

УДК 614.843 (075.32)

Е. М. Гуліда, д. т. н., проф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,  
О. М. Коваль, к. т. н., Національний університет цивільного захисту України

**МОДЕЛЮВАННЯ ТАКТИКИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ  
В ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕННЯХ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Розроблена математична модель для оптимізації вибору тактики локалізації та гасіння пожеж в закритих приміщеннях деревообробних підприємств. Модель включає всі необхідні залежності для встановлення оптимального часу локалізації і гасіння пожежі з урахуванням наявності пожежних відсіків та впливом швидкості вітру на надлишковий тиск або розрядження в осередку закритого приміщення, що призводить до зміни швидкості розповсюдження полум'я пожежі. Крім цього, математична модель дозволяє обґрунтовано визначати оптимальний варіант тактики і тривалості локалізації і гасіння пожежі з необхідною при цьому кількістю сил і засобів та необхідними для ліквідації пожежі газодимозахисним спорядженням і термозахисним одягом. Наукова новизна полягає в тому, що вперше за допомогою оптимізаційної математичної моделі розглядаються та обґрунтовуються основні положення тактичних дій системи пожежогасіння.

**Ключові слова:** математична модель, тактика локалізації і гасіння пожежі, пожежний ствол, теплова радіація.

**Постановка проблеми.** В залежності від виду виготовляємої продукції закриті приміщення деревообробних підприємств поділяють на цехи для виробництва клеєних матеріалів і плит, виробів з деревини та спеціального виробництва [1]. Пожежне навантаження в таких цехах є різним і може бути в межах від 50 до 200 кг/м<sup>2</sup> в залежності від виду виробництва, а лінійна швидкість розповсюдження вогню при пожежі знаходиться в межах 2...5 м/хв. Тому виникнення пожежі та її несвоєчасна ліквідація призводять до значних збитків. В роботах [2-4] для визначення збитків від пожежі використовували загальні витрати у вигляді прямих збитків від пожежі та витрати пожежно-рятувальних частин на її ліквідацію. Зменшення таких збитків можливо тільки при оперативному та якісному виконанні оптимально необхідних тактичних прийомів підрозділами державної служби надзвичайних ситуацій для швидкої локалізації і гасіння пожежі.

Існують нормативні документи для орієнтовного визначення тривалості гасіння пожежі, які враховують багаточисельні статистичні дані [5]. Але в кожному конкретному випадку такий підхід не може бути обґрунтованим. Розв'язування такої проблеми можливо в першу чергу за рахунок розроблення і оперативного використання оптимальних тактичних прийомів для локалізації та гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств. Враховуючі той факт, що для локалізації та гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств математичні моделі тактичних прийомів відсутні, то розв'язування цієї проблеми є актуальною і своєчасною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перші кроки по встановленню вимог до виконання максимального об'єму тактичних робіт на пожежі були розглянуті в роботі [5], що стало основою для прийняття відповідних обмежень в процесі розроблення математичних моделей для оптимального розміщення сил і засобів локалізації пожежі. При розробленні оптимізаційних моделей необхідно приймати відповідні критерії. Вибір обґрунтованих критеріїв прийняття відповідних рішень розглянуто в роботах [2, 3] при розгляді гасіння пожеж в резервуарних парках нафтопродуктів.

Вперше моделювання дій пожежних підрозділів по локалізації пожеж в резервуарних парках розглянуто в роботах [6, 7]. Автори розглядають питання про найкраще розміщення пожежних стволів в процесі локалізації пожежі. На їх оцінку впливають відповідні чинники, а саме: 1) ефективність охолодження резервуарів; 2) безпека можливого вибуху або розливу

нафтопродукту; 3) досяжність водним струменем пожежних стволів резервуара; 4) безпечний рівень теплового потоку від пожежі до пожежних; 5) відсутність перешкод між водним струменем ствола та резервуаром, який охолоджується; 6) обмеження, які пов'язані з тактико-технічними характеристиками стволів та правилами техніки безпеки. Перший з наведених чинників був прийнятий за критерій оптимального розміщення стволів для охолодження резервуарів, всі інші – були прийняті за обмеження. Розв'язок оптимізаційної математичної моделі дозволив в залежності від існуючих умов пожежі раціонально розміщувати пожежні стволи для локалізації пожежі в резервуарному парку і дало можливість зменшити втрати від пожежі на 40 % у порівнянні з загальноприйнятим підходом.

Стосовно закритих цехів деревообробних підприємств подібних математичних моделей, як показав аналіз публікацій, не розроблялося. Тому ставиться задача розробити математичну модель, яка б дозволяла виходячи з умов пожежі приймати оптимальний тактичний план розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі в закритих цехах деревообробних підприємств.

**Мета роботи.** Розробити математичну модель для вибору оптимального тактичного плану локалізації та гасіння пожеж в закритих цехах деревообробних підприємств.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Першочерговою задачею процесу гасіння пожежі є її локалізація, від успішного виконання якої залежить швидкість процесу гасіння. Відомо, що існує значна кількість позицій розміщення сил і засобів для проведення процесу локалізації. Тому виникає задача визначення найкращої (оптимальної) позиції їх розміщення, розв'язок якої залежить від багатьох чинників, а саме: 1) тривалість часу локалізації і гасіння пожежі; 2) матеріальні втрати від пожежі; 3) тривалість часу вільного розвитку пожежі; 4) форма площі пожежі та місце її розміщення в приміщенні; 5) наявність пожежних відсіків в приміщенні; 6) безпечний рівень теплового потоку від фронту пожежі; 7) мінімально необхідна кількість пожежних стволів для локалізації і гасіння пожежі; 8) швидкість вітру та його вплив на надлишковий тиск або розрядження в осередку закритого приміщення; 9) тактико-технічні характеристики пожежних стволів, які використовуються для локалізації і гасіння пожежі; 10) правила охорони праці при локалізації і гасінні пожежі.

Пояснимо кожний чинник, який впливає на розміщення сил і засобів для успішної локалізації пожежі. Під тривалістю часу локалізації пожежі будемо розуміти найменший час, який задовольняє всі умови 2...10. В цьому випадку матеріальні втрати від пожежі і пожежно-рятувальних підрозділів повинні бути найменшими.

Тривалість часу вільного розвитку пожежі в значній мірі впливає на розміри площі пожежі і тривалість часу локалізації. Цей час в першу чергу залежить від оперативності пожежно-рятувальних підрозділів, тобто від часу початку процесу локалізації першими стволами.

Форма площі пожежі та місце її розміщення в приміщенні впливають на розміщення сил і засобів локалізації пожежі. Крім цього, необхідно враховувати розміри приміщення і площу пожежі на час початку її локалізації. Пожежні відсіки затримують процес вільного розвитку пожежі, що сприяє зменшенню матеріальних втрат від пожежі за рахунок зменшення площі пожежі.

Тепловий потік від фронту пожежі може ускладнювати дію пожежних підрозділів і може вимагати їх додаткового захисту згідно із правилами охорони праці при локалізації і гасінні пожежі. Тому необхідно вибирати позицію з меншим тепловим потоком. В процесі локалізації фронт пожежі може бути розміщений за певними перешкодами (колони, пожежні перегородки відсіків тощо). В практичній ситуації кожний засіб для локалізації пожежі повинен знаходитися на вільному просторі.

На переміщення фронту пожежі в закритому приміщенні під час вільного горіння впливає вітер, який призводить до надлишкового тиску або розрядження. Тому цей чинник необхідно враховувати при розміщенні сил і засобів в процесі локалізації пожежі. При

розміщені пожежних стволів необхідно враховувати їх місця розташування, які б дозволяли подавати струмінь на необхідну глибину від фронту пожежі. Крім цього, треба також враховувати можливу довжину рукавної лінії. Необхідно також враховувати правила охорони праці в процесі локалізації і гасіння пожежі

**Математична постановка задачі оптимізації.** *Перший чинник* приймаємо за функцію мети, яка в нашому випадку повинна мати при розв'язанні задачі найменше значення, тобто

$$\tau_{\text{лок}} + \tau_{\text{г}} \Rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $\tau_{\text{лок}}$  – час локалізації пожежі, хв;  $\tau_{\text{г}}$  – час гасіння пожежі, хв.

**Другий чинник** за умови проведення оптимізації приймаємо за критерій оцінки отриманого результату. Для поставленої задачі матеріальні втрати  $B$  від пожежі повинні бути мінімальними, а саме

$$B \Rightarrow \min. \quad (2)$$

Чинники 3...10 є обмеженнями при розв'язку оптимізаційної задачі. В цьому випадку ставиться задача отримання найменшого часу локалізації і гасіння пожежі і найменших матеріальних втрат виходячи з наявних сил і засобів таким чином, щоб виконати обмеження 3...10.

**Третій чинник.** Тривалість часу вільного розвитку пожежі залежить від багатьох чинників роботи пожежно-рятувальних підрозділів. Визначимо прогнозований час з моменту виникнення пожежі до початку її локалізації силами пожежно-рятувальних підрозділів, тобто прогнозований час вільного горіння  $\tau_{\text{в.г}}$ :

$$\tau_{\text{в.г}} = \tau_{\text{в.в}} + \tau_{\text{сп}} + \tau_{\text{о.о}} + \tau_{\text{з.с}} + \tau_{\text{зб}} + \tau_{\text{сл}} + \tau_{\text{роз}}, \quad (3)$$

де:  $\tau_{\text{в.в}}$  – час з моменту виникнення до моменту виявлення пожежі (на практиці цей час коливається в межах 5...8 хв [8]); середнє значення  $\tau_{\text{в.в}} = 6,5$  хв;  $\tau_{\text{сп}}$  – час з моменту виявлення пожежі до моменту сповіщення про неї в пожежно-рятувальний підрозділ 3...4 хв [8] (середнє значення  $\tau_{\text{сп}} = 3,5$  хв);  $\tau_{\text{о.о}}$  – час на отримання та опрацювання сповіщення про пожежу;  $\tau_{\text{о.о}} = 1$  хв [9];  $\tau_{\text{з.с}}$  – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі;  $\tau_{\text{з.с}} = 3$  хв (наказ МВС України №325 від 01.07. 1993);  $\tau_{\text{зб}}$  – час збору особового складу;  $\tau_{\text{зб}} = 1$  хв [9];  $\tau_{\text{сл}}$  – середній час слідування на пожежу;  $\tau_{\text{сл}} = 13,9$  хв (після статистичної обробки результатів робіт [10, 11]);  $\tau_{\text{роз}}$  – час оперативного розгортання;  $\tau_{\text{роз}} = 7$  хв [8].

На підставі наведених нормативних і статистичних даних можна за залежністю (3) визначити середнє значення тривалості вільного розвитку пожежі:

$$\tau_{\text{в.г}} = 6,5 + 3,5 + 1 + 3 + 1 + 13,9 + 7 = 35,9 \text{ хв.}$$

**Четвертий чинник.** Деревообробні цехи в більшості випадків розміщують в закритих приміщеннях шириною  $B = 72$  м, довжиною  $L = 144...192$  м і висотою  $H = 6$  м до залізобетонної ферми. Пожежне навантаження в цеху знаходиться в межах 150...200 кг/м<sup>2</sup>. Результати аналізу виникнення пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств показали, що існує велика кількість можливих пожежних ситуацій, але в більшості випадків (73%) вони відповідають семи пожежним ситуаціям, які зображені на рис. 1 [12].

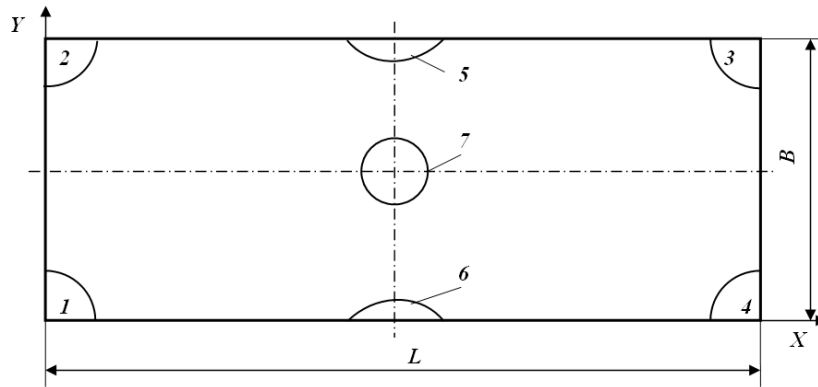


Рисунок 1 – Схема приміщення цеху деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями і формами площі пожежі: 1, 2, 3, 4 – кутова форма (90°); 5, 6 – кутова форма (180°); 7 – кругова.

Розмістивши приміщення цеху в системі координат  $XU$  (рис. 1), визначимо координати розміщення кожної пожежної ситуації: 1(0; 0); 2(0;  $B$ ); 3( $L$ ;  $B$ ); 4( $L$ ; 0); 5(0,5 $L$ ;  $B$ ); 6(0,5 $L$ ; 0); 7(0,5 $L$ ; 0,5 $B$ ).

**П'ятий чинник.** Наявність пожежних відсіків в приміщенні цеху значно зменшує швидкість розповсюдження полум'я пожежі. Для врахування цього зменшення розглянемо це питання на прикладі цеху, дільниці якого відокремлені перегородками з цегли, клас вогнестійкості яких дорівнює REI60. Кожна дільниця має вільний вихід на центральний проїзд цеху. Розглянемо випадок, коли на одній ділянці виникла кутова пожежа (90°;  $\alpha = 0,785$ ) пожежної ситуації 2(0;  $B$ ) (рис. 1). Загальна площа цієї дільниці (ширина 30 м; довжина до центрального проїзду 34 м) складає 1020 м<sup>2</sup>, лінійна швидкість розповсюдження полум'я  $V_n = 0,022$  м/с [13].

У випадку, коли локалізація і гасіння пожежі безпосередньо на цій дільниці (позначимо умовно цю дільницю цифрою 1) не відбудуться, то імовірність виходу пожежі з цієї дільниці на центральний проїзд буде дорівнювати  $P_{1u} = 1$ . Імовірність розповсюдження пожежі по центральному проїзду при відсутності її локалізації і гасіння буде також дорівнювати  $P_u = 1$ . Далі пожежа може перейти з центрального проїзду на рядом розміщену сусідню дільницю і протилежно розміщену (позначимо їх відповідно цифрами 2 і 11) з імовірностями  $P_{u2} = 1$  і  $P_{u11} = 1$ . Але у випадку початку локалізації пожежі на дільниці 1 на той час, коли вона ще не вийшла за її межі, можливий тільки один варіант переходу пожежі на дільницю 2, а саме через протипожежну перегородку, яка має клас вогнестійкості REI60. Для визначення імовірності можливого переходу пожежі з дільниці 1 на дільницю 2 через протипожежну перегородку скористуємося основними положеннями теорії надійності [14]. В цьому випадку маємо, наприклад, за  $\tau_{в,с} = 35,9$  хв згідно із залежністю (3) з використанням експоненціального розподілу

$$P_{12} = 1 - \exp(-\lambda \tau_{в,с}), \quad (4)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов, хв<sup>-1</sup>;

$$\lambda = \frac{1}{\bar{O}_A}; \quad (5)$$

$T_B$  – тривалість вогнестійкості, хв.

Тоді

$$P_{12} = 1 - e^{-\frac{\tau_{d,a}}{\dot{Q}_a}} = 1 - 2,718^{-\frac{35,9}{60}} = 0,45.$$

Визначимо сумарну імовірність  $P_{\Sigma}$  розповсюдження пожежі між дільницями цеху з використанням протипожежних перегородок за залежністю

$$P_{\Sigma} = P_{1\dot{\sigma}} \dot{D}_{\dot{\sigma}} \dot{D}_{\dot{\sigma}2} \dot{D}_{\dot{\sigma}11} (1 - \dot{D}_{12}) = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 (1 - 0,45) = 0,55.$$

В цьому випадку використання протипожежних перегородок зменшує швидкість розповсюдження пожежі по приміщенню цеху приблизно в

$$\xi = \frac{1}{P_{\Sigma}} = \frac{1}{0,55} = 1,8 \text{ рази.}$$

**Шостий чинник.** Безпечний рівень теплового потоку від фронту пожежі впливає на відстань від пожежного зі стволем до фронту пожежі. Для вибору критичного значення густини теплового потоку для пожежного скористуємося рекомендаціями, які наведені в роботі [5] (табл. 1). Визначимо густину теплового потоку  $q$  (Вт/м<sup>2</sup>) від полум'я пожежі в навколишнє середовище закритого приміщення цеху. Для цього скористуємося рекомендаціями, які наведені в роботі [15]

$$q = \frac{\sigma(T_{\dot{\sigma}}^4 - T_0^4)}{\frac{1}{\dot{A}_{\dot{\sigma}}} + \frac{1}{\dot{A}_n} - 1 + \frac{3\alpha\bar{\alpha}}{4}}, \quad (6)$$

де  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – стала Стефана – Больцмана;  $T_{\dot{\sigma}}$  – температура факела полум'я осередка пожежі, К;  $T_0$  – температура навколишнього середовища, К;  $A_{\dot{\sigma}} = 0,9$  – поглинальна здатність факела полум'я [16];  $A_{\dot{\sigma}} = 0,6$  – поглинальна здатність середовища [16];  $\bar{\alpha}$  – осереднений за спектром коефіцієнт поглинання середовища  $\bar{\alpha} = 0,89 \text{ м}^{-1}$  [13];  $x$  – дійсна відстань між пожежним зі стволем і центром факела осередку пожежі, м.

Таблиця 1 – Потрібний захист і допустимий час перебування людей в зоні теплової радіації

Густина теплового потоку $q$ , кВт/м <sup>2</sup>	Допустимий час перебування людей, хв	Потрібний захист людей	Ступінь теплової дії на шкіру людини
3,0	Не обмежується	Без захисту	Больові відчуття відсутні
4,2	Не обмежується	В захисному одязі та в касці із захищеним склом	Не переносимі больові відчуття через 20 с
7,0	5	Те ж	Не переносимі больові відчуття, які виникають миттєво

Температуру  $T_{\dot{\sigma}}$  (К) факела визначаємо за залежністю [17]

$$T_{\delta} = \frac{Q_{\min} \psi_n \tau_{a,a}}{\tilde{n}_{\delta} G}, \quad (7)$$

де  $Q_{\min}$  – значення найнижчої робочої теплоти згорання горючого навантаження, кДж/кг;  $\psi_n$  – питома швидкість вигорання, кг/м<sup>2</sup>с;  $\tau_{a,a}$  – тривалість вільного розвитку пожежі, с;  $c_p$  – питома теплоємність матеріалу, для якого розглядається пожежа, кДж/кг·К;  $G$  – пожежне навантаження маси оброблювальних матеріалів і обладнання, яке знаходиться в осередку пожежі, кг/м<sup>2</sup>.

Для визначення дійсної відстані  $x$  між пожежним зі стволом і центром факела осередку пожежі на першому етапі визначимо відстань  $l_{\phi}$  в м між центром факела та фронтом пожежі з урахуванням площі пожежі  $S_{\Pi}$  в м<sup>2</sup>:

$$\text{- кутова пожежа (90°) } l_{\delta} = 0,5R_f = 0,56\sqrt{S_f}; \quad (8)$$

$$\text{- кутова пожежа (180°) } l_{\delta} = 0,5R_f = 0,4\sqrt{S_f}; \quad (9)$$

$$\text{- кругова пожежа (360°) } l_{\delta} = R_f = 0,56\sqrt{S_f}. \quad (10)$$

Тоді дійсна відстань між пожежним зі стволом і центром факела осередку пожежі

$$x = l_{\delta} + l_q,$$

де  $l_q$  – відстань пожежного зі стволом від фронту пожежі, яка залежить від потрібного термозахисту і допустимого часу його перебування в зоні теплової радіації, м.

Для визначення відстані пожежного зі стволом від фронту пожежі  $l_q$  в м на підставі багаточисельних розрахунків за залежностями (6) – (10) з обробленням отриманих результатів методами математичної статистики

$$l_q = 23,2 \left( \frac{S_f^{0,27}}{[q]} \right)^{0,7}, \quad (11)$$

де  $[q]$  – допустиме значення густини теплового потоку для заданих умов локалізації і гасіння пожежі, кВт/м<sup>2</sup>.

**Сьомий чинник.** Мінімально необхідна кількість пожежних стволів для локалізації і гасіння пожежі може бути визначена на підставі рекомендацій робіт [5, 18-20]. Згідно із рекомендаціями визначаємо кількість стволів  $B$  на гасіння ( $N_B^A$ ) і захист ( $N_B^C$ ) та кількість стволів  $A$  ( $N_A$ ) від загальної кількості стволів  $N_B^A$  на підставі рекомендацій [5]

$$N_A = 0,3N_B^A. \quad (12)$$

**Восьмий чинник.** Швидкість вітру впливає на надлишковий тиск або розрядження в осередку закритого приміщення, що призводить до зміни швидкості розповсюдження полум'я пожежі, яка виникла в цьому приміщенні. Для такого аналізу скористуємося рекомендаціями, які наведені в [5]. Аналіз проведемо на підставі розгляду тиску або розрядження на висоті від підлоги до площини рівних тисків у відділеннях прямокутного приміщення деревообробного цеху (рис. 2), на які впливає кут дії  $\alpha_v$  вітру, тобто від напрямку дії якого залежить значення аеродинамічного коефіцієнту  $k_e$  (табл. 2).

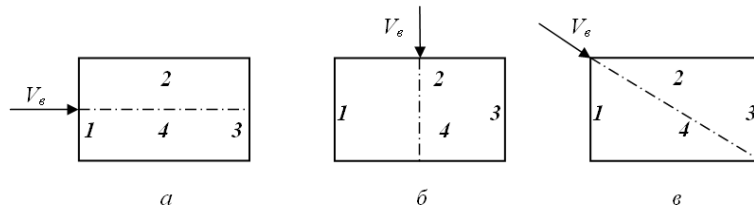


Рисунок 2 – Схеми приміщень та їх відділень з напрямом дії на них вітру

Таблиця 2 – Значення аеродинамічних коефіцієнтів для приміщень прямокутної форми

Кут дії вітру $\alpha_в$ , град	0° рис. 3, а				90° рис. 3, б				45° рис. 3, в			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Значення аеродинамічного коефіцієнта $k_в$	0,65	-0,37	-0,15	-0,37	-0,52	0,66	-0,52	-0,24	0,36	0,36	-0,38	-0,48

Абсолютне значення надлишкового тиску або розрядження  $\Delta P_в$  в Па від дії вітру визначаємо за залежністю

$$|\Delta P_в| = \frac{177,2 V_в^2 k_в}{\rho_в g}, \quad (13)$$

де  $V_в$  – швидкість вітру, м/с;  $k_в$  – аеродинамічний коефіцієнт (табл. 2);  $T_c$  – середньооб’ємна температура середовища для розглядаємої ділянки цеху, К;  $g$  – прискорення вільного падіння (9,81 м/с<sup>2</sup>).

З урахуванням рівняння Бернуллі та результатами досліджень по впливу швидкості переміщення газів на швидкість розповсюдження полум’я пожежі була отримана залежність для врахування цієї швидкості на зміну швидкості розповсюдження пожежі

$$\Delta v_в = 5,35 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{2|\Delta P_в|}{\rho_в}}, \quad (14)$$

де  $\rho_m$  – середньооб’ємна густина середовища для розглядаємої ділянки цеху, яка залежить від середньооб’ємної температури  $T_c$  в град К, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_m = 354,33/T_c. \quad (15)$$

Тоді дійсна швидкість  $V_{II}$  розповсюдження полум’я пожежі буде

$$V_{II} = v_в \pm \Delta v_в. \quad (16)$$

В залежності (16) знак «+» приймають при переході пожежі з ділянки цеху із надлишковим тиском на ділянку з розрядженням і знак «-» – у протилежному випадку.

**Дев’ятий чинник.** Тактико-технічні характеристики пожежних стволів приймаємо згідно із ДСТУ 2112-92, які використовуються для локалізації і гасіння пожеж класу А. Основною тактико-тактичною характеристикою ствола є дальність  $L_{max}$  подачі суцільного струменя. Значення  $L_{max}$  приймають в межах до 30 м.

**Десятий чинник.** Правила охорони праці при локалізації і гасінні пожежі зобов'язують кожного пожежного, у випадку виникнення у зоні ліквідації пожежі небезпечних чинників, використовувати згідно із наказом № 1342 від 16.12.2011 року МНС України газодимозахисне спорядження та захисний одяг. Для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі необхідно використовувати апарат на стисненому повітрі SCBA ProffAir APS/4. Захист пожежного від теплової радіації необхідно виконувати за рахунок використання термозахисних костюмів «Індекс-1», «Індекс-3» та «Індекс-1200», які дозволяють працювати при температурі 200°C на протязі 15 хв, а термозахисний костюм «Індекс-1200» – при температурі 1200°C до 5 хв. Для обґрунтованого прийняття рішення про необхідність використання пожежним термозахисного костюма скористуємося залежністю (11), на підставі якої визначимо дійсне мінімальне значення теплової радіації  $q_{\min}$  в кВт/м<sup>2</sup> в залежності від максимально допустимої відстані пожежного  $l_{q_{\max}}$  в м від фронту пожежі при її площі  $S_{II}$  в м<sup>2</sup>

$$q_{\min} = \frac{90^3 \sqrt{S_{II}}}{\sqrt{l_{q_{\max}}^3}} \quad (17)$$

Для гасіння пожеж в цехах деревообробляючих виробництв головним чином використовують воду [18]. При **виникненні пожежі** черговий обслуговуючий персонал зупиняє роботу верстатів, відсмоктує вентиляції та силових електроустановок. Після цього виконується евакуація з приміщення цеху, в якому виникла пожежа, всіх працюючих згідно з евакуаційними планами.

По приїзду пожежно-рятувальних підрозділів на об'єкт, де виникла пожежа, в процесі їх оперативного розгортання, в першу чергу необхідно поставити пожежні автомобілі на найближчі вододжерела і розміщувати пожежних зі стволами по фронту розповсюдження пожежі. Крім цього, також треба розміщувати пожежних зі стволами  $B$  на захист обладнання і крівлі.

При виникненні пожежі в місцях цеху  $I \dots 7$  (рис. 1) можливі наступні варіанти тактики локалізації пожежі:

**Тактичний варіант 1.** У випадку виникнення пожежних ситуацій  $I \dots 4$  розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з внутрішньої протилежної сторони середовища приміщення, в якому відсутня пожежа.

**Тактичний варіант 2.** У випадку виникнення пожежних ситуацій  $5 \dots 6$  розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з правої і лівої сторони середовища приміщення, в яких відсутня пожежа.

**Тактичний варіант 3.** У випадку виникнення пожежної ситуації  $7$  розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують за двома протилежно розміщеним фронтам пожежі, яка виникла в центральній частині цеху, з правої і лівої сторони середовища приміщення, в яких відсутня пожежа.

Після розгляду всіх питань, які пов'язані з математичною постановкою задачі оптимізації, переходимо до **розроблення оптимізаційної математичної моделі** тактики локалізації і гасіння пожежі.

**Вхідні дані:** 1) координата пожежі  $I(x; y)$ , де  $I = 1, 2, \dots, 7$  – номер можливої пожежної ситуації; 2) наявність пожежних відсіків  $\xi$  (у випадку відсутності пожежних відсіків  $\xi = 1$ ; при  $\xi = 1, 8$  – в цеху розміщені пожежні відсіки); 3)  $v_l$  – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/с; 4) швидкість вітру  $V_6$ , м/с; кут дії вітру  $\alpha_6$ , град; номер ділянки цеху, на якій виникла пожежа, з надлишковим тиском від вітру або розрядженням; 5) тип ствола  $N_B$  та  $L_{\max}$ ; тип ствола  $N_A$  та  $L_{\max}$ ; 6) тип термозахисних костюмів і апаратів для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі, вибір яких залежить від  $q_{\min}$  і часу тривалості вільного розвитку пожежі; 7) тактичні варіанти розміщення сил і



засобів локалізації і гасіння пожежі, кожен з яких вибирається в залежності від координати пожежі  $I(x; y)$  в цеху; 8) значення обмежень  $a_i$  і  $b_i$ , які необхідно визначити заздалегідь; 9)  $[p]$  – допустиме значення імовірності для прийняття оптимального значення функції мети.

### Функція мети

$$\tau_{\bar{e}\bar{e}} + \tau_{\bar{a}} \Rightarrow \min; \quad (18)$$

за критерієм

$$B = B_o + B_n \Rightarrow \min; \quad (19)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq N_B^{\bar{A}} \leq b_1; \quad (20)$$

$$a_2 \leq N_B^{\bar{C}} \leq b_2; \quad (21)$$

$$a_3 \leq N_A \leq b_3; \quad (22)$$

$$a_4 \leq \tau_{\bar{a}\bar{a}} \leq b_4; \quad (23)$$

$$a_5 \leq l_q \leq b_5; \quad (24)$$

$$p \geq [p], \quad (25)$$

де  $\tau_{лок}$  – час локалізації пожежі, хв;  $\tau_e$  – час гасіння пожежі, хв; значення цих часів визначаємо за залежностями [20]

$$\tau_{\bar{e}\bar{e}} = \frac{6,39S_{\bar{e}\bar{e}}^{0,893}}{2N_A + N_A^{\bar{A}}} K_I K_d; \quad \tau_{\bar{a}} = \tau_{\bar{e}\bar{e}} \left( \frac{S_I}{S_{\bar{e}\bar{e}}} - 1 \right); \quad (26)$$

$S_{лок}$  – площа локалізації, м<sup>2</sup>;  $K_I$  – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання  $I_I^{\bar{A}}$  (л/м<sup>2</sup>с) в осередок пожежі вогнегасної речовини;  $K_d$  – коефіцієнт, який враховує вплив діаметра насадки  $d$  (мм) ствола (рекомендоване значення діаметра насадки для ручних стволів  $N_B d = 13$  мм; для стволів  $N_A d = 19$  мм; для розрахунку приймають середнє значення  $d = 16$  мм); для

кругової і кутової пожеж  $S_{\bar{e}\bar{e}} = [2 \frac{V_I}{\xi} (\tau_{\bar{a}\bar{a}} - 5)h - h^2] \alpha$ ;  $h$  – глибина подачі вогнегасної

речовини в осередок пожежі ( $h = 5$  м для ручних стволів [5]);  $S_I = [25 + (\tau_{\bar{a}\bar{a}} - 10)^2] \frac{V_I^2}{\xi^2} \alpha$  при

$\tau_{в.г} > 10$  хв;  $K_I = 1,62 - 3,04I_I^{\bar{A}}$ ;  $K_d = 1,4983 - 0,0262d$ ;  $\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова  $360^\circ \alpha = 3,14$  рад; кутова  $180^\circ \alpha = 1,57$  рад; кутова  $90^\circ \alpha = 0,785$  рад;  $B_o$  – прямі збитки на об'єкті від пожежі, грн;  $B_o = C_o S_I$ ;  $C_o$  – середня вартість 1м<sup>2</sup> площі об'єкта, на якому виникла пожежа, грн/м<sup>2</sup>;  $B_n$  – витратами пожежно-рятувальних частин, які брали участь в її ліквідації пожежі, грн.;  $\hat{A}_I = C_{\hat{A}} \tau_{\bar{e}\bar{e}}^{-0,8725}$ ;  $C_B = 1,68 \cdot 10^5$  – коефіцієнт пропорційності;  $\tau_{л.н} = \tau_{лок} + \tau_e$  – сумарна тривалість локалізації і гасіння пожежі, хв;  $a_1, a_2, \dots a_5$  – мінімальні значення обмежень;  $b_1, b_2, \dots b_5$  – максимальні значення обмежень;  $p$  – імовірність попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків ( $p = k/N$ , де  $k$  – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувальні точки попали в область допустимих розв'язків;  $N$  – загальна кількість циклів роботи програми);  $[p]$  – допустиме значення імовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Значення обмежень  $a_1, a_2, a_3$  можна приймати однаковими і такими, що дорівнюють одиниці. Такий підхід можна обґрунтувати тим, що при приїзді першої пожежної автомашини, на якій знаходиться одна ланка, яка може після оперативного розгортання

залучити до локалізації пожежі тільки таку кількість засобів пожежогасіння. Значення обмежень  $b_1, b_2, b_3$  визначають згідно із рекомендаціями робіт [5, 18-20] і за залежністю (12) відповідно. Мінімальне значення обмеження  $a_4$  можна визначити за залежністю

$$a_4 = \frac{60Lk_i}{V_{\tilde{n}\tilde{e}}} + 20,5, \text{ хв} \quad (27)$$

де  $L$  – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, на якому виникла пожежа, км;  $k_n$  – коефіцієнт, який враховує непрямолінійність вуличної мережі (в містобудівельній практиці його максимальне значення приймають  $k_n = 1,4$ );  $V_{cl}$  – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (в денний час  $V_{cl} = 32$  км/год; вночі – до 60 км/год [20]).

Максимальне значення обмеження  $b_4$  приймаємо як середньостатистичне значення часу вільного горіння

$$b_4 = \frac{60Lk_i}{V_{\tilde{n}\tilde{e}}} + 29, \text{ хв.} \quad (28)$$

Мінімальне значення обмеження  $a_5$  приймаємо 10 м, а максимальне значення  $b_5 = L_{\max} - h$ .

Для розв'язування оптимізаційної моделі скористуємося методом Монте-Карло [21]. Область допустимих розв'язків, яка визначається обмеженнями (20)...(24), оточують  $m$ -мірним паралелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу краще всього розв'язувати з використанням ПЕОМ. За допомогою давача комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$  в інтервалі  $0...1$ . Для перетворення псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$ , які рівномірно розподілені в інтервалі  $0...1$ , до значень  $N_B^A, N_B^C, N_A, \tau_{в.г}$  та  $l_q$  використовуємо залежності виду, наприклад, для  $l_q$

$$l_{qi} = a_5 + \mu_{5i}(b_5 - a_5)$$

де:  $\mu_{5i}$  – псевдовипадкове число для визначення чинника  $l_{qi}$  на певному  $i$ -тому циклі розрахунку.

В процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаються значення  $\tau_{лок}$  і  $\tau_2$  за залежностями (26) та критеріїв  $B_o$  і  $B_n$ , які перевіряються зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуються до тих пір, поки буде виконана умова (25). Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані:  $S_{\Pi}$  на час початку локалізації;  $\tau_{сл}$ ,  $V_{\Pi}$ ,  $\tau_{лок}$  і  $\tau_2$ ,  $N_B^A, N_B^C, N_A, l_q, p$ ; тип апарату для захисту органів дихання та зору; тип термозахисного одягу; тривалість роботи в осередку пожежі, хв; тактичний варіант локалізації і гасіння пожежі; місця та ділянки для захисту об'єкта і обладнання від полум'я пожежі та температури.

Для реалізації оптимізаційної моделі був розроблений для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові C++ для роботи в середовищі Windows XP. Час роботи ПЕОМ становив 5-7 с для 5 тисяч випробувань ( $N_i$  – циклів) при імовірності попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків  $p = 0,94...0,96$ .

**Висновки.** 1. Розроблена математична модель оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств, яка дає можливість оперативно і обґрунтовано з імовірністю 0,94...0,96 визначати оптимальний варіант тактики і тривалості локалізації і гасіння пожежі з необхідною при цьому кількістю сил і засобів та необхідними для ліквідації пожежі газодимозахисним спорядженням і термозахисним одягом.

2. Впровадження в пожежно-рятувальних підрозділах Державної служби надзвичайних ситуацій математичної моделі оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств дає можливість, як показали попередні розрахунки, зменшити тривалість ліквідації пожежі на 38% і відповідно зменшити збитки від пожежі на 26%.

3. Необхідна подальша робота з метою удосконалення оптимізаційної моделі з урахуванням впровадження в пожежну практику новітніх тактичних прийомів ліквідації пожеж в приміщеннях деревообробних підприємств з використанням удосконаленого пожежного спорядження та засобів вогнегасіння і вогнезахисту підвищеної ефективності.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ференц О.Б. Технологія столярних виробів / О.Б. Ференц, В.М. Максимів, Навчальний посібник. – Львів: НЛТУ України, 2011. – 400 с.
2. Кудин А.И. Обзор критериев принятия решения для целей создания оперативного плана тушения пожаров в резервуарных парках / А.И. Кудин, В.И. Пермяков // Тез. докл. 51-й НТК. – Харьков: ХГТУСА, 1996. – с. 73.
3. Кудин А.И. Организация базы знаний для экспертной системы принятия решения при тушении пожаров с нефтепродуктами / А.И. Кудин, В.И. Пермяков // Проблемы пожежної безпеки. – К.: МВС України, 1995. – С. 244-245.
4. Пермяков В.И. Перспективы разработки и применения экспертных систем при тушении пожаров / В.И. Пермяков, А.И. Кудин // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: МВД Украины, 1993. – С. 293-296.
5. Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Ключ. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
6. Абрамов Ю.А. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов. – Харьков: АГЗУ, 2006. – 251 с.
7. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Алгоритм оптимального расположения сил и средств для тушения пожара в резервуарном парке / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов. // Проблемы надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. АЦЗ України. – Харків: Фоліо, 2006. – Вип. 3. – С. 26-32.
8. Бут В.П. Практичний посібник з пожежної тактики / В.П. Бут, Л.Б. Куціщій, Б.В. Болібрех. – Львів: СПОЛОМ, 2003. – 133 с.
9. Нормативи по пожежно-стройовій підготовці. – К.: УДПО МВС України, 1995. – 14 с.
10. Огляд стану організації пожежогасіння, пожежно-рятувальних робіт, застосування пожежної та спеціальної техніки ПРП МНС України у 2005 році. – К.: Департамент ЦЗ МНС України, 2005. – 31 с.
11. Крайнюк О.І. Підходи до визначення місць дислокації та площі обслуговування підрозділів місцевої пожежної охорони. / О.І. Крайнюк // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2008, № 2 (18). – С. 180-185.
12. Климась Р. Статистика пожеж на деревообробних підприємствах за 2011 і 2012 роки / Р. Климась. – К.: УкрНДІЦЗ, 2013. – 5 с.
13. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
14. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
15. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
16. Копылов Н.П. Моделирование пожаров на складах лесоматериалов / Н.П. Копылов // Моделирование пожаров и взрывов. – М.: Изд. «Пожнаука», 2000. – С. 189-197.

17. Гуліда Е.М. Метод статистичного моделювання пожежі в приміщенні / Е.М. Гуліда, О.В. Меньшикова // Проблеми пожежної безпеки. – Харків: НУГЗУ, 2010. – Вып.28. – С. 65-73.

18. Повзик Я.С. Пожарная тактика / Я.С. Повзик, П.П. Ключ, А.М. Матвейкин. – М.: Стройиздат, 1990. – 335с.