

## ПРОГНОЗУВАННЯ ВЕЛИЧИНИ ОПТИЧНОЇ ГУСТИНИ ДИМУ ПРИ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННІ

На підставі рівняння матеріального балансу пожежі була розроблена інтегральна математична модель димоутворення в процесі вільного горіння при пожежі в закритих приміщеннях. Розроблена інтегральна математична модель димоутворення дозволила після її розв'язку отримати залежність для визначення середньооб'ємної оптичної густини диму. Отримана залежність дає можливість прогнозувати значення оптичної густини диму при пожежі в закритих приміщеннях, а також визначати значення граничної видимості в диму, що є дуже важливим при визначенні критичного часу пожежі та евакуації людей з приміщення.

*Ключові слова:* оптична густина диму, пожежа, площа пожежі, газове середовище, температура

**Сучасний стан проблеми.** В процесі виникнення пожежі діють небезпечні чинники, які впливають на людей та матеріальні цінності. До таких чинників, згідно з ГОСТ 12.1.004 – 91, відносять: 1) полум'я та іскри; 2) підвищену температуру середовища; 3) токсичність продуктів горіння та розпаду; 4) дим; 5) понижену концентрацію кисню [1]. Прогнозування небезпечних чинників пожежі потрібне для розробки заходів, необхідних для безпечної евакуації людей в процесі пожежі, для розробки та удосконалення систем сигналізації і автоматичних систем пожежогасіння, для оцінки фактичних граничних значень вогнестійкості елементів конструкції тощо.

Розглянемо можливість прогнозування четвертого небезпечного чинника пожежі в приміщенні – диму, який кількісно можна представити величиною його оптичної густини. Це питання розглядалося частково в роботах [2-6] без наведення методики визначення величини оптичної густини. Для розв'язування цієї задачі в першу чергу використовують математичні моделі розрахунку тепломасообміну під час пожежі в приміщенні. З практичної точки зору найбільше використовують *диференціальні (польові)* та *інтегральні* моделі розрахунку термогазодинаміки пожежі [2-5]. Але *диференціальні (польові)* тривимірні моделі для розв'язування задач пожежної профілактики мало ефективні у зв'язку з грубою постановкою граничних умов та неточністю моделі ефективною в'язкості [6]. Тому розробники польових моделей зупинилися на використанні тільки двовимірних моделей.

*Інтегральні* моделі, що запропоновані Ю.А. Кошмаровим і І.С. Молчадським [3, 5], представляють собою систему звичайних диференціальних рівнянь, які найбільш просто розв'язуються методом Рунге-Кутта. Залежно від мети та поставленої задачі, інтегральну модель можна модифікувати, наприклад, записом тільки рівняння балансу оптичної густини диму, розв'язок якого разом з граничними і початковими умовами дає змогу отримати залежність для визначення значення оптичної густини диму. Тому для розв'язування задачі, яка пов'язана з прогнозуванням четвертого небезпечного чинника пожежі в приміщенні, будемо використовувати інтегральну модель.

**Мета роботи.** Розробити метод прогнозування величини оптичної густини диму в процесі виникнення пожежі в закритому приміщенні.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Рівняння матеріального балансу пожежі можна представити як рівняння балансу для газового середовища в приміщенні [1, 3]

$$\frac{d(\rho_c V)}{d\tau} = \psi + \sum_i G_i - \sum_k G_k, \quad (1)$$

де  $\rho_c$  – середньооб'ємна густина газового середовища в приміщенні, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – вільний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час, с;  $\psi$  – швидкість вигорання (швидкість газифікації) горючого

матеріалу в розглядуваний момент часу, кг/с;  $\sum_i G_i$  – витрати повітря, яке подається з навколишнього середовища в приміщення в розглядуваний момент часу процесу розвитку пожежі, кг/с;  $\sum_k G_k$  – витрати газів, які виходять з приміщення через прорізи у відповідний момент часу, кг/с.

Ліва частина рівняння (1) представляє зміну газового середовища за одиницю часу в інтервалі, який дорівнює  $d\tau$ , а права – сума потоків маси. Газове середовище містить найдрібніші тверді частинки діаметром 0,2...1 мкм, які впливають на оптичні властивості середовища в приміщенні. Це призводить до розсіювання енергії світлових хвиль внаслідок багатократного дифузного відбиття від цих частинок і погіршення видимості. Оптичні властивості середовища приміщення характеризуються середньооб'ємною оптичною густиною диму  $\mu$ , тобто співвідношенням оптичної кількості диму  $S$  (Нп·м<sup>2</sup>), який знаходиться в приміщенні, до об'єму приміщення  $V$  (м<sup>3</sup>)

$$\mu = \frac{S}{V}, \text{ Нп/м.} \quad (2)$$

В залежності (2) скорочення «Нп» означає слово «Непер». Середньооб'ємна оптична густина диму  $\mu$  і гранична видимість в диму  $l_{ep}$  пов'язані між собою співвідношенням [1]

$$l_{ep} = \frac{2,38}{\mu}, \text{ м.} \quad (3)$$

Виходячи із залежності (2), можна констатувати, що визначивши на підставі прогнозу середньооб'ємну оптичну густина диму  $\mu$  при пожежі в приміщенні, можна орієнтуватися у часі на можливу граничну видимість в диму. Тому задача полягає в отриманні залежності виду  $\mu = f(\tau)$  на підставі розв'язання диференціального рівняння критичної густини диму в приміщенні.

В більшості випадків в приміщеннях відсутні прорізи для надходження свіжого повітря із зовні, тобто на початковій стадії пожежі повітря не надходить у приміщення, а відбувається тільки виштовхування газів із приміщення через щілини та малі прорізи. Ця особливість на початковій стадії пожежі дозволяє спростити диференціальне рівняння пожежі. Тільки через деякий час середня температура у приміщенні досягне 300...350 °С, що призведе до руйнування шибок і процес газообміну стане двостороннім. Тому на початковій стадії пожежі з рівняння (1) можна відкинути член, який враховує витрати повітря, що подаються з навколишнього середовища в приміщення, тобто

$$\sum_i G_i = 0. \quad (4)$$

Крім цього, приміщення, в якому виникла пожежа, не є абсолютно герметичним і середній тиск  $p_c$  всередині його залишається практично сталим та дорівнює тискові зовні. Тоді з достатньою точністю можна прийняти

$$\frac{dp_c}{d\tau} \approx 0; \quad \rho_c T_c = \rho_0 T_0, \quad (5)$$

де  $\rho_c$ ,  $T_c$  – середнє значення густини і температури повітря всередині приміщення на початковій стадії пожежі відповідно;  $\rho_0$ ,  $T_0$  – густина і температура повітря всередині приміщення перед початком пожежі.

Інтервал часу, упродовж якого виконується односторонній газообмін, триває приблизно 10...15 хв. Середня температура та концентрація кисню в приміщенні за цей період часу змінюються дуже мало. Тому можна прийняти, що коефіцієнт повноти згоряння  $\eta$ , питома димовиділення  $D$  та об'єм приміщення  $V$  залишаються незмінними. Крім цього, треба врахувати частину теплового потоку, який переходить в огорожу

$$Q_{oz} = \varphi Q_{II} = \varphi \eta \psi Q_{min}, \quad (6)$$

де  $Q_{oz}$  – сумарний тепловий потік, який переходить в огорожу (стіни, стелю, підлогу), Вт;  $\varphi$  – коефіцієнт теплопоглинання [1];  $Q_{II}$  – швидкість тепловиділення в зоні полум'я осередку пожежі, Вт;  $Q_{min}$  – найнижча теплота згоряння, Дж/кг.

В цьому випадку диференціальне рівняння пожежі з урахуванням припущення, що ізобарна теплоємність  $c_p$  буде дорівнювати ізобарній теплоємності  $c_{p0}$  перед початком пожежі ( $c_p = c_{p0} = \text{const}$ ) можна представити у вигляді

$$\frac{d(\rho_c V)}{d\tau} = \psi - \sum_k G_k. \quad (7)$$

Рівняння енергії внаслідок виникнення пожежі буде

$$\psi Q_{min} \eta - c_p T_c \sum_k G_k - Q_{oz} = 0. \quad (8)$$

На підставі залежності (8) та з урахуванням залежностей (5) і (6) отримуємо

$$\sum_k G_k = \frac{\psi Q_{min} \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_c. \quad (9)$$

З урахуванням залежності (9) диференціальне рівняння пожежі (7) має вигляд

$$\frac{d(\rho_c V)}{d\tau} = \psi - \frac{\psi Q_{min} \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_c = \psi \left[ 1 - \frac{Q_{min} \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_c \right]. \quad (10)$$

Переходячи до диференціального рівняння, яке описує зміну оптичної густини диму в приміщенні, скористаємося рівнянням (10) з урахуванням одиниць виміру кожної складової

$$\frac{d(\mu V)}{d\tau} = \psi D \left[ 1 - \frac{Q_{min} \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0 D} \mu \right], \text{ Нп} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (11)$$

де  $D$  – питома димовиділення,  $\text{Нп} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ .

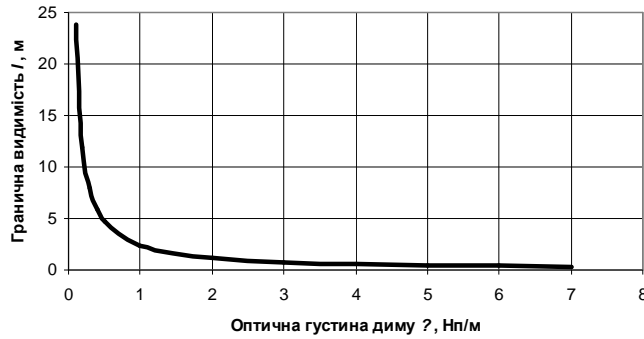
Для інтегрування диференціального рівняння (11) необхідно розділити змінні та врахувати початкові умови, а саме при  $\tau = 0$  значення  $\mu = 0$ . Після інтегрування та підстановки замість  $\psi$  добутку  $\psi_n \cdot S_{II}$ , тобто добутку питомої швидкості вигорання ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) на площу пожежі ( $\text{м}^2$ ), отримуємо

$$\mu = \frac{c_p \rho_0 T_0 D}{Q_{min} \eta (1 - \varphi)} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\psi_n S_{II} \eta Q_{min} (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0 V} \tau \right) \right], \text{ Нп} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (12)$$

де  $c_p \approx 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  – ізобарна теплоємність газового середовища в приміщенні;  $\rho_0 \cdot T_0 \approx 3 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}$ ;  $\eta \approx 1$  – коефіцієнт повноти згоряння;  $\varphi \approx 0,5$  – коефіцієнт тепловтрат [1];  $S_{II} = 0,125 \alpha V_n^2 \tau^2$ ,  $\text{м}^2$  – площа кругової та кутової пожежі;  $\alpha$  – кут пожежі, рад;  $V_n$  – лінійна швидкість розповсюдження полум'я, м/с;  $S_{II} = 0,5 b V_n \tau$ ,  $\text{м}^2$  – площа прямокутної пожежі;  $b$  – ширина приміщення, м.

Значення  $Q_{min}$ ,  $\psi_n$  та  $V_n$  наведені в ГОСТ 12.1.004 – 91 (додаток 4) [1], а значення питомого димовиділення  $D$  – в монографії [2, додаток 2].

Розглянемо вплив значення оптичної густини диму  $\mu$  на граничну видимість в диму  $l_{sp}$  (рис. 1) з використанням залежності (3). Результати аналізу графічної залежності показують, що при  $\mu = 7 \text{ Нп/м}$  видимість практично відсутня. Для евакуації людей в процесі пожежі в приміщенні допустимим значенням оптичної густини диму може бути величина  $\mu \leq 1,2 \text{ Нп/м}$ , що забезпечує видимість до 2 м, тобто в межах росту людини, яка при переміщенні може бачити підлогу.



**Рис. 1.** Залежність граничної видимості від оптичної густини диму

В процесі пожежі в приміщенні при вільному горінні значення оптичної густини диму постійно з часом змінюється в більшу сторону. Як проходить ця зміна у часі розглянемо на прикладі.

**Приклад.** Пожежа виникла в адміністративному приміщенні з розмірами внутрішнього об'єму: ширина  $b = 8$  м; довжина  $l = 10$  м; висота  $H = 3$  м. Пожежа кутова  $\alpha = 1,57$  рад. Необхідно встановити зміну значення оптичної густини диму в процесі вільного горіння при розвитку пожежі.

**Розв'язок.** Розв'язок поставленої задачі виконуємо в такій послідовності:

1. Визначаємо внутрішній об'єм приміщення:  $V = blH = 8 \cdot 10 \cdot 3 = 240 \text{ м}^3$ .
2. З табл. 1 вибираємо необхідні дані для розрахунку:  $Q_{\min} = 14002 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ ;  $V_L = 0,022 \text{ м/с}$ ;  $\psi_n = 0,021 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $D = 53 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ .

**Таблиця 1**

*Параметри горючого навантаження для деяких приміщень цивільних будівель [2]*

№ за порядком	Назва горючого навантаження	Найнижча теплота згоряння $Q_{\min}$ , Дж/кг	Лінійна швидкість розповсюдження полум'я $V_L$ , м/с	Питома швидкість вигорання $\psi_n$ , кг/м <sup>2</sup> ·с	Питома димовиділення $D$ , Нп·м <sup>2</sup> /кг
1	Адміністративне приміщення; меблі + папір (0,75 + 0,25)	$14002 \cdot 10^3$	0,022	0,021	53
2	Приміщення, яке облицьоване панелями ДВП	$18100 \cdot 10^3$	0,0405	0,0143	130
3	Кабінет; меблі + папір (0,75 + 0,25)	$14002 \cdot 10^3$	0,042	0,0129	53
4	Виставковий зал, майстерня; дерево + тканини + фарба (0,9 + 0,09 + 0,01)	$14000 \cdot 10^3$	0,0163	0,0152	53
5	Типографія	$15400 \cdot 10^3$	0,004	0,0061	41
6	Цех деревообробки, деревина	$13800 \cdot 10^3$	0,022	0,0145	57

3. За залежністю  $S_{II} = 0,125\alpha V_x^2 \tau^2$  визначаємо площу пожежі за кожні 60 с:

$$\tau_1 = 60 \text{ с}; S_{II1} = 0,125\alpha V_x^2 \tau_1^2 = 0,125 \cdot 1,57 \cdot 0,022^2 \cdot 60^2 = 0,342 \text{ м}^2; \tau_2 = 120 \text{ с}; S_{II2} = 1,4 \text{ м}^2; \\ \tau_3 = 180 \text{ с}; S_{II3} = 3,15 \text{ м}^2; \tau_4 = 240 \text{ с}; S_{II4} = 5,6 \text{ м}^2; \tau_5 = 300 \text{ с}; S_{II5} = 8,75 \text{ м}^2; \tau_6 = 360 \text{ с}; S_{II6} = 12,6 \text{ м}^2.$$

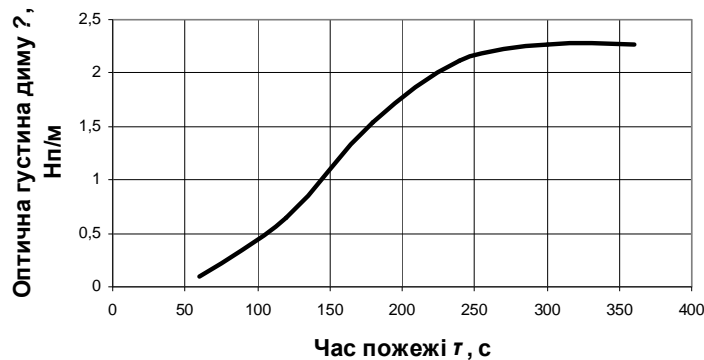
4. За залежністю (12) визначаємо значення  $\tau_1 \dots \tau_6$

$$\mu_1 = \frac{c_p \rho_0 T_0 D}{Q_{\min} \eta (1 - \varphi)} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\psi_n S_{\text{пл}} \eta Q_{\min} (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0 V} \tau_1 \right) \right] =$$

$$= \frac{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 53}{14002 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot (1 - 0,5)} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{0,021 \cdot 0,342 \cdot 1 \cdot 14002 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,5)}{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 240} 60 \right) \right] = 0,091 \text{ Нп/м};$$

$$\mu_2 = 0,65 \text{ Нп/м}; \mu_3 = 1,54 \text{ Нп/м}; \mu_4 = 2,11 \text{ Нп/м}; \mu_5 = 2,26 \text{ Нп/м}; \mu_6 = 2,27 \text{ Нп/м}.$$

5. Після визначення значень оптичної густини диму в процесі вільного горіння при розвитку пожежі будуємо графічну залежність (рис. 2), за допомогою якої можна зробити аналіз отриманих результатів прогнозу.



**Рис. 2.** Вплив часу вільного горіння при пожежі на зміну значення оптичної густини диму

Результати аналізу показують, що оптична густина диму при пожежі досягає свого максимуму приблизно на п'ятій хвилині вільного горіння. Наприклад, для адміністративного приміщення з розмірами внутрішнього об'єму, наведеними в прикладі (ширина  $b = 8$  м; довжина  $l = 10$  м; висота  $H = 3$  м), за цей період оптична густина диму сягає  $\mu = 2,27$  Нп/м, що відповідає граничній видимості приблизно  $l_{zp} = 1$  м. Цей прогноз вказує на те, що евакуацію людей з цього приміщення треба виконати за час, до п'яти хвилин. Крім цього, за цей же період часу бажано здійснити вентиляцію приміщення шляхом відкриття вікон для подачі свіжого повітря та видалення диму за рахунок підвищення тиску від нагріву в верхній частині приміщення.

### Висновки

1. Розроблено інтегральну математичну модель димоутворення в процесі вільного горіння під час пожежі в закритих приміщеннях, розв'язок якої дозволив отримати залежність для визначення (прогнозування) оптичної густини диму при пожежі в процесі вільного горіння та односторонньому газообміні.

2. Результати досліджень показують, що для нормальної евакуації людей з приміщення, в якому виникла пожежа, значення оптичної густини диму не повинно перевищувати  $\mu \leq 1,2$  Нп/м, що забезпечує видимість до 2 м.

3. Об'єм приміщення впливає обернено пропорційно на значення оптичної густини диму. Швидкість зростання  $\mu$  при збільшенні, наприклад, об'єму приміщення у два рази зменшується в 1,6...1,8 разів, тобто у стільки разів збільшується час максимального задимлення приміщення.

4. В процесі розробки планів пожежогасіння об'єктів необхідно обов'язково враховувати процес димоутворення та його вплив на евакуацію людей з приміщення при виникненні пожежі.

5. Необхідно продовжити наукову роботу в цьому напрямку для отримання залежності визначення оптичної густини диму при двосторонньому процесі газообміну.

### Список литературы:

1. ГОСТ 12.1.004 – 91. Пожарная безопасность. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 31 с.
2. 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.
3. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
4. 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.
5. Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. Моделирование пожара в помещениях зданий различного назначения // Пожаровзрывобезопасность, 1992, №1. – С. 22-28.
6. 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.

*Э.Н. Гулида*

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЫМА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ

На основании уравнения материального баланса пожара была разработана интегральная математическая модель дымообразования в процессе свободного горения при пожаре в закрытых помещениях. Разработанная интегральная математическая модель дымообразования позволила после ее решения получить зависимость для определения среднеобъемной оптической плотности дыма. Полученная зависимость позволяет прогнозировать значение оптической плотности дыма при пожаре в закрытых помещениях, а также определять значение предельной видимости в дыму, которая является очень важным фактором при определении критического времени пожара и эвакуации людей из помещения.

**Ключевые слова:** оптическая плотность дыма, пожар, площадь пожара, газовая среда, температура

*Е.М. Hulida*

### PREDICTION OF ABSORBANCY SIZE OF SMOKE AT FIRE IN BUILDING

On the basis of equalization of financial balance of fire the integral mathematical model of smoking was developed considering the process of the free burning by fire in closed buildings. The developed integral mathematical model of smoke-forming allowed after its decision to get dependence for determination of average-volumetric of smoke absorbancy. Received dependence allows to forecast the value of smoke absorbancy at fire in closed buildings, and also to determine the value of maximum visibility of smoke, which is an important factor at certain critical time of fire and evacuation of people from buildings.

**Key words:** absorbancy of smoke, fire, area of fire, gas environment, temperature

