

## MATHEMATICAL MODELLING OF THERMAL RADIATION FOR PROBATION OF PROTECTIVE CLOTHES OF FIRE MEN

The article deals with the mathematical modeling of thermal radiation. With the help of modeling, the assessment of thermal radiation which influences on vertical surface (cone and right-angled triangle) from high-temperature sources.

**Key words:** flame, mathematical modeling, radiation stream, intensity of thermal radiation, high-temperature sources

УДК 614.843 (075.32)

*Е.М. Гуліда, д.т.н., проф., Д.П. Войтович (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

## ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСТАВИН В ЗОНІ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖІ В МІСТАХ

Прозглянуто та проаналізовано існуючі методи визначення обставин в зоні виникнення пожежі та запропонована імітаційна модель для прогнозування цих обставин. Перевірка на адекватність імітаційної моделі за критерієм Фішера показала, що модель є адекватною.

**Ключові слова:** пожежа, час повідомлення, площа пожежі, токсичні гази, температура, водопостачання, евакуація

**Сучасний стан проблеми.** Для успішного швидкого виконання всіх тактичних заходів, які пов'язані з ліквідацією пожежі, в першу чергу в містах, необхідно знати всі обставини в зоні її виникнення, тобто на об'єкті, з якого поступив виклик на диспетчерський пункт пожежно-рятувальної частини. До основних обставин в зоні виникнення пожежі відносять [1, 2]: 1) об'єкт, на якому виникла пожежа, його характеристика та аеродинамічні чинники; 2) місце виникнення пожежі на об'єкті з характеристикою горючого матеріалу; 3) орієнтовна площа пожежі на час повідомлення; 4) площа пожежі на час початку роботи перших стволів; 5) критичний час тривалості пожежі для людей, які знаходяться на об'єкті в зоні пожежі; 6) кількість людей, яка підлягає евакуації з об'єкта, в тому числі інвалідів та літніх людей; 7) наявність водопостачання на об'єкті; 8) виділення токсичних газів та диму в зоні пожежі; 9) температура в зоні теплової дії, що до її впливу на людину в процесі гасіння пожежі; 10) можливість під'їзду до об'єкта пожежно-рятувальної техніки; 11) можливість перекриття подачі побутового газу та електроенергії.

Розглядаючи питання визначення обставин в зоні виникнення пожежі, які особливо необхідно знати керівнику гасіння пожежі перед виїздом на об'єкт, можна констатувати відсутність і майже неможливість отримання таких даних на сучасному етапі в практиці ліквідації пожеж. Тому ставиться задача розробити методологію прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі, якою на сучасному етапі змогли б користуватися без будь-яких ускладнень пожежно-рятувальні підрозділи міста.

**Мета роботи.** Розробити метод прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі на підставі їх математичного моделювання з використанням середньостатистичних даних про об'єкти міста.

**Метод математичного моделювання для прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі.** Для прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі можна використовувати за формою представлення різні математичні моделі: інваріантні, алгоритмічні, аналітичні та графічні. Наприклад, аналітичні математичні моделі прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі розроблені д.т.н., проф. С.В. Пузачем (м. Москва) на підставі польових (диференціальних) моделей [6], але їх використання в пожежно-рятувальних частинах практично неможливе внаслідок їх складності. Тому найбільш доцільно використовувати за формою представлення алгоритмічні (імітаційні) динамічні моделі з функціональним відображенням цих обставин в залежності від властивостей об'єкта, який розглядається, та з урахуванням для моделі відомих результатів експериментальних досліджень [3].

В кожному місті України знаходяться житлові та адміністративні будівлі, магазини, лікувальні заклади, навчальні заклади, культурно-видовищні споруди, виробничі споруди різних видів підприємств, складські приміщення та торговельні бази, станції паливно-мастильних матеріалів. Для спрощення умов моделювання визначимо основні типи об'єктів міста: 1) житлові будівлі; 2) адміністративні будівлі; 3) магазини продуктові; 4) магазини промтоварні; 5) лікувальні заклади; 6) аптеки; 7) навчальні заклади; 8) бібліотеки; 9) культурно-видовищні споруди; 10) виробничі споруди категорії А; 11) виробничі споруди категорії Б; 12) виробничі споруди категорії В; 13) виробничі споруди категорії Г; 14) виробничі споруди категорії Д; 15) складські приміщення; 16) торговельні бази; 17) станції паливно-мастильних матеріалів.

Кожен з розглянутих об'єктів міста має певне пожежне навантаження. Було розглянуто 15 видів пожежного навантаження: 1) деревина; 2) меблі, побутові вироби, тканини; 3) обладнання (верстати), мастила, фарба, ...; 15) автомобіль: гума, бензин, штучна шкіра, емаль. Наприклад, пожежне навантаження для перших двох об'єктів, а саме житлових та адміністративних будівель, згідно із даними [4, 5], та на підставі багаточисельних обстежень будівель міста, наведено в табл. 1. При цьому середньостатистична похибка визначення пожежного навантаження для розглянутих об'єктів не перевищує 10...15%.

Таблиця 1

Пожежне навантаження житлових та адміністративних будівель

№ типу об'єкта	Види споруд за наведеною вище класифікацією	Пожежне навантаження, кг/м <sup>2</sup>				
		Меблі, побут. вироби, тканини	Меблі, папір	Меблі, лінолеум ПВХ	Дерево, тканина, фарба	Електро-технічні прилади та матеріали
01	02	Порядковий номер пожежного навантаження та відповідно номер передаточного коефіцієнта в перших двох рядках матриць (6) і (7)				
		2	4	5	8	11
1	Житлові будівлі	50	–	10	5	8
2	Адміністративні будівлі	–	60	–	20	15

В процесі горіння різних матеріалів можуть виділятися продукти горіння у вигляді токсичних газів, а саме двоокису вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), оксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ), синильної кислоти ( $\text{HCN}$ ), оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), акролеїну та диму. Параметри горючого навантаження, наприклад, для житлових і адміністративних приміщень цивільних споруд з використанням даних, які подані в роботах [6, 7], наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри горючого навантаження

№ Пожежного навантаження за табл. 1	Назва горючого навантаження	Лінійна швидкість розповсюдження полум'я $V_{\text{д}}$ , м/хв	Питоме димовиділення $L_{\text{д}}$ , кг/кг	Питоме виділення двоокису вуглецю $L_{\text{CO}_2}$ , кг/кг	Питоме виділення оксиду вуглецю $L_{\text{CO}}$ , кг/кг	Питоме виділення оксидів азоту $L_{\text{NO}_x}$ , кг/кг	Питоме виділення синильної кислоти $L_{\text{HCN}}$ , кг/кг	Питоме виділення акролеїну $L_{\text{АКР}}$ , кг/кг	Питоме споживання кисню $L_{\text{O}_2}$ , кг/кг
2	Меблі, побут. вироби, тканина	0,75	0,021	1,32	0,019	0,003	$2 \cdot 10^{-5}$	0,0045	-1,44
4	Меблі, папір	2,52	0,018	0,64	0,032	0,002	$1 \cdot 10^{-5}$	0,004	-1,16
5	Меблі, леноліум ПВХ	0,9	0,017	1,48	0,03	0,002	$3 \cdot 10^{-4}$	-	-1,37
8	Дерево, тканина, фарба	0,98	0,018	1,42	0,023	0,003	$3 \cdot 10^{-5}$	0,004	-1,22
11	Електротехнічні прилади та матеріали	0,75	0,115	0,38	0,056	0,002	$3 \cdot 10^{-4}$	-	-1,95

Для переходу від маси виділених продуктів горіння в процесі пожежі до їх об'ємів скористаємося значеннями їх молярної  $\rho_m$  та масової  $\rho$  густин [8]. Крім цього, скористаємося питоми масами диму в залежності від матеріалу, який горить [2].

Розроблена імітаційна модель прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі представлена у вигляді пакету прикладних програм для ПЕОМ, які написано алгоритмічною мовою програмування Delphi, що складається з 12 її взаємопов'язаних функціональних блоків (рис. 1). За основу для імітаційного моделювання були прийняті об'єкти, які розглянуті вище.

Розглянемо структуру імітаційної моделі та основні задачі, які вона може розв'язувати.

**Блок 1** призначений для введення вхідних даних, до яких відносять: назву об'єкта, на якому виникла пожежа; час повідомлення, орієнтовну площу пожежі на час повідомлення  $S_1$ ,  $\text{м}^2$ ; форму пожежі: кругова [ $\alpha = 360^\circ$  (6,28 рад)], кутова [ $\alpha = 180^\circ$  (3,14 рад);  $\alpha = 90^\circ$  (1,57 рад)], прямокутна ( $a_n$  – ширина пожежі); кількість поверхів  $z$  на об'єкті; поверх, на якому виникла пожежа  $z_{\text{П}}$ ; наявність централізованого водопостачання ( $B_{\text{в}} = 1$  – у випадку, коли воно є;  $B_{\text{в}} = 0$  – у випадку, коли воно відсутнє) або водоймища ( $B_{\text{е}} = 1$  – у випадку, коли воно є;  $B_{\text{е}} = 0$  – у випадку, коли воно відсутнє); можливість перекриття електроенергії та газових мереж ( $K_{\text{е.г}} = 1$  – у випадку, коли така можливість є;  $K_{\text{е.г}} = 0$  – у випадку, коли такої можливості немає); можливість подачі кисню в осередок пожежі ( $K_{\text{к}} = 1$  – у випадку, коли така можливість є;  $K_{\text{к}} = 0$  – у випадку, коли такої можливості немає); орієнтовні розміри приміщення, де виникла пожежа (ширина –  $a$  та довжина –  $b$  в м); орієнтовна відстань  $L$ , км від об'єкта до пожежно-рятувальної частини, яка обслуговує цей об'єкт.

**Блок 2** виконує генерацію об'єкта на підставі розпізнавання його образу за ключовими словами та присвоєння йому відповідного номера, згідно з класифікацією ( $O_i = 1, 2, 3, \dots, 17$ ).

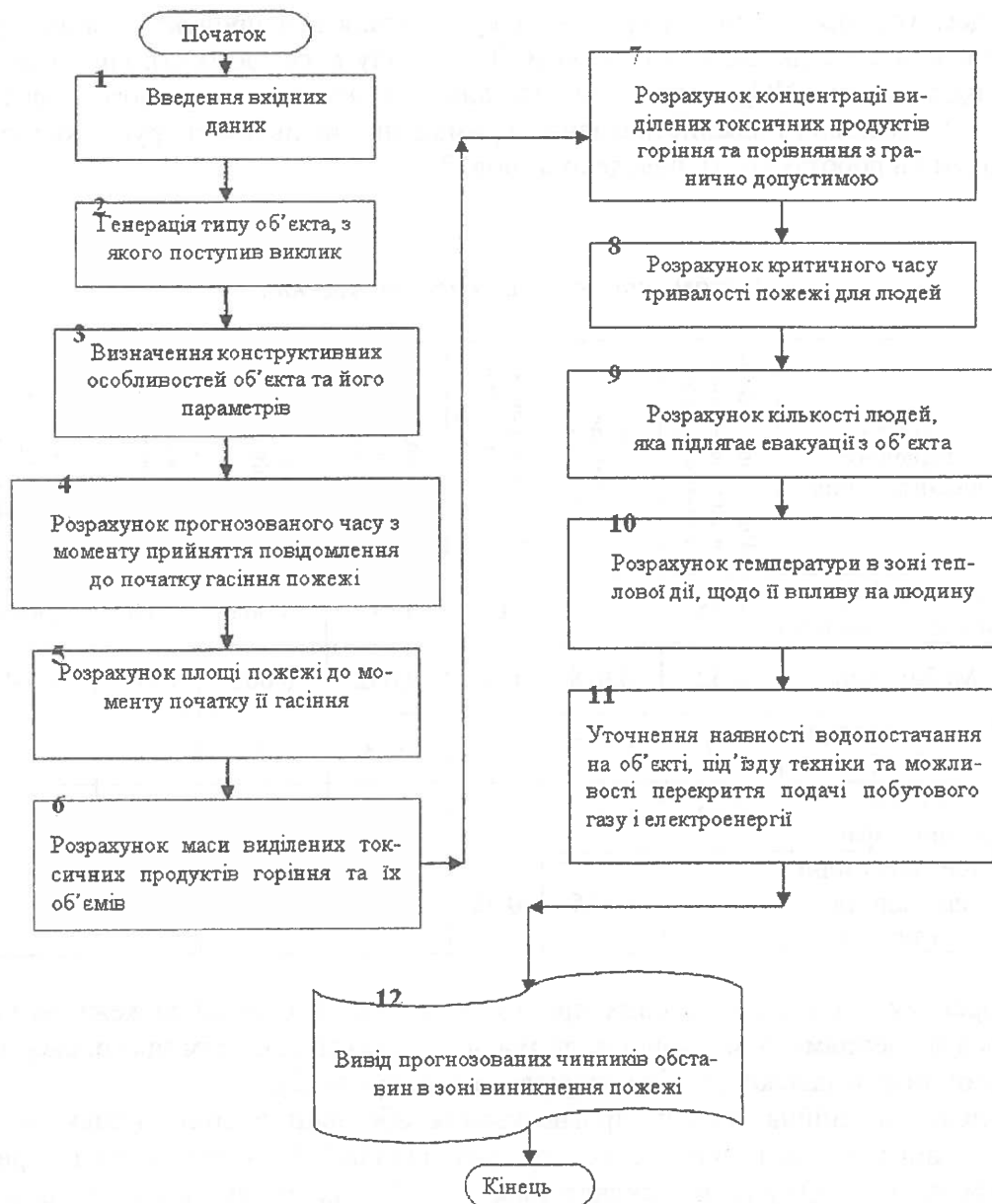


Рис. 1. Структурна схема імітаційної моделі

**Блок 3.** Визначення конструктивних параметрів об'єкта виконується в блоці 3. Загальний об'єм вільного розповсюдження продуктів горіння в процесі пожежі, наприклад, для житлових і адміністративних будівель по вестибюлю та сходовій клітці буде

$$V_{n,z} = V_{в,с} z K_{ТБ}, \text{ м}^3 \quad (1)$$

де  $z$  – кількість поверхів;  $V_{в,с}$  – об'єм вестибюля та сходової клітки одного поверху;  $K_{ТБ}$  – коефіцієнт, який враховує тип будинку;  $K_{ТБ} = 0,2 \dots 0,5$  – для одноповерхових будинків, а для багатоповерхових  $K_{ТБ} = 1$ .

Подача кисню в осередок пожежі в житлових та адміністративних будівлях можлива через віконні прорізи, тобто коефіцієнт, який враховує цю можливість  $K_{\kappa} = 1$ .

Аналогічний підхід до визначення  $V_{n,z}$  застосовується для магазинів, універмагів і супермаркетів, лікувальних закладів, навчальних закладів, культурно-видовищних споруд, виробничих споруд різних видів підприємств, складських приміщень та торгівельних баз, а також станцій паливно-мастильних матеріалів.

**Блок 4.** В цьому блоці виконується розрахунок прогнозованого часу з моменту виникнення пожежі до початку її гасіння силами пожежно-рятувальних підрозділів, тобто час вільного горіння  $\tau_{в.г}$  [1, 2]

$$\tau_{в.г} = \tau_{в.в} + \tau_{сн} + \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз}, \quad (2)$$

де  $\tau_{в.в}$  – час з моменту виникнення до виявлення пожежі;  $\tau_{сн}$  – час з моменту виявлення пожежі до сповіщення про неї в пожежно-рятувальний підрозділ;  $\tau_{о.о}$  – час на отримання та опрацювання сповіщення про пожежу [9];  $\tau_{з.с}$  – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі;  $\tau_{зб}$  – час збору особового складу [9];  $\tau_{сл}$  – час слідування на пожежу;  $\tau_{роз}$  – час бойового розгортання [9].

Аналізуючи залежність (2) встановлюємо, що для прогнозування часу вільного горіння  $\tau_{в.г}$  невідомими складовими є час з моменту виникнення до виявлення пожежі  $\tau_{в.в}$  та час слідування на пожежу  $\tau_{сл}$ .

Визначимо час  $\tau_{в.в}$  з моменту виникнення до виявлення пожежі відповідно для кругової, кутової та прямокутної форм:

а) кругова, кутова

$$\tau_{в.в} = \frac{\sqrt{\frac{S_1}{0,5\alpha}}}{V_n}, \text{ хв} \quad (3)$$

де  $S_1$  – площа пожежі за повідомленням (наближене значення), м<sup>2</sup>;  $V_n$  – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/хв. (табл. 2);  $\alpha$  – кут форми пожежі, рад;

б) прямокутна

$$\tau_{в.в} = \frac{S_1}{a_n V_n}, \text{ хв.} \quad (4)$$

де  $a_n$  – ширина пожежі, м.

Для визначення часу слідування на пожежу скористаємося рекомендаціями [10], згідно з якими

$$\tau_{сл} = \frac{60Lk_n}{V_{сл}}, \text{ хв.} \quad (5)$$

де  $L$  – орієнтовна відстань від об'єкта до пожежно-рятувальної частини, яка обслуговує цей об'єкт, км;  $k_n$  – коефіцієнт, який враховує непрямолінійність вуличної мережі (в містобудівній практиці його максимальне значення приймають  $k_n = 1,4$ );  $V_{сл}$  – середня швидкість руху пожежних автомобілів в даному місті, км/год. За даними роботи [10] середньодобова швидкість руху пожежних автомобілів становить 32 км/год, а вночі – до 60 км/год.

**Блок 5.** Для визначення площі  $S_{Пi}$  пожежі, яка утворюється за час вільного розвитку пожежі, скористаємося відомою залежністю [2] з використанням основних властивостей теорії матриць. В цьому випадку для кругової та кутової форм пожежі

$$S_{П} = (S_{Пi})_{i=1,17} = 0,5\alpha(\tau_{в.г} - 5)^2 \frac{1}{n} \begin{bmatrix} u_{11}^2 & u_{12}^2 & \dots & u_{115}^2 \\ u_{21}^2 & u_{22}^2 & \dots & u_{215}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{171}^2 & u_{172}^2 & \dots & u_{1715}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_{15} \end{bmatrix}, \text{ м}^2 \quad (6)$$

де  $n$  дорівнює сумі одиниць, кількість яких відповідає кількості видів матеріалів з 15 розглянутих (як приклад, в табл. 1 наведено пожежне навантаження для двох об'єктів), що згорає в період вільного розвитку пожежі з лінійною швидкістю розповсюдження полум'я;  $u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1715}$  – елементи матриці, які за своїм значенням відповідають лінійним

швидкостям розповсюдження полум'я (як приклад, ці швидкості наведені в табл. 2 тільки для п'яти видів пожежного навантаження);  $c_1 = c_2 = \dots = c_{15} = 1$ .

Для прямокутної форми пожежі значення її площі за час вільного розвитку пожежі визначають за аналогічною залежністю.

**Блок 6.** Розрахунок маси виділених токсичних продуктів горіння та їх об'ємів виконуємо на підставі рекомендацій [4 – 7], які наведені в табл. 1 (як приклад тільки для житлових та адміністративних будівель). Масу кожного матеріалу для відповідного типу об'єкта можна визначити із залежності

$$M_i = S_{\Pi i} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{115} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{215} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{171} & a_{172} & \dots & a_{1715} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_{15} \end{bmatrix}, \text{ кг} \quad (7)$$

де  $M_i$  – набір видів мас матеріалів для  $i$ -го об'єкта ( $i = 1, 2, 3, \dots, 17$ );  $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1715}$  – елементи матриці, які за своїм значенням відповідають пожежному навантаженню в  $\text{кг/м}^2$  (наприклад, табл. 1). В цьому випадку  $M_i \in (m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{i15})$ .

Масу диму, виділених токсичних продуктів та масу спожитого кисню  $G_i$  за час вільного розвитку пожежі визначаємо за залежністю

$$G_i = L_i \begin{pmatrix} m_{i1} \\ m_{i2} \\ \dots \\ m_{i15} \end{pmatrix}, \text{ кг} \quad (8)$$

де  $L_i$  – відповідне питоме виділення продуктів в процесі горіння різних матеріалів (табл. 2): диму  $L_D$ , двоокису вуглецю  $L_{CO_2}$ , оксиду вуглецю  $L_{CO}$ , оксидів азоту  $L_{NO_x}$ , синильної кислоти  $L_{HCN}$ , акролеїну  $L_{AKP}$  та споживання кисню  $L_{O_2}$ ,  $\text{кг/кг}$ ;  $m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{i15}$  – маса матеріалу з усіх 15 розглянутих, який згорає за час вільного розвитку пожежі. Значення цих мас отримано за залежністю (7).

В процесі розв'язування матриці, згідно з матеріалами, які розглядаються, всі результати додаються з метою отримання загальної маси для кожного виділеного або спожитого продукту.

Об'єм виділеного диму визначаємо за залежністю

$$V_D = \frac{G_D}{m_{D, \text{сер}}}, \text{ м}^3 \quad (9)$$

де  $G_D$  – маса виділеного диму, яка визначена за залежністю (8);  $m_{D, \text{сер}}$  – середньоарифметичне значення питомої маси диму, що визначається як середнє значення з тих видів горючого навантаження, що знаходиться на об'єкті, на якому виникла пожежа.

Об'єм виділених токсичних продуктів визначаємо за залежністю

$$V_{T. \Pi. i} = \frac{G_i}{\rho_i k_t}, \text{ м}^3 \quad (10)$$

де  $k_t$  – коефіцієнт, який враховує температуру в середовищі приміщення. Значення коефіцієнта  $k_t$  визначаємо за залежністю, яка отримана на підставі статистичної обробки даних, наведених в [2]

$$k_t = -0,0021t + 0,9805,$$

де  $t$  – температура в середовищі приміщення в межах від  $10^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$ .

**Блок 7.** Концентрацію  $K_i$  виділених токсичних продуктів визначаємо за залежністю

$$K_i = \frac{10^3 G_i}{V_{n.2}}, \text{ г/м}^3. \quad (11)$$

Отримане значення  $K_i$  порівнюємо зі значенням гранично допустимої концентрації  $[K_i]$ , значення якої наведено в [2, 8]. Крім цього, визначаємо зменшення концентрації кисню  $K_{O_2}$  в повітрі приміщення за час вільного розвитку пожежі з метою прогнозування можливості припинення горіння. Зменшення концентрації кисню  $K_{O_2}$  визначаємо за залежністю

$$K_{O_2} = \frac{21 \left( m_{O_2} k_t - \frac{G_{O_2}}{V_{n.g}} \right)}{m_{O_2} k_t}, \% \quad (12)$$

де  $m_{O_2}$  – маса кисню в одному  $m^3$  повітря при температурі навколишнього середовища  $0^\circ C$  і нормальному тиску,  $кг/м^3$ ;  $G_{O_2}$  – маса спожитого кисню, яка визначена за залежністю (8), за час вільного розвитку пожежі в об'ємі  $V_{n.g}$  ( $m^3$ ) вільного розповсюдження продуктів горіння в приміщенні,  $кг$ .

Задимленість об'єму приміщення визначаємо виходячи із співвідношення

$$K_D = \frac{V_D}{V_{n.g}}. \quad (13)$$

У випадку, коли  $K_D$  менше одиниці, об'єм приміщення вважається задимленим з густиною диму, яка дозволяє працювати пожежно-рятувальним підрозділам без ізолюючих апаратів і виконувати евакуацію людей. Якщо  $K_D \geq 1$ , то задимленість об'єму приміщення стає такою, що для роботи пожежно-рятувальних підрозділів та евакуації людей необхідно використовувати ізолюючі апарати.

**Блок 8.** Для встановлення критичного часу тривалості пожежі виконуємо розрахунки за залежностями (6) – (13), розраховуючи  $S_{\Pi i}$  за залежністю (6) з підстановкою замість значення  $\tau_{в.г}$  першого значення 6 хв [6] і далі з кроком 1 хв до визначеного в блоці 4 прогнозованого часу  $\tau_{в.г}$ .

На кожному кроці отримуємо значення концентрацій  $K_i$  виділених токсичних продуктів, кисню та задимленості і порівнюємо з допустимими значеннями. У випадку, коли хоча б один з токсичних продуктів перевищить допустиму величину, цей час приймається за критичний з одночасною перевіркою задимленості приміщення.

**Блок 9.** Розрахунок кількості людей, які підлягають евакуації з об'єкта, виконано по кожному із 17 об'єктів з урахуванням часу доби.

**Блок 10.** Розрахунок температури в зоні теплової дії, щодо її впливу на людину, починаємо з визначення сумарного пожежного навантаження для відповідного типу об'єкта з використанням даних табл. 1 та залежності (7).

Для визначення температури  $T_i$  в осередку пожежі для  $i$ -го типу об'єкта скористаємося рекомендаціями, які наведені в роботі [2, 6, 11]

$$T_i = \frac{10^3 Q_{н.р.ісер} S_{\Pi i} \tau_S}{c_{ісер} M_i} + 293, K \quad (14)$$

де  $Q_{н.р.ісер}$  – середнє значення найнижчої робочої теплоти згорання для  $i$ -го типу об'єкта,  $МДж/(м^2 \cdot хв)$ ;  $c_{ісер}$  – середнє значення питомої теплоємності для  $i$ -го типу об'єкта,  $кДж/кг \cdot К$ ;  $M_i$  – сумарна маса матеріалів пожежного навантаження, яке знаходиться на площі пожежі;  $\tau_S$  – час вільного горіння до прийнятого значення  $S_{\Pi i}$ , хв (визначається за залежністю (3) або (4)); 293К – температура навколишнього середовища в приміщенні, в якому виникла пожежа.

Для визначення відстані  $L_\phi$  від фронту пожежі до безпечної температури, при якій можливе перебування людей в процесі гасіння пожежі, скористаємося рекомендаціями, які наведені в роботі [6]. Після оброблення рекомендацій методом математичної статистики, отримаємо



$$L_{\phi} = 370 \exp \left[ - \left( 0,01 - \frac{0,1}{T_i} \right) T \right], \text{ м} \quad (15)$$

де  $T_i$  – температура в осередку пожежі для  $i$ -го типу об'єкта, К;  $T$  – небезпечна температура для перебування людей в процесі гасіння пожежі, К.

**Блок 11.** В цьому блоці виконується аналіз даних блока 1, на підставі якого робиться висновок про наявність на об'єкті водопостачання, можливості під'їзду техніки та перекриття подачі побутового газу і електроенергії.

**Блок 12.** Цей блок виконує вивід отриманих на підставі розв'язування імітаційної моделі прогнозованих чинників обставин в зоні виникнення пожежі на екран дисплея та принтер для роздруку результатів.

Перевірку на адекватність результатів, які отримані за допомогою запропонованої імітаційної моделі, дійсним даним об'єкта виконували за допомогою критерію Фішера  $F$  [12, 13]. В процесі перевірки для нашого випадку табличне значення критерію Фішера дорівнювало  $F_{(0,05; 8; 10)} = 3,0717$  [13], де 0,05 – 5%-вий рівень значущості; 8 – число ступенів вільності дисперсії адекватності; 10 – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності. Емпіричні значення критерію Фішера коливалися в межах 0,625...0,3107. Результати такої перевірки показали, що середнє значення похибки моделі не перевищувало 14...18% і загалом розроблена імітаційна модель прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі є адекватною і її можна використовувати в роботі пожежно-рятувальних підрозділів для підвищення ефективності їх функціонування.

Для пояснення роботи імітаційної моделі прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі розглянемо приклад на підставі даних, які наведені в журналі опису пожеж Сихівського РВ м. Львова ГУ МНС України у Львівській області [14].

**Статистичні дані** про пожежу, яка виникла 02 жовтня 2008 року в житловому будинку по вул. Таджикиській, 11а, кв. 78, м. Львів. Повідомлення про пожежу надійшло на диспетчерський пункт о 03 год 01 хв. Квартира 78 розміщена на п'ятому поверсі п'ятиповерхового будинку. Орієнтовна площа пожежі за повідомленням  $2 \text{ м}^2$  (пожежа кутова  $90^\circ$ ).

**Розрахунки за імітаційною моделлю. Блок 1.** Житловий будинок. Час повідомлення – 03 год 01 хв.  $S_1 = 2 \text{ м}^2$ ;  $\alpha = 90^\circ$  (1,57 рад);  $z = 5$ ;  $z_{II} = 5$ ;  $B_{\text{ч}} = 1$ ;  $B_{\text{в}} = 0$ ;  $K_{e,z} = 1$ ;  $K_{\text{к}} = 0$ ;  $a = 3 \text{ м}$ ;  $b = 6 \text{ м}$ ;  $L = 4,6 \text{ км}$ .

**Блок 2.** Генерує та присвоює номер об'єкта: житловий будинок –  $O = 1$ .

**Блок 3.** Визначення конструктивних параметрів об'єкта: визначаємо  $V_{n,z}$  за залежністю (1)

$$V_{n,z} = V_{e,c} z K_{TB} = 89,6 \cdot 5 \cdot 1 = 448 \text{ м}^3,$$

де  $V_{e,c} = 89,6 \text{ м}^3$  [15].

**Блок 4.** Розрахунок прогнозованого часу з моменту виникнення пожежі до початку її гасіння виконуємо за залежностями (2), (3) і (5) з використанням даних для  $V_n$  з табл. 1 і 2 залежно від пожежного навантаження

$$V_n = (V_{n2} + V_{n5} + V_{n8} + V_{n11})/4 = (0,75 + 0,9 + 0,98 + 0,75)/4 = 0,845 \text{ м/хв.}$$

$$\tau_{e,s} = \frac{\sqrt{\frac{S_1}{0,5\alpha}}}{V_n} = \frac{\sqrt{\frac{2}{0,5 \cdot 1,57}}}{0,845} = 1,89 \text{ хв};$$

$$\tau_{cn} = \frac{60 L k_n}{V_{cn}} = \frac{60 \cdot 4,6 \cdot 1,4}{60} = 6,44 \text{ хв};$$

$$\tau_{e,z} = \tau_{e,s} + \tau_{cn} + \tau_{o,o} + \tau_{z,c} + \tau_{z,b} + \tau_{cn} + \tau_{роз} = 1,89 + 1 + 1 + 3 + 1 + 6,44 + 7 = 21,33 \text{ хв.}$$

**Блок 5.** Визначення площі  $S_{\Pi i}$  пожежі, яка утворюється за час вільного розвитку



пожежі. Для цього скористаємося залежністю (6). В нашому випадку номер об'єкта дорівнює 1, якому відповідає перший рядок матриці (6), що дозволяє виконати запис цієї залежності у вигляді

$$S_{\text{ПІ}} = 0,5\alpha(\tau_{\text{с.з}} - 5)^2 \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{15} u_{1j}^2 = 0,5 \cdot 1,57 \cdot (21,33 - 5)^2 \frac{1}{4} (0,75^2 + 0,9^2 + 0,98^2 + 0,75^2) = 150,7 \text{ м}^2.$$

Враховуючи те, що площа кімнати, в якій виникла пожежа, дорівнює  $axb = 3 \cdot 6 = 18 \text{ м}^2$ , то приймаємо  $S_{\text{ПІ}} = 18 \text{ м}^2$ .

Блок 6. Розрахунок маси виділених токсичних продуктів горіння та їх об'ємів виконуємо за залежностями (7) – (10) з використанням даних табл. 1 і 2. Для об'єкта номер 1 залежності (7) і (8) можна представити у вигляді

$$M_1 = S_{\text{ПІ}} \sum_{j=1}^{15} a_{1j} = 18(50 + 10 + 5 + 8) = 1314 \text{ кг};$$

$$G_{\text{Д}} = S_{\text{ПІ}} \sum_{j=1}^{15} L_{\text{Д}j} a_{1j} = 18(0,021 \cdot 50 + 0,017 \cdot 10 + 0,018 \cdot 5 + 0,115 \cdot 8) = 40,1 \text{ кг},$$

де  $L_{\text{Д}j} a_{1j}$  – маса диму  $m_{\text{Д}}$  від згорання  $1 \text{ м}^2$  відповідного матеріалу пожежного навантаження;

$$G_{\text{CO}_2} = S_{\text{ПІ}} \sum_{j=1}^{15} L_{\text{CO}_2j} a_{1j} = 18(1,32 \cdot 50 + 1,48 \cdot 10 + 1,42 \cdot 5 + 0,38 \cdot 8) = 1637 \text{ кг};$$

$$G_{\text{CO}} = 186,5 \text{ кг}; G_{\text{NO}} = 3,6 \text{ кг}; G_{\text{HCN}} = 0,12 \text{ кг}; G_{\text{АКР}} = 4,41 \text{ кг};$$

спожито кисню

$$G_{\text{O}_2} = S_{\text{ПІ}} \sum_{j=1}^{15} L_{\text{O}_2j} a_{1j} = 18(1,44 \cdot 50 + 1,37 \cdot 10 + 1,22 \cdot 5 + 1,95 \cdot 8) = 1933 \text{ кг}.$$

Визначаємо об'єм виділеного диму та токсичних продуктів за залежностями (9), (10)

$$V_{\text{Д}} = \frac{G_{\text{Д}}}{m_{\text{Д.сеп}}} = \frac{40,1}{0,1925} = 208,3 \text{ м}^3;$$

де  $m_{\text{Д.сеп}} = 0,1925 \text{ кг/м}^3$  [2, табл. 1.3], [6, додаток 2];

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{G_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2} k_t} = \frac{1637}{1,964 \cdot 0,9385} = 888 \text{ м}^3,$$

де  $k_t = -0,0021t + 0,9805 = -0,0021 \cdot 20 + 0,9805 = 0,9385$ ;  $t = 20^\circ$  – температура навколишнього середовища вестибюля та сходової клітки.

Аналогічно,  $V_{\text{CO}} = 202,4 \text{ м}^3$ ;  $V_{\text{NO}} = 2,86 \text{ м}^3$ ;  $V_{\text{HCN}} = 0,1 \text{ м}^3$ ;  $V_{\text{АКР}} = 1,88 \text{ м}^3$ .

Блок 7. Визначаємо концентрацію виділених продуктів і порівнюємо з допустимою, яка небезпечна при вдиханні протягом 0,5...1 год [2, 16], а також задимленість приміщення в середовищі вестибюля та сходової клітки

$$K_{\text{CO}_2} = \frac{10^3 G_{\text{CO}_2}}{V_{\text{н.з}}} = \frac{10^3 \cdot 1637}{448} = 3654 \text{ г/м}^3 > [K_{\text{CO}_2}] = 90 \text{ г/м}^3;$$

Аналогічно,  $K_{\text{CO}} = 416 \text{ г/м}^3 > [K_{\text{CO}}] = 2,4 \text{ г/м}^3$ ;  $K_{\text{NO}} = 8 \text{ г/м}^3 > [K_{\text{NO}_x}] = 0,2 \text{ г/м}^3$ ;

$K_{\text{HCN}} = 0,268 \text{ г/м}^3 > [K_{\text{HCN}}] = 0,1 \text{ г/м}^3$ ;  $K_{\text{АКР}} = 9 \text{ г/м}^3 > [K_{\text{АКР}}] = 0,1 \text{ г/м}^3$ .

Визначаємо зменшення концентрації кисню в повітрі за залежністю (12)

$$K_{\text{O}_2} = \frac{21 \left( m_{\text{O}_2} k_t - \frac{G_{\text{O}_2}}{V_{\text{н.з}}} \right)}{m_{\text{O}_2} k_t} = \frac{21 \left( 1,428 \cdot 0,9385 - \frac{1933}{448} \right)}{1,428 \cdot 0,9385} = -46,4\%.$$

Тоді концентрація кисню в об'ємі приміщення буде

$$K_{\text{нр.О}_2} = 21 + 21 \frac{K_{\text{O}_2}}{100} = 21 + 21 \frac{-46,4}{100} = 11,256\%.$$

Така концентрація кисню в зоні пожежі призводить до припинення горіння. Задимленість приміщення за залежністю (13)

$$K_D = \frac{V_D}{V_{n,z}} = \frac{208,3}{448} = 0,46.$$

Блок 8. Визначення критичного часу тривалості пожежі з підстановкою замість значення  $\tau_{в,з}$  першого значення 6 хв і далі з кроком 1 хв до отримання хоча б одного значення концентрації токсичних продуктів понад допустиме. При  $\tau_{в,з1} = 6$  хв:  $K_{CO_2} = 113,8$  г/м<sup>3</sup>;  $K_{CO} = 12,9$  г/м<sup>3</sup>;  $K_{NO} = 0,25$  г/м<sup>3</sup>;  $K_{HCN} = 0,27$  г/м<sup>3</sup>;  $K_{AKP} = 0,31$  г/м<sup>3</sup>.

Таким чином, критичний час тривалості пожежі  $\tau_{кр} < 6$  хв, що пояснюється значним збільшенням концентрації CO.

Блок 9. Кількість людей, яка підлягає евакуації, можна визначити за залежністю

$$K_{Ж.Б} = O_i z k_\partial,$$

в тому числі кількість людей похилого віку

$$K_{Ж.Б.н.в} = O_i z k_{н.в},$$

де  $O_i$  – кількість людей, яка проживає на одному поверсі в одному під'їзді; для розрахунків можна приймати  $O_i = 14$ ;  $z$  – кількість поверхів житлової будівлі;  $k_\partial$  – коефіцієнт, який враховує час доби;  $k_\partial = 0,25$  (з 7 год до 19 год);  $k_\partial = 0,85$  (з 19 год до 7 год);  $k_{н.в}$  – коефіцієнт, який враховує кількість людей похилого віку;  $k_{н.в} = 0,125$ . Тоді для нашого прикладу

$$K_{Ж.Б} = 14 \cdot 5 \cdot 0,85 = 60 \text{ чол.}$$

в тому числі

$$K_{Ж.Б.н.в} = 14 \cdot 5 \cdot 0,125 = 9 \text{ чол.}$$

Але евакуювати людей при прибутті до місця виклику пожежно-рятувальних підрозділів не можливо, тому що на час прибуття значення концентрації токсичних продуктів у вестибулі та сходовій клітці перебільшують допустимі значення.

Блок 10. Розрахунок температури в зоні теплової дії, щодо її впливу на людину. Визначаємо температуру  $T_1$  в осередку пожежі за залежністю (14)

$$T_1 = \frac{10^3 Q_{н.р.1сер} S_{П1} \tau_S}{c_{1сер} M_1} + 293 = \frac{10^3 \cdot 15,9 \cdot 18 \cdot 5,7}{2,4 \cdot 1314} + 293 = 810 \text{ К,}$$

де  $Q_{н.р.1сер} = 15,9$  МДж/(м<sup>2</sup>·хв) – середнє значення найнижчої робочої теплоти згорання [2, 6];  $c_{1сер} = 2,4$  кДж/кг·К – середнє значення питомої теплоємності [2, 6];  $M_1 = 1314$  кг – сумарна маса матеріалів пожежного навантаження, яка знаходиться на площі пожежі;  $\tau_S = 5,7$  хв – час вільного горіння до прийнятого значення  $S_{П1}$  (визначається за залежністю (3)).

Для визначення відстані  $L_\phi$  від фронту пожежі до безпечної температури скористаємося залежністю (15)

$$L_\phi = 370 \exp \left[ - \left( 0,01 - \frac{0,1}{T_1} \right) T \right] = 370 \exp \left[ - \left( 0,01 - \frac{0,1}{810} \right) 343 \right] = 12,3 \text{ м.}$$

де  $T = 70^\circ\text{C}$  або 343 К.

Блок 11. На об'єкті є централізоване водопостачання та є можливість вимикання електроенергії і газу.

Блок 12. Виконує вивід отриманих прогнозованих даних в зоні виникнення пожежі на екран дисплея та принтер для роздруку результатів.

### **Висновки:**

1. Розроблена імітаційна модель прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі дозволяє оперативно отримувати інформацію, яка забезпечує значне підвищення ефективності функціонування пожежно-рятувальних підрозділів міста в процесі ліквідації пожежі.
2. Час отримання інформації за допомогою імітаційної моделі прогнозування обставин в зоні виникнення пожежі не перевищує 40...50 с з моменту отримання повідомлення, що забезпечує оперативність роботи диспетчерської служби.
3. Необхідна подальша робота з метою удосконалення та спрощення імітаційної моделі на підставі отримання банку даних статистики.

### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Кимстач И. Ф. Организация тушения пожаров в городах и населенных пунктах / И. Ф. Кимстач. – М.: Стройиздат, 1977. – 143 с.
2. Иванников В. П. Справочник руководителя тушения пожара / В. П. Иванников, П. П. Клюс. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
3. Биченок М. М. Автоматизация управления захистом регіону у надзвичайних ситуаціях. Автореф. дис. ... доктора техн. наук / М. М. Биченок. – К.: Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова, 1998. – 38 с.
4. Повзик Я. С. Пожарная тактика / Я. С. Повзик, П. П. Клюс, А. М. Матвейкин. – М.: Стройиздат, 1990. – 335 с.
5. Клюс П. П. Пожежна тактика / П. П. Клюс, В. Г. Палюх, А. С. Пустовой, Ю. М. Сенчихін, В. В. Сировий. – Харків : Основа, 1998. – 592 с.
6. Пузач С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С. В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
7. Смагин А. В. Моделирование выделения и распространения токсичных газов при пожарах в зданиях и сооружениях для обоснования их объемно-планировочных решений с целью обеспечения безопасной эвакуации людей / А. В. Смагин // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2008. – 24 с.
8. Гороновский И. Т. Краткий справочник по химии / И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаренко, Е. Ф. Некряч. – К. : Наукова думка, 1987. – 831 с.
9. Нормативи по пожежно-стройовій підготовці. – К. : УДПО МВС України, 1995. – 14 с.
10. Совершенствование организации и управления пожарной охраной / Н. Н. Брушлинский, А. К. Микеев, Г. С. Бозуков и др. // Под ред. Н.Н. Брушлинского. – М. : Стройиздат, 1986. – 152с.
11. <http://ru.wikipedia.org/wiki>, 2008. – 2 с.
12. Пляскин И. И. Оптимизация технических решений в машиностроении / И. И. Пляскин. – М. : Машиностроение, 1982. – 176 с.
13. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.
14. Журнал опису пожеж Сихівського РВ м. Львова ГУ МНС України у Львівській області // Журнал заведений 21.01 2006 р.
15. Раева Е. С. Транспортные коммуникации и эвакуационные пути в многоэтажных жилых домах / Е. С. Раева, А. П. Седов, В. Н. Чирков. – М.: Стройиздат, 1976. – 160 с.
16. Чернов С.М., Ковалишин В.В. Ізолюючі апарати. Обслуговування та використання / С. М. Чернов, В. В. Ковалишин. – Львів: Сполом, 2002. – 194 с.

*Э.Н. Гулида, д. т. н., проф., Д.П. Войтович*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ В ЗОНЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРА В ГОРОДАХ**

Рассмотрены и проанализированы существующие методы определения обстоятельств в зоне возникновения пожара и предложена имитационная модель для прогнозирования этих обстоятельств. Проверка на адекватность имитационной модели за критерием Фишера показала, что модель является адекватной.

**Ключевые слова:** пожар, время сообщения, площадь пожара, токсичные газы, температура, водоснабжение, эвакуация.

*E.N. Gulida, Doktor of Science (Engineering), Professor, D.P. Vojtovich*

## **PROGNOSTICATION OF CIRCUMSTANCES IN AREA OF ORIGIN OF FIRE IN CITIES**

Considered and analysed existent methods of determination of circumstances in the area of origin of fire and a simulation model is offered for prognostication of these circumstances. Checking for adequacy of simulation model rotined after the criterion of Fishera, that a model was adequate.

**Key words:** fire, time of report, area of fire, toxic gases, temperature, water-supply, evacuation.

УДК 621.928.9

*Р.М. Василів (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

## **ПИЛОВЛОВЛЕННЯ – ЯК МЕТОД ЗНИЖЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ ТА ВИБУХІВ СПРИЧИНЕНИХ ПИЛОМ**

В статті проаналізовано аналізи факторів, які впливають на пожежо та вибухонебезпечні властивості пилу. Запропоновано принципово нову конструкцію апарата, здатну високоефективно вловити дрібнодисперсний пил та довести концентрацію пилу до величин, обумовлена нормами граничнодопустимих концентрацій

**Ключові слова:** пиловловлення, дрібнодисперсний пил, жалюзійний відокремлювач, нижня межа вибуховості.

**Стан проблеми.** Необхідність охорони навколишнього середовища приводить до істотних змін у загальних підходах до забезпечення екологічної ефективності виробництв та забезпечення його пожежо та вибухонебезпеки. Замість заходів тимчасового характеру, спрямованих на боротьбу з наслідками забруднень, пожеж та вибухів, тепер все частіше на стадії проектування й будівництва підприємств вживають заходи довгострокового характеру, в основі яких закладений принцип: не боротьба з наслідками забруднень і катастроф техногенного характеру, а ліквідація причин їх виникнення.

Найбільш ефективним засобом зниження пожежо та вибухонебезпеки виробництв є зниження концентрації горючого пилу нижче нижньої межі вибуховості, а це може бути