-26.
2. **Ковалишин В. В.** Моделювання характеру впливу вогнегасного порошку на осередок пожежі спільно з рециркуляцією продуктів горіння / В. В. Ковалишин // Проблемы пожарной безопасности. – Х. : НУГЗУ, 2011. – Вып. 30. – С. 113-122.
3. **Ковалишин В. В.** Математична модель переносу і осадження вогнегасних порошоків в каналах великої протяжності при гасінні пожеж / В. В. Ковалишин, П. С. Пашковський // Вісті Донецького гірничого інституту : Зб. наук. пр. – 2011. – №2. – С.90-96.
4. **Ковалишин В. В.** Квазістаціонарні процеси тепломасопереносу під час пожеж у протяжних каналах / В. В. Ковалишин // Науковий вісник УкрНДПБ. – К.: УкрНДПБ. – 2011. – №1 (23). – С. 82-86.
5. **Ковалишин В. В.** Єдиний підхід до математичного моделювання розвитку і гасіння пожеж різними засобами / В. В. Ковалишин // Пожежна безпека: теорія і практика : Зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – № 9. – С. 65-70.
6. **Ковалишин В. В.** Математичне моделювання великомасштабних пожеж в протяжних каналах і порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними / В. В. Ковалишин, Е. М. Улинець, П. С. Пашковський, І. М. Зінченко // Пожежна безпека : теорія і практика : Зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля. – 2011. – №8. – С. 33-38.
7. **Корн Г.** Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн – М. : Наука, 1974. – 832 с.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В ЗАКРЫТЫХ ОБЪЕМАХ ИНГИБИТОРАМИ ГОРЕНИЯ**

Процесс тушения оценивается учитывая уменьшение площади горения, температуры и концентрации кислорода. Обобщенный подход к оценке влияния различных средств пожаротушения в протяжных объектах осуществляется с учетом уменьшения площади горения поверхности (порошки) или с одновременным охлаждением пожарных газов при испарении капель жидкости (дисперсная вода, пена), а также за счет уменьшения содержимого кислорода в зоне горения (рециркуляция, парогазовые смеси, инертный газ).

Огнетушащее вещество имеет одновременно несколько механизмов тушения. Как правило, эти модели не разделяют отдельно влияние охлаждения и ингибирования, а в целом описывают время тушения через уменьшение площади тушения, температуру в зоне горения и изменение концентрации кислорода во времени. Необходимо установить эмпирические коэффициенты, которые учитывают процесс ингибирования для определения оптимального ингибитора тушения.

**Ключевые слова:** пожар, ингибиторы горения, средства пожаротушения, закрытые объемы.

## **SIMULATION OF FIRE EXTINGUISHING IN CLOSED CAPACITIES BY COMBUSTION INHIBITORS**

Evaluation of extinguishing is produced according to reduction of combustion area, temperature and oxygen concentration. A generalized approach to evaluation of the impact of various extinguishing means at extended objects is carried out by taking into account the decrease of the burning surface area (powder) or with simultaneous cooling of fire gases during evaporation of liquid drops (dispersed water, foam) and by reducing the oxygen content in the burning area (recycling, gas-vapour mixtures, inert gas). Extinguishant has several mechanisms of fighting. Typically, these models do not distinguish separately cooling effect and inhibition, and generally describe the fighting time through reduction of extinguishing area, temperature in the combustion zone and changes in oxygen concentration over time. It is necessary to determine empirical coefficients that take into account the inhibition process for determining of the optimum combustion inhibitor.

**Key words:** fire, combustion inhibitors, firefighting means, closed capacities.

