

*Е. М. Гуліда, д-р техн. наук, професор
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

РОЗПОДІЛ БАЛАНСУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ПОЖЕЖІ В ЗАКРИТОМУ ПРИМІЩЕННІ

Розроблена методологія визначення балансу теплової енергії пожежі в закритому приміщенні. На значення балансу теплової енергії пожежі в першу чергу впливає температура осередку пожежі, яка залежить від швидкості вигорання продуктів горіння, площі пожежі та її тривалості, від маси газу, яка знаходиться в об'ємі приміщення. Крім цього, значний вплив на баланс теплової енергії чинить найнижча теплота згорання. Оцінена величина теплового потоку, яка переходить в огорожуючі конструкції на всіх стадіях розвитку пожежі. Отримана залежність для визначення коефіцієнта теплопоглинання залежно від тривалості вільного горіння. Встановлено, що коефіцієнт теплопоглинання φ не є сталою величиною, а змінює свої значення в процесі пожежі і досягає максимального значення не більше 0,5. При збільшенні об'єму закритого приміщення більша кількість теплової енергії переходить в навколишнє середовище, що зменшує теплове навантаження на огорожуючі конструкції.

Ключові слова: тепла енергія, баланс тепла, коефіцієнт теплопоглинання, пожежа.

E. M. Hulida

DISTRIBUTION OF THERMAL BALANCE DURING FIRES IN CLOSED ROOMS

The methodology of determining the thermal balance during fires in closed room was developed. Thermal balance during a fire is primarily influenced by the temperature of the seat of fire. This temperature depends on the burning rate of combustion products, the area of the fire and its duration and the mass of gas in the volume of the room. The lower calorific value also has a significant effect on the of thermal balance. The value of the heat flow, which passes into the walls of the room at all stages of the fire, was estimated. Analytic expression for determining the heat absorption coefficient depending on the duration of free burning was obtained. The results of research show that the heat absorption coefficient φ is not a constant value – during the fire it changes its value and reaches a maximum (no more than 0.5). Increasing of the volume of the room leads to increasing of the heat loss (more heat goes into the environment), which reduces the thermal load on the building structures.

Key words: thermal energy, thermal balance, heat absorption coefficient, fire.

Постановка проблеми. В процесі пожежі стан середовища в закритому приміщенні змінюється у часі. Це пояснюється зміною у часі надходження в приміщення повітря та видалення з приміщення газів від горіння матеріалів в осередку пожежі. Крім цього, в процесі розвитку пожежі в певні моменти часу можуть відкриватися в приміщенні додаткові отвори завдяки руйнуванню віконного скла внаслідок досягнення середньооб'ємної температури 300...400 °С. При пожежі в закритому приміщенні утворюється баланс теплової енергії, який постійно змінюється і відповідно частина його переходить в огорожуючі конструкції, а частина залишається в об'ємі приміщення. Але в технічній літературі відсутні дані, що дали б змогу у часі з моменту виникнення пожежі визначити розподіл балансу теплової енергії, який в першу чергу впливає на вогнестійкість конструкцій приміщення і процес ліквідації пожежі. Тому ставиться проблема визначення у часі зміни балансу теплової енергії пожежі в закритому приміщенні.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Перші результати експериментальних досліджень пожеж та їх різних стадій розвитку [1] показали, що доля поглинання тепла конструкціями приміщення, яке виділяється при пожежі може становити від 25% до 75%, тобто коефіцієнт теплопоглинання $\varphi = 0,25...0,75$. В роботі [2], яка була опублікована на рік пізніше, вказується що поглинання теплової енергії в огорожувальні конструкції знаходиться в межах 60%, а в роботі [3] цей показник рекомендують приймати в межах 50%. При цьому коефіцієнти тепловіддачі на зовнішніх поверхнях огорожуючих конструкцій необхідно розраховувати за рекомендаціями [4].

Конкретних рекомендацій та уточнень не було знайдено і в інших роботах, наприклад в результатах наукових досліджень [5]. Тому ставиться задача для розв'язання поставленої проблеми провести більш досконалі дослідження з метою уточнення розподілу балансу теплової енергії пожежі в закритому приміщенні.

Мета роботи. Розробити методологію визначення розподілу балансу теплової енергії при пожежі в закритому приміщенні.

Постановка задачі та її розв'язання. Ставиться задача розробити методологію визначення розподілу балансу теплової енергії при пожежі в закритому приміщенні. Для її розв'язання необхідно виконати такі етапи: 1) визначити сумарну теплову енергію Q , яка виділяється в зоні полум'я пожежі; 2) на підставі сумарної теплової енергії визначити баланс її переходу в огороження та в середовище приміщення при різних його розмірах залежно від виду і кількості пожежного навантаження, швидкості розповсюдження полум'я та тривалості його вільного розвитку, і форми пожежі; 3) на підставі отриманих результатів досліджень отримати емпіричну залежність для визначення коефіцієнта φ , який враховує долю тепла, яке поглинається огорожуючими конструкціями приміщення при пожежі.

На першому етапі визначаємо сумарну теплову енергію Q , яка виділяється в зоні полум'я пожежі за залежністю

$$Q = \eta \psi_n S_{II} Q_{\min}, \text{ Вт} \quad (1)$$

де η – коефіцієнт повноти згорання (при розрахунках його значення приймають в межах $\eta = 0,9 \dots 0,95$); ψ_n – питома масова швидкість вигорання, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$; Q_{\min} – найнижча теплота згорання, Дж/кг ; S_{II} – площа пожежі, м^2 .

Значення площі пожежі визначаємо за залежностями:

– при тривалості вільного горіння $\tau \leq 10$ хв (600 с)

$$S_{II} = 0,25 \alpha v_n^2 \tau^2, \text{ м}^2; \quad (2)$$

– при тривалості вільного горіння $\tau > 10$ хв (600 с)

$$S_{II} = \alpha v_n^2 (\tau - 600)^2 + 0,25 \alpha v_n^2 (600)^2 = \alpha v_n^2 (\tau^2 - 1200\tau + 450000), \text{ м}^2 \quad (3)$$

де τ – тривалість вільного горіння при пожежі, с; v_n – лінійна швидкість розповсюдження полум'я, м/с; α – кут, який враховує форму пожежі, рад (кругова пожежа – $\alpha = 3,14$ рад; кутова пожежа 180° – $\alpha = 1,57$ рад; кутова пожежа 90° – $\alpha = 0,785$ рад).

Значення Q_{\min} , v_n і ψ_n наведені в табл. 1 згідно із даними роботи [6].

Таблиця 1

Значення чинників для залежностей (1) – (3)

№ з/п	Назва горючого навантаження	Найнижча теплота згорання Q_{\min} , Дж/кг	Лінійна швидкість розповсюдження полум'я v_n , м/с	Питома масова швидкість вигорання ψ_n , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$
1	2	3	4	5
1	Приміщення будівлі I-II ст. вогнестійкості	$14002 \cdot 10^3$	0,022	0,021
2	Приміщення будівлі I-II ст. вогнестійкості, яке облицьоване панелями ДВП	$18100 \cdot 10^3$	0,0405	0,0143
3	Приміщення будівлі III-IV ст. вогнестійкості	$14002 \cdot 10^3$	0,042	0,0129
4	Приміщення механічного цеху	$14000 \cdot 10^3$	0,0163	0,0152
5	Типографія	$15400 \cdot 10^3$	0,004	0,0061
6	Цех деревообробки, деревина	$13800 \cdot 10^3$	0,022	0,0145
7	Лісопильний цех IV -V ст. вогнестійкості	$14002 \cdot 10^3$	0,022	0,021
8	Приміщення будівлі III ст. вогнестійкості	$18100 \cdot 10^3$	0,0405	0,0143
9	Приміщення будівлі I ст. вогнестійкості	$14002 \cdot 10^3$	0,042	0,0129
10	Приміщення заготівельного цеху	$14000 \cdot 10^3$	0,0163	0,0152
11	Приміщення складального цеху	$15400 \cdot 10^3$	0,04	0,0061
12	Ремонтно-механічний цех	$13800 \cdot 10^3$	0,022	0,0145

На другому етапі записуємо рівняння балансу теплової енергії з урахуванням переходу її в огорожувальні конструкції та середовище приміщення

$$Q = Q_{ст} + Q_{підл} + Q_{стеля} + Q_{с.н} , \quad (4)$$

де $Q_{ст}$ – тепловий потік, який переходить в стіни приміщення, Вт; $Q_{підл}$ – тепловий потік, який переходить в підлогу приміщення, Вт; $Q_{стеля}$ – тепловий потік, який переходить в стелю приміщення, Вт; $Q_{с.н}$ – тепловий потік, який переходить в середовище приміщення, Вт.

Для визначення теплового потоку, який переходить в огорожувальні конструкції приміщення, скористуємося емпіричними залежностями І.С. Молчадського, згідно з рекомендаціями роботи [6]. Потік тепла, який переходить в:

– стіни $Q_{ст} = \alpha_{ст} F_{ст} (T_m - T_0) ; \quad (5)$

– підлогу $Q_{підл} = \alpha_{підл} F_{підл} (T_m - T_0) ; \quad (6)$

– стелю $Q_{стеля} = \alpha_{стеля} F_{стеля} (T_m - T_0) , \quad (7)$

де $\alpha_{ст}$, $\alpha_{підл}$, $\alpha_{стеля}$ – середні значення приведених коефіцієнтів тепловіддачі стін, підлоги і стелі, кВт/м²К; $F_{ст}$, $F_{підл}$, $F_{стеля}$ – площі стін, підлоги і стелі відповідно, м²; T_m – середньооб’ємна температура середовища, К; T_0 – початкова температура, К.

Значення приведених коефіцієнтів тепловіддачі можна визначити за емпіричними залежностями

$$\alpha_{ст} = 0,0159G^{0,222} ; \quad (8)$$

$$\alpha_{підл} = 0,0111G ; \quad (9)$$

$$\alpha_{стеля} = \frac{0,0172G^{0,222}}{1 - 0,127G^5 e^{-1,6G}} , \quad (10)$$

де G – пожежне навантаження, кг/м²

$$G = \frac{M}{F_{ст} + F_{підл} + F_{стеля}} ; \quad (11)$$

M – маса горючого матеріалу, яка знаходиться в приміщенні, кг.

Середньооб’ємну температуру середовища приміщення в К визначаємо за залежністю

$$T_m = \frac{Q_{\min} \Psi_n S_{\Pi} \tau}{cM_2} , \quad (12)$$

де τ – тривалість вільного горіння при пожежі, с; c – питома теплоємність, Дж/(кг·К), а її значення наведено в табл. 2; M_2 – маса газу, яка знаходиться в об’ємі приміщення, в якому розглядається пожежа, кг;

$$M_2 = \rho_m V ; \quad (13)$$

ρ_m – середньооб’ємна густина повітря в приміщенні, кг/м³ ($\rho_m = 1,2907 - 0,0041t$, де t – початкова температура в приміщенні, °С) [7]; V – об’єм приміщення, в якому розглядається пожежа, м³.

Тепловий потік, який переходить в середовище приміщення, можна визначити за залежністю

$$Q_{с.н} = Q - (Q_{ст} + Q_{підл} + Q_{стеля}) . \quad (14)$$

Після отримання розрахункових залежностей розглянемо вплив основних чинників на значення балансу сумарної теплової енергії при пожежі в закритому приміщенні та його перехід в огороження і в середовище приміщення. Для цього скористаємося приміщеннями з внутрішнім об’ємом $V = 60 \dots 210$ м³, в яких за даними статистики виникає найбільша кількість пожеж.

Спочатку розглянемо вплив швидкості розповсюдження полум’я пожежі та її форми на значення балансу сумарної теплової енергії з використанням залежності (1).

Значення питомої теплоємності

№ з/п	Назва горючого навантаження	Питома теплоємність c , Дж/кг·К
1	Деревина	2800
2	Меблі, побутові вироби, тканини	2400
3	Обладнання (верстати), мастила, фарба	2000
4	Меблі, папір	2700
5	Меблі, лінолеум ПВХ	2500
6	Книжки, журнали на стелажах	1800
7	Сцена, деревина, завіса	2400
8	Дерево, тканини, фарба	2500
9	Паливно-мастильні матеріали	2100
10	Різні промислові товари	1800
11	Електротехнічні прилади та матеріали	2200
12	Лікарські препарати, етиловий спирт, гліцерин	2400
13	Рис, гречка, борошно	1800
14	Деревина, картон, полістирол (тара)	2300
15	Автомобіль: гума, бензин, штучна шкіра, емаль	2100

Дослідження виконувалися для двох випадків: 1) $v_d = 0,004$ м/с при кутовій формі пожежі 90° , $\psi_n = 0,0061$ кг/м²с, $Q_{\min} = 13800000$ Дж/кг; 2) $v_d = 0,016$ м/с при кутовій формі пожежі 180° , $\psi_n = 0,0061$ кг/м²с, $Q_{\min} = 13800000$ Дж/кг. Результати досліджень зображені на рис. 1. Тривалість вільного горіння досліджувалося в межах $\tau = 300 \dots 1200$ с.

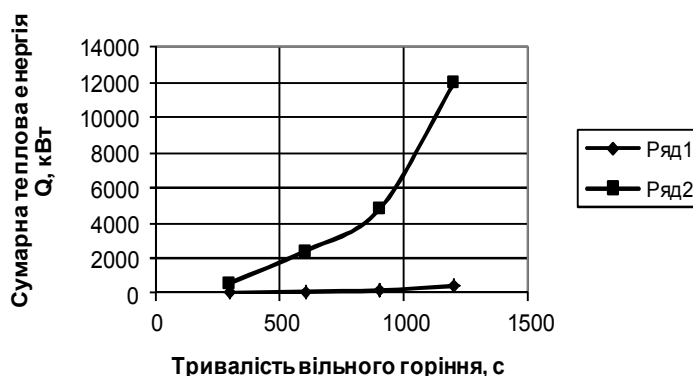


Рисунок 1 – Вплив тривалості вільного горіння τ на сумарну теплову енергію: ряд 1 – $v_d = 0,004$ м/с, форма пожежі кутова 90° ; ряд 2 – $v_d = 0,016$ м/с, форма пожежі кутова 180°

Результати досліджень показали, що на величину сумарної теплової енергії пожежі впливають лінійна швидкість розповсюдження полум'я та форма пожежі. Наприклад, при збільшенні лінійної швидкості розповсюдження полум'я в чотири рази, а площі пожежі в два рази, на сталій фазі пожежі кількість сумарної теплової енергії зростає до 25...27 разів. Особливо таке зростання сумарної теплової енергії має місце при круговій формі пожежі.

Тепер розглянемо вплив швидкості розповсюдження полум'я пожежі та її форми на величину теплового потоку, який переходить в огорожувальні конструкції приміщення. При цьому для розгляду величин теплового потоку за основу приймемо середнє значення об'єму приміщення, а саме $V = 135$ м³ з розмірами: ширина 5 м; довжина 9 м; висота 3 м. Огороджувальні конструкції приміщення виконані із цегли і бетону. Дослідження виконуємо для двох випадків: 1) $v_d = 0,004$ м/с при кутовій формі пожежі 90° , $\psi_n = 0,0061$ кг/м²с, $Q_{\min} = 13800000$ Дж/кг, $\tau = 900$ с, $S_{II} = 2,26$ м², $G = 0,8$ кг/м², $c = 2400$ Дж/кг·К; 2) $v_d = 0,016$ м/с при кутовій формі пожежі 180° , $\psi_n = 0,0061$ кг/м²с, $Q_{\min} = 13800000$ Дж/кг, $\tau = 300$ с, $S_{II} = 7,92$ м², $G = 5,9$ кг/м², $c = 2400$ Дж/кг·К.

Визначаємо площі стін, підлоги і стелі для досліджуваного приміщення: $F_{cm} = 84 \text{ м}^2$; $F_{нідл} = F_{стеля} = 45 \text{ м}^2$. Для кожного з двох прийнятих досліджуваних випадків визначаємо середньооб'ємну температуру середовища приміщення за залежністю (12). При цьому спочатку визначаємо масу газу, яка знаходиться в об'ємі приміщення за залежністю (13)

$$M_g = \rho_m V = 1,2087 \cdot 135 = 163,17 \text{ кг}$$

Тоді середньооб'ємна температура середовища приміщення буде для кожного з двох досліджуваних випадків

$$T_{m1} = \frac{Q_{\min} \psi_n S_{II} \tau}{c M_g} = \frac{13800000 \cdot 0,0061 \cdot 2,26 \cdot 900}{2400 \cdot 163,17} = 438 \text{ К};$$

$$T_{m2} = \frac{Q_{\min} \psi_n S_{II} \tau}{c M_g} = \frac{13800000 \cdot 0,0061 \cdot 7,92 \cdot 300}{2400 \cdot 163,17} = 511 \text{ К}.$$

Визначаємо значення приведених коефіцієнтів тепловіддачі для кожного з двох досліджуваних випадків за залежностями (8) – (10):

1) при $G = 0,8 \text{ кг/м}^2$

$$\alpha_{cm1} = 0,0159 G^{0,222} = 0,0159 \cdot 0,8^{0,222} = 0,0151 \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

$$\alpha_{нідл1} = 0,0111 G = 0,0111 \cdot 0,8 = 0,00888 \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

$$\alpha_{стеля1} = \frac{0,0172 G^{0,222}}{1 - 0,127 G^5 e^{-1,6G}} = \frac{0,0172 \cdot 0,8^{0,222}}{1 - 0,127 \cdot 0,8^5 \cdot 2,718^{-1,6 \cdot 0,8}} = 0,0166 \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

2) при $G = 5,9 \text{ кг/м}^2$

$$\alpha_{cm2} = 0,0236 \text{ Вт/м}^2\text{К}; \alpha_{нідл2} = 0,0655 \text{ Вт/м}^2\text{К}; \alpha_{стеля2} = 0,354 \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Після цього переходимо до визначення теплового потоку, який переходить в огорожувальні конструкції приміщення за залежностями (5) – (7) для кожного з двох досліджуваних випадків:

1) при $T_0 = 293 \text{ К}; T_m = 438 \text{ К}$

$$Q_{cm1} = \alpha_{cm1} F_{cm} (T_m - T_0) = 0,0151 \cdot 84(438 - 293) = 184 \text{ Вт};$$

$$Q_{нідл1} = \alpha_{нідл1} F_{нідл} (T_m - T_0) = 0,00888 \cdot 45(438 - 293) = 57 \text{ Вт};$$

$$Q_{стеля1} = \alpha_{стеля1} F_{стеля} (T_m - T_0) = 0,0166 \cdot 45(438 - 293) = 108 \text{ Вт};$$

2) при $T_0 = 293 \text{ К}; T_m = 511 \text{ К}$

$$Q_{cm2} = 432 \text{ Вт}; Q_{нідл2} = 642 \text{ Вт}; Q_{стеля2} = 3472 \text{ Вт}.$$

Визначаємо сумарну величину теплового потоку, яка перейшла в огорожувальні конструкції приміщення $Q_{o,k}$ для кожного з двох досліджуваних випадків:

$$Q_{o,k1} = Q_{cm1} + Q_{нідл1} + Q_{стеля1} = 184 + 57 + 108 = 349 \text{ Вт};$$

$$Q_{o,k2} = Q_{cm2} + Q_{нідл2} + Q_{стеля2} = 432 + 642 + 3472 = 4546 \text{ Вт}.$$

На третьому етапі для кожного з двох досліджуваних випадків за заданими умовами визначаємо долю поглинання тепла конструкціями приміщення, тобто визначаємо значення коефіцієнта φ :

$$- \text{ для першого випадку } \varphi_1 = \frac{Q_{o,k1}}{Q_1} = \frac{349}{171000} = 0,002 ;$$

$$- \text{ для другого випадку } \varphi_2 = \frac{Q_{o,k2}}{Q_2} = \frac{4546}{600000} = 0,008 ,$$

де Q_1, Q_2 – тепла енергія, яка виділяється в зоні полум'я пожежі відповідно для кожного з двох досліджувальних випадків.

Багаточисельні розрахунки та отримані результати при розгляді початкової і сталої стадій пожежі дали змогу отримати залежність коефіцієнта φ від тривалості вільного горіння на всіх стадіях її розвитку (рис. 2).



Рисунок 2 – Вплив тривалості вільного горіння при пожежі на значення коефіцієнта ϕ , який враховує частку теплового потоку, що переходить в огороджуючі конструкції

Математична обробка отриманих результатів $\phi = f(\tau)$ дала змогу отримати емпіричну залежність для визначення значень коефіцієнта ϕ від тривалості вільного горіння τ

$$\phi = 0,2762 \ln(\tau) - 0,4029, \quad (15)$$

де τ – тривалість вільного горіння, хв.

Результати досліджень показали, що коефіцієнт теплопоглинання ϕ не є сталою величиною, а змінює свої значення в процесі пожежі і може досягати максимального значення до 0,5.

Висновки

1. Розроблена методологія визначення сумарної величини теплової енергії, яка виділяється при пожежі в закритому приміщенні. Визначення величини теплової енергії дає змогу оцінити величину теплового потоку, яка переходить в огороджуючі конструкції на всіх стадіях розвитку пожежі.

2. Результати досліджень дали можливість отримати залежність для визначення коефіцієнта теплопоглинання залежно від тривалості вільного горіння. Встановлено, що коефіцієнт теплопоглинання ϕ не є сталою величиною, а змінює свої значення в процесі пожежі і досягає максимального значення не більше 0,5.

3. При збільшенні об'єму закритого приміщення більша кількість теплової енергії переходить в навколишнє середовище, що зменшує теплове навантаження на огороджуючі конструкції. Наприклад, встановлено, що при об'ємі приміщення $V = 62206 \text{ м}^3$ (механічний цех: ширина – 72 м; довжина – 144 м; висота – 6 м) у порівнянні з об'ємом приміщення $V = 210 \text{ м}^3$ в огороджуючі конструкції переходить не більше 25% теплової енергії за час тривалості пожежі до 30 хв.

Список літератури:

1. Кошмаров Ю.А. Термодинамика пожаров в помещении. / Ю.А. Кошмаров. – М.: Стройиздат, 1988. – 121 с.
2. Расчет необходимого времени эвакуации людей из помещения при пожаре. / Методические рекомендации. – М.: ВНИИПО, МВД СССР, 1989. – 163 с.
3. Пузач С.В. Методы расчета теплообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

5. Chao Zhang and Asif Usman Heat Transfer Principles in Thermal Calculation of Structures in Fire. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4714802/>.

6. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. / Ю. А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

7. Густина повітря при різних температурах і тисках. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/5199305/page:7/>.

References:

1. Koshmarov Yu.A. Thermodynamics of fires in the room. / Yu.A. Koshmarov. – Moscow: Stroizdat, 1988. – 121 p.

2. Calculation of the necessary time for evacuation of people from the premises during a fire. / Guidelines. – Moscow: VNIPO, USSR Ministry of Internal Affairs, 1989. – 163 p.

3. Puzach S.V. Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical fire and explosion safety problems. / S.V. Puzach. – М.: Academy of State Fire Service of the Ministry of Extraordinary Situations of Russia, 2005. – 336 p.

4. Kutateladze S.S. Fundamentals of the theory of heat transfer. / S. S. Kutateladze. – Moscow: Atomizdat, 1979. – 416 p.

5. Chao Zhang and Asif Usman Heat Transfer Principles in Thermal Calculation of Structures in Fire.

6. Koshmarov Yu.A. Forecasting of dangerous fire factors in the room. / Yu.A. Koshmarov. – Moscow: Academy of the State Fire Service of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000. – 118 p.

7. Density of air at various temperatures and pressures.[Electronic resource]. Access mode: <https://studfiles.net/preview/5199305/page:7/>.

