

*Е.М. Гуліда, д-р техн. наук, професор, ЛДУ БЖД,
О.В. Меньшикова, канд. фіз.-мат наук, ЛДУ БЖД*

МЕТОД СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕНІ

Розглянуто та проаналізовано існуючі методи моделювання пожежі в закритих приміщеннях та запропоновано на підставі оброблення опублікованих результатів методами математичної статистики метод моделювання пожежі в приміщенні. Перевірка на адекватність статистичної моделі за критерієм Фішера показала, що модель є адекватною. Метод статистичного моделювання дозволяє визначати температуру в різних точках об'єму приміщення в циліндричній системі координат. При цьому можлива побудова та аналіз ізотерм в площинах, які проходять через центр осередка пожежі. Крім цього, метод статистичного моделювання дозволяє будувати за допомогою системи прикладних програм MAPLE ізотермічні поверхні в об'ємі приміщення. Це дозволяє визначати вимоги та встановлювати норми для основних елементів конструкції будівлі з точки зору пожежної безпеки.

Ключові слова: пожежа, площа пожежі, температура, ізотерма, ізотермічні поверхні

Постановка проблеми. Відомо, що кожний будинок складається із різноманітних будівельних елементів, що характеризуються цілим рядом чинників, які в значній мірі відрізняються один від одного та по різному впливають на розвиток пожежі. Крім цього, значна кількість країн світу перейшли до гнучкого об'єктно-орієнтованого протипожежного нормування. Тому доцільно заздалегідь визначати вплив всіх чинників будівельних елементів на розвиток пожежі з використанням математичного моделювання пожежі та врахуванням отриманих даних для розроблення нормативів, які сприятимуть підвищенню вогнестійкості, міцності та надійності елементів конструкції будівлі, визначенню критичного часу тривалості пожежі та пришвидшенню її ліквідації. Для розв'язування цієї задачі в першу чергу використовують математичні моделі розрахунку тепломасообміну під час пожежі в приміщенні. З практичної точки зору найбільшого використання для визначення нормативних даних отримали *диференціальні (польові)* та *інтегральні* моделі розрахунку термогазодинаміки пожежі [1, 2]. Але моделювання турбулентного тепломасообміну в термогазодинамічних умовах пожежі є дуже складною проблемою, яка пояснюється багатofакторністю та нелінійністю задач фізики, що розв'язуються. Математичні моделі представляють

собою систему диференціальних рівнянь, розв'язок яких виконується на ПЕОМ з використанням методу Рунге-Кутта, відповідних програм тощо. Використання таких моделей в повсякденній інженерній пожежній практиці дуже складно і практично неможливо. Тому була поставлена задача розробити таку методологію, яка б дозволила визначати показники тепломасообміну в процесі виникнення пожежі в закритому приміщенні на інженерному рівні, тобто на підставі опублікованих результатів теоретичних і експериментальних досліджень розробити метод статистичного моделювання для прогнозування основних показників тепломасообміну в процесі виникнення пожежі в закритому приміщенні.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. У зв'язку з переходом багатьох країн світу до гнучкого об'єктно-орієнтованого протипожежного нормування математичне моделювання пожеж стає визначальною ланкою в процесі розв'язку задач пожежної безпеки. Над розробленням детерміністичних математичних моделей пожеж працюють колективи спеціалістів США, Великобританії, Японії, Росії та інших країн [2]. Особливо актуальним є використання диференціальних (польових) моделей пожеж особливо для визначення необхідного часу евакуації людей із нестандартних об'єктів [1]. Але ці моделі є найбільш складними і трудомісткими при їх розробленні та впровадженні.

Крім цього, для моделювання пожеж використовують інтегральний метод, який базується на фундаментальних законах природи – законах збереження маси, імпульсу та енергії. Ця інтегральна модель була розроблена академіком НАНПБ Росії докт. техн. наук, проф. Ю.А. Кошмаровим та модифікована докт. техн. наук, проф. С.В. Пузачем [1]. Методами статистичного моделювання пожеж в нашій країні практично до цього часу не займалися.

Постановка задачі та її розв'язання. В літературі [1-7] наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень по визначенню температури в процесі виникнення пожежі в закритих приміщеннях різних об'ємів з різним пожежним навантаженням, часом вільного горіння і площею осередку пожежі, на різній висоті від підлоги до стелі приміщення та на різній відстані від центру осередка пожежі. Це дозволило розробити метод статистичного моделювання пожеж в закритих приміщеннях, який полягає у використанні нелінійної моделі для визначення температури T_i у довільній точці приміщення, заданої циліндричними координатами (R, φ, z) , що була отримана на підставі даних робіт [1-7] з використанням методу псевдофакторного експерименту

$$T_i = T_{o.n} \frac{C_T G^{0,237} \tau_{B.T}^{0,264}}{R^{0,51} Z^{0,42} S_{II}^{0,59}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

де $T_{o,п}$ – температура осередку пожежі, °C; C_T – коефіцієнт пропорційності та обезрозмірювання складових елементів дробу;

$$C_T = 0,47 \frac{M^{2,584}}{кг^{0,237} хв^{0,264}}; G - \text{пожежне навантаження, кг/м}^2 [8];$$

$\tau_{в.г}$ - тривалість вільного горіння, хв.; R – радіус (координата), на якому визначається температура T_i від центра осередка пожежі, м; z – координата від підлоги до площини, на якій визначається температура T_i по висоті приміщення, м; $S_{П}$ – площа пожежі, м².

Залежність (1) була отримана для границь зміни її складових в межах: $T_{o,п} = 510 \dots 1000$ °C; $\tau_{в.г} = 1 \dots 20$ хв; $G = 25 \dots 150$ кг/м²; $R = 0,1 \dots 18$ м; $z = 0,1 \dots 6$ м; $S_{П} = 4 \dots 650$ м².

Алгоритм методу статистичного моделювання пожеж в закритих приміщеннях полягає в наступному:

1) орієнтовно задаємося площею пожежі $S_{П}$ в м² до початку роботи перших стволів;

2) визначаємо час вільного горіння $\tau_{в.г}$ до прийнятого значення $S_{П}$, хв;

кругова, кутова форми пожежі

$$\tau_{в.г} = \frac{\sqrt{\frac{S_{П}}{0,5\alpha}}}{V_{л}}, \text{ хв} \quad (2)$$

де α – кут форми пожежі, рад (кругова – $\alpha = 6,28$; кутова $180^\circ - \alpha = 3,14$; кутова $90^\circ - \alpha = 1,57$);

прямокутна

$$\tau_{в.г} = \frac{S_{П}}{a_{п} V_{л}}, \text{ хв} \quad (3)$$

$a_{п}$ – ширина пожежі, м $V_{л}$ – середнє значення лінійної швидкості розповсюдження полум'я в залежності від виду горючого навантаження,

м/хв; $V_{л} = (1/n_i) \sum_{j=1}^{15} V_{лj}$, n_i – загальна кількість різного j -го горючого

навантаження (в табл. 1 наведено 15 різних видів горючого навантаження) для даного приміщення, в якому розглядається пожежа;

3) визначаємо температуру $T_{o,п}$ в осередку пожежі за залежністю [8]

$$T_{o,п} = \frac{10^4 Q_{н.р.сер} S_{П}}{c_{сер} M} + 293, \text{ К} \quad (4)$$

де $Q_{н.р.сер}$ – середнє значення найнижчої робочої теплоти згорання для даного приміщення, в якому розглядається пожежа, МДж/(м²·хв);

$$Q_{н.р.ср} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{15} Q_{н.р.j}; \quad (5)$$

$Q_{н.р.j}$ – найнижча робоча теплота згорання j -го горючого навантаження (табл. 1); $c_{ср}$ – середнє значення питомої теплоємності для даного приміщення, в якому розглядається пожежа, кДж/кг·К (табл. 1); M – сумарна маса матеріалів пожежного навантаження, яка знаходиться на площі пожежі;

$$c_{ср} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{15} c_j; \quad (6)$$

$$M = GS_{п}, \text{ кг} \quad (7)$$

c_j – питома теплоємність j -го горючого навантаження, виходячи із можливого різного горючого навантаження (із 15-ти можливих, табл. 1); 293К – температура навколишнього середовища в приміщенні, в якому виникла пожежа.

Визначення значення $T_{o,п}$ в К за залежністю (4) необхідно перевести в °С;

4) визначаємо координати X_0 , Y_0 центра осередка пожежі на підлозі приміщення в декартовій системі координат (рис. 1). Значення координат X_0 і Y_0 приймаємо за початок координат R , φ , z циліндричної системи координат;

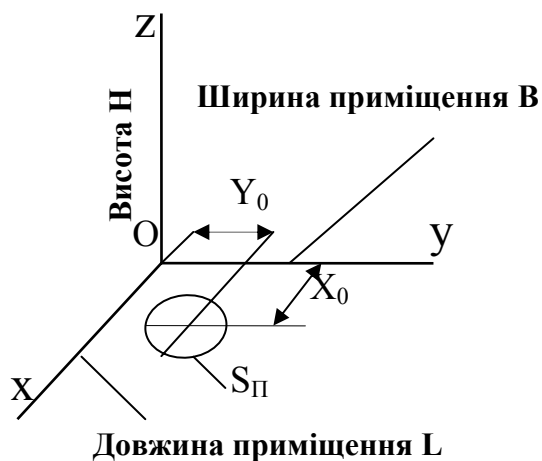


Рис. 1. – Визначення координат центра осередка пожежі

5) виходячи з розміру ширини приміщення B встановлюємо границі зміни координати R . Якщо $B - Y_0 \leq B/2$, то $0,1 \leq R \leq Y_0$; якщо $B - Y_0 > B/2$, то $0,1 \leq R \leq (B - Y_0)$; значення координати R приймаємо з кроком 0,5 м. У випадку розповсюдження пожежі по всьому приміщенню значення R приймаємо з тим же кроком до значення довжини приміщення $L - X_0$;

6) враховуючи висоту приміщення H , визначаємо кількість перерізів k вздовж осі z площиною, яка пара-

лельна площині xOy з кроком 0,5 м, тобто $k = [(H/0,5) + 1]$, а значення z приймаємо в межах $0,1 \leq z \leq H$. На кожній площині визначаємо температуру в циліндричній системі координат в межах зміни координати R ;

7) використовуючи систему MAPLE ПЕОМ та отриману модель (1), будемо при різних значеннях $\tau_{в,г}$ ізотермічні поверхні в циліндричній системі координат та ізотерми в перерізі, який паралельний площині zOy і проходить через центр осередка пожежі. Отримані ізотерми та ізотермічні поверхні характеризують динаміку температур влюбій точці приміщення, в якому розглядається пожежа.

Таблиця 1 – Найнижча робоча теплота згорання та питома теплоємність [1, 8]

№ з/п	Назва горючого навантаження	Найнижча робоча теплота згорання $Q_{н,р}$, МДж/м ² ·хв	Питома теплоємність c , кДж/кг·К	Лінійна швидкість розповсюдження полум'я $V_{л}$, м/хв
1	Деревина	13,8	1,7	2,4
2	Меблі, побутові вироби, тканини	14,7	2,4	0,75
3	Обладнання (верстати), мастила, фарба	30	2	0,4
4	Меблі, папір	14	2,7	2,52
5	Меблі, лінолеум ПВХ	14	2,5	0,9
6	Книжки, журнали на стелажах	14,5	1,8	0,62
7	Сцена, деревина, завіса	13,8	2,4	2,2
8	Дерево, тканини, фарба	14	2,5	0,98
9	Паливно-мастильні матеріали	43,2	2,1	-
10	Різні промислові товари	16,7	1,8	0,43
11	Електротехнічні прилади та матеріали	20,9	2,2	0,75
12	Лікарські препарати, етиловий спирт, гліцерин	26,6	2,4	-
13	Рис, гречка, борошно	17	1,8	0,3
14	Деревина, картон, полістирол (тара)	20,71	2,3	1,08
15	Автомобіль: гума, бензин, штучна шкіра, емаль	31,7	2,1	0,41

Розроблений метод статистичного моделювання для прогнозування основних показників тепломасообміну в процесі виникнення

пожежі в закритому приміщенні перевіряли на адекватність за критерієм Фішера результатам, які наведені в роботах [1-7]. Загальна кількість різних перевірок на адекватність дорівнювала $n = 14$, що відповідає числу ступенів вільності дисперсії відтворюваності $f_b = n = 14$ при кількості паралельних дослідів $t = 1$. Тоді число ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ад} = n - t - 1 = 14 - 1 - 1 = 12$. В цьому випадку табличне значення критерію Фішера буде [9] $F_{(0,05;12;14)} = 2,5342$ при 5% рівні значущості. Розраховані значення критерію Фішера коливалися в межах $0,827 \dots 1,217$, що вказує на адекватність отриманої моделі результатам робіт [1-7]. Це вказує на можливість використання методу статистичного моделювання пожежі в закритих приміщеннях в пожежній практиці.

Розглянемо метод статистичного моделювання пожежі в закритих приміщеннях на **прикладі**: пожежа виникла в приміщенні розміром $V \times L \times H = 6 \times 6 \times 3$ м; температура в приміщенні $t = 20^\circ\text{C}$; пожежне навантаження $G = 90$ кг/м² (деревина, меблі, побутові вироби, тканини); площа пожежі $S_{п} = 16$ м²; стіни приміщення із червоної випаленої цегли та заштукатурені, а стеля – заштукатурені залізобетонні плити; пожежа кутова ($\alpha = 90^\circ$).

1. Визначаємо час вільного горіння за залежністю (2)

$$\tau_{в.г} = \frac{\sqrt{\frac{16}{0,5 \cdot 1,57}}}{0,5(2,4 + 0,75)} = 12,9 \text{ хв.}$$

2. Визначаємо температуру в осередку пожежі за залежністю (4)

$$T_{о.п} = \frac{10^4 \cdot 0,5(13,8 + 14,7)16}{0,5(1,7 + 2,4) \cdot 90 \cdot 16} + 293 = 1065 \text{ К або } 792^\circ\text{C}.$$

3. Координати $X_0 = 0$, $Y_0 = 0$ центра осередка пожежі.

4. Границі зміни координати R . Для цього виконуємо перевірку $B - Y_0 = (6 - 0) > 6/2$. В цьому випадку координата R буде змінюватися в межах $0,1 \leq R \leq 6$, а її значення приймаємо з кроком $0,5$ м.

5. Визначаємо кількість перерізів k вздовж осі z площиною, яка паралельна площині xOy з кроком $0,5$ м, тобто $k = [(H/0,5) + 1] = [(3/0,5) + 1] = 7$. Границі зміни координати z будуть в межах $0,1 \leq z \leq 3$. Для кожного перерізу визначаємо межі зміни температур при різних значеннях часу вільного горіння з використанням моделі (1). Аналізуючи отримані значення температур будуюмо за допомогою системи MAPLE ізотерми та ізотермічні поверхні (рис. 2-5).

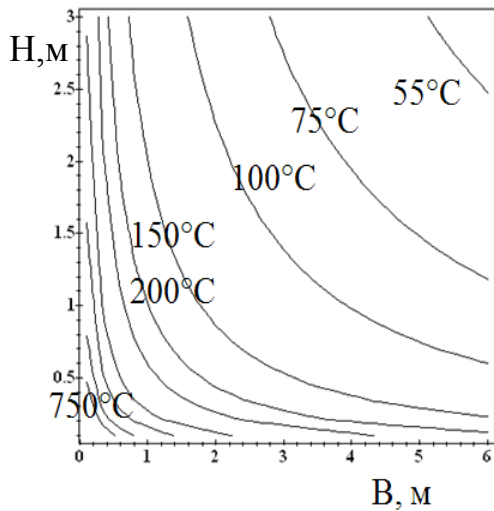


Рис. 2. – Ізотерми по перерізу приміщення при $t_{в.г} = 1$ хв; пожежа кутова $\alpha = 90^\circ$ з координатами осередка пожежі в декартовій системі координат $X_0 = 0, Y_0 = 0$

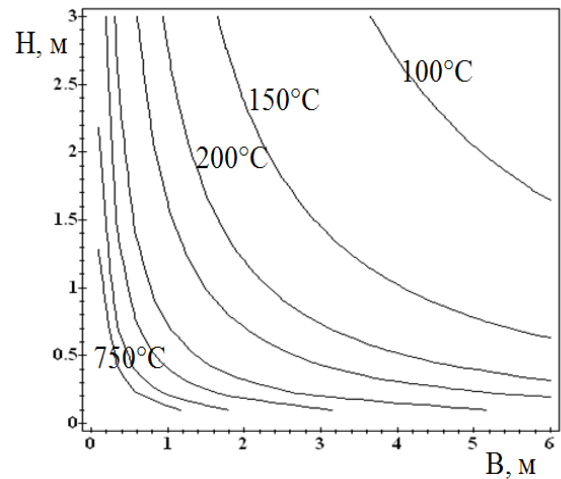


Рис. 3. – Ізотерми по перерізу приміщення при $t_{в.г} = 5$ хв; пожежа кутова $\alpha = 90^\circ$ з координатами осередка пожежі в декартовій системі координат $X_0 = 0, Y_0 = 0$

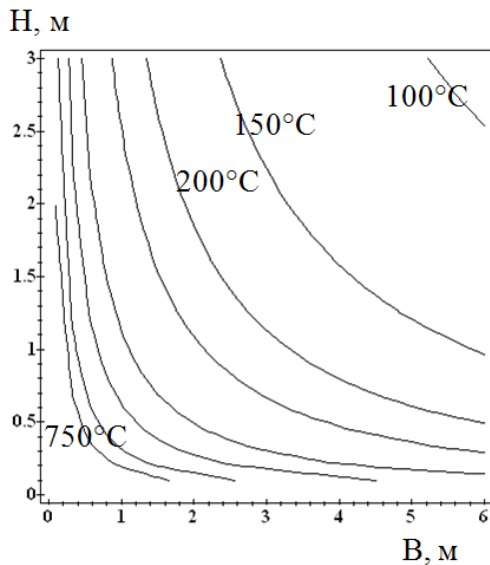


Рис. 4. – Ізотерми по перерізу приміщення при $t_{в.г} = 10$ хв; пожежа кутова $\alpha = 90^\circ$ з координатами осередка пожежі в декартовій системі координат $X_0 = 0, Y_0 = 0$

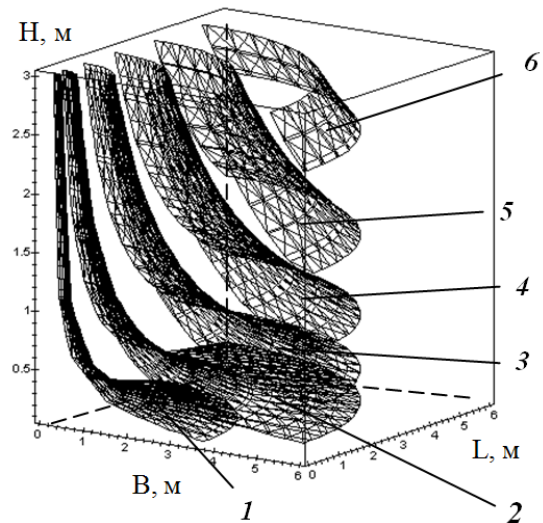


Рис. 5. – Ізотермічні поверхні в приміщенні при $t_{в.г} = 10$ хв: 1 – 500°C ; 2 – 300°C ; 3 – 200°C ; 4 – 150°C ; 5 – 120°C ; 6 – 100°C ; пожежа кутова $\alpha = 90^\circ$ з координатами осередка пожежі в декартовій системі координат $X_0 = 0, Y_0 = 0$

Наведені ізотерми та ізотермічні поверхні ілюструють зміну температури газового середовища з часом вільного горіння при розгляді пожежі в закритому приміщенні. Наприклад, температура при

зміні часу вільного горіння від $\tau_{в.г} = 1$ хв до $\tau_{в.г} = 10$ хв на висоті приміщення від 2,5 м до 3 м і відстані від осередку пожежі від 5 м до 6 м зростає майже у два рази.

Висновки

1. Розроблений метод статистичного моделювання пожежі в закритому приміщенні дозволяє отримувати інформацію, яка забезпечує значне підвищення ефективності розроблення нормативної бази для вибору елементів конструкції будівель та функціонування пожежно-рятувальних підрозділів міста в процесі ліквідації пожежі.

2. Метод статистичного моделювання пожежі в закритому приміщенні забезпечує отримання інформації на інженерному рівні для розв'язування важливих задач з пожежної практики. На підставі аналізу результатів моделювання можна визначити напрямлення та швидкість переміщення газового середовища в приміщенні в процесі пожежі, а враховуючи питома димовиділення – задимленість приміщення.

3. Необхідна подальша робота з метою удосконалення та спрощення методу для прогнозування основних показників тепломасообміну в процесі виникнення пожежі в закритому приміщенні на підставі отримання банку даних статистики.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

2. Рыжов А.М. Дифференциальный (полевой, CFD) метод моделирования пожаров // Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Ассоциация «Пожнаука», 2000. – С. 25-88.

3. Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. Моделирование пожара в помещениях зданий различного назначения // Пожаровзрывобезопасность, 1992, №1. – С. 22-28.

4. Астахова И.Ф., Молчадский И.С. Развитие полевого моделирования пожара в помещении и теории огнестойкости в России // Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Ассоциация «Пожнаука», 2000. – С. 89-106.

5. Cooper L.Y., Rockett J.A., Mitler H.E., Stroup D.W. A program for the development of a benchmark compartment fire model computer code // Math. Model. Fires. – Philadelphia (Pa), 1988. – P. 116-127.

6. Raycraft J., Keller V.D., Yang H.Q., Yang K.T. Fire spread in a three-dimensional pressure vessel with radiation exchange and wall heat losses // *Math. and Comput. Modell.*, 1990, №14. – P. 795-800.

7. Galea E.R. A general approach to validating evcuation models witch an application to EXODUS // *Jornal of Fire Scieces*, 1998, v. 16, №6. – P. 414-436.

8. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288с.

9. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.

Э.Н. Гулида, О.В. Меньшикова

Метод статистического моделирования пожара в помещении.

Рассмотрены и проанализированы существующие методы моделирования пожара в закрытых помещениях и предложено на основании обработки опубликованных результатов методами математической статистики метод моделирования пожара в помещении. Проверка на адекватность статистической модели по критерию Фишера показала, что модель является адекватной. Метод статистического моделирования позволяет определять температуру в разных точках объема помещения в цилиндрической системе координат. При этом возможно построение и анализ изотерм в плоскостях, которые проходят через центр возникшего пожара. Кроме этого, метод статистического моделирования позволяет строить с помощью системы прикладных программ MAPLE изотермические поверхности в объеме помещения. Это позволяет определять требования и устанавливать нормы для основных элементов конструкции здания с точки зрения пожарной безопасности.

Ключевые слова: пожар, площадь пожара, температура, изотерма, изотермические поверхности.

E.N. Gulida, O.V. Menchykova

A method of statistical design of fire is in apartment.

The existent methods of design of fire are considered and analyses in the closed apartments and it is offered on the basis of treatment of existent results by the methods of mathematical statistics method of design of fire in an apartment. Checking for adequacy of statistical model on the criterion of Fichers showed that a model was adequate. The method of statistical design allows determining a temperature in the different points of volume of apartment in the cylindrical system of co-ordinates. Thus possible construction and analysis of isotherms in planes, which pass through the center of осередка fire. Except for it, the method of statistical design allows to build by means of the system of the application programs of MAPLE isothermal surfaces in the volume of apartment. It allows to determine requirements and set norms for the basic elements of building construction from the point of view of fire safety.

Keywords: fire, area of fire, temperature, isotherm, isothermal surfaces.