

*Вол. В. Ковалишин, А.Д. Кузик, д-р с.-г. наук, доцент, В.В. Ковалишин, д-р техн. наук, доцент
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ ДЛЯ РІЗНОГО ТИПУ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ ПОЖЕЖНИКІВ

В роботі представлені статистичні дані з травматизму та загибелі пожежників під час виконання службових обов'язків. Розроблена математична модель для визначення теплового потоку на пожежі при горінні макетних вогнищ. Розглянуті різні випадки зміни теплових потоків, під впливом нахилу факела. На цій основі виведено коефіцієнт безпечної роботи, який надалі може використовуватись, при конструюванні індивідуальних приладів оповіщення про досягнення критичних параметрів теплових потоків для захисного одягу того чи іншого типу.

Ключові слова: коефіцієнт безпечної роботи, теплове випромінення, індивідуальний радіометр, захисний одяг пожежника.

Постановка проблеми. Більшість країн світу дбають за безпеку пожежників, які працюють в умовах високих температур або небезпечних факторів пожежі. Розробляються засоби індивідуального захисту пожежників: індивідуальні засоби захисту органів дихання, датчики руху, захисний одяг різних типів. Про необхідність виконання такої роботи в Україні свідчить статистика. Упродовж 2006?2012 років під час виконання завдань за призначенням працівниками пожежно-рятувальних підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту отримано 202 травми, із них 10 – зі смертельними наслідками.

Розподіл кількості травмованих і загиблих працівників пожежно-рятувальних підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту за 2006?2012 роки наведено в табл.1.

Таблиця 1

Кількість травмованих і загиблих працівників пожежно-рятувальних підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту за 2006?2012 роки

Роки	Кількість травмованих працівників	Кількість загиблих працівників
2006	19	0
2007	73	3
2008	20	2
2009	31	0
2010	17	1
2011	13	2
2012	29	2
Всього:	202	10

Причинами загибелі працівників пожежно-рятувальних підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час виконання завдань із гасіння пожеж і рятування людей були:

- падіння покрівлі будинку (2 випадки);
- вибухи (2);
- продавлення автомобілем під час заправки на необлаштованій водоймі (2);
- отруєння чадним газом (2);
- ураження електричним струмом (1);
- перевищення граничнодопустимих концентрацій та різкого теплового навантаження під час гасіння пожеж (1).

Причини травмування працівників пожежно-рятувальних підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту розподілилися так:

- падіння з висоти (38 %);
- термічні ураження (опіки) (29 %);
- отруєння продуктами горіння (8 %);
- травмування внаслідок руйнування конструкцій (7 %);
- вибухи газоповітряних сумішей (5 %);
- ураження електричним струмом (3 %);
- інші (10 %).

Термічні ураження являються одною з основних причин загибелі та травмування пожежних на акціях. Є декілька можливостей боротьби з цим явищем: зміна тактики гасіння, вибір безпечних відстаней гасіння, використання більш досконалого захисного спорядження з приладами контролю температури та теплових потоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботах Драйздела Д., Кошмарова Ю.А., Романенка П.Н., Семерака М.М., Пузача С.В., Кузика А.Д., Лина А.С., та ін. розглядається декілька варіантів визначення теплового випромінювання. Як правило визначення теплового випромінювання моделюється таким, що діє на вертикальну поверхню від джерел, які мають форму прямого конуса з горизонтальною основою, та встановлюється при цьому залежність величини теплового потоку від його геометричних параметрів (висоти), а також відстані від ділянки вертикальної поверхні до джерела, та від виду пального [1-4,6].

Нами було опрацьовано 4 методи для визначення інтенсивності теплового випромінювання [1, 2, 4, 6]. Запропонований А. Лином, А. Кузиком метод визначення інтенсивності теплового випромінювання для випробування захисного одягу пожежників-рятувальників (рис. 1) найбільше збігається з експериментальними результатами.

Підставивши експериментальні дані у вищевказані методи, бачимо, що методи №1, №2 розрахунку теплового випромінювання (рис.1)[2] призводять до заниженої оцінки променевого потоку. Ці методики дають більш точні результати на великих відстанях, більше 5м.

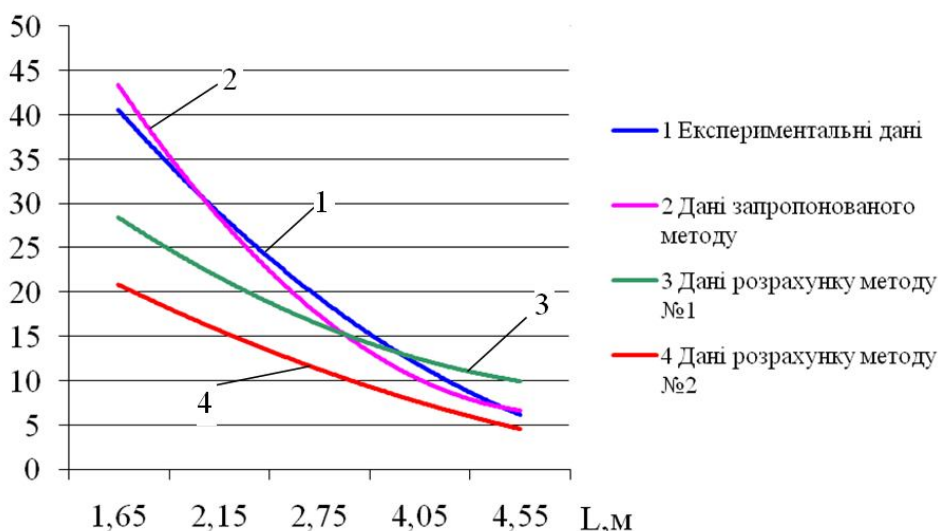


Рис.1. Залежності теплових потоків від відстані до високотемпературного джерела, визначені розрахунковими методами та на підставі експериментальних даних

Проаналізувавши запропонований метод 3 за допомогою якого можна більш точно визначати теплове випромінювання, нам необхідно запропонувати метод визначення теплового потоку від зміни ситуації на пожежі, нахилу полум'я з врахуванням методу 3.

Виклад основного матеріалу. При роботі в тепловідбивному, захисному одязі визначення максимальних теплових потоків відіграє важливу роль, так як пов'язане з безпекою людини. Щоб забезпечити безпеку пожежнику-рятувальнику тепловий потік, на який розрахований захисний одяг пожежника різного типу, повинен мати $q_{к.з.о.}$ більше величини теплового потоку джерела випромінювання (факела) q_{ϕ} та з врахуванням коефіцієнта безпеки β ,

$$q_{к.з.о.} \geq \beta q_{\phi}.$$

В порівнянні з попередніми методами [2,3], які застосовуються для визначення інтенсивності теплового випромінювання, q можна отримати більш точно і більшої величини, коли розглядати полум'я з близьких відстаней, не тільки у формі конуса.

З близької відстані форма полум'я буде наближатись до прямокутника або трапеції.

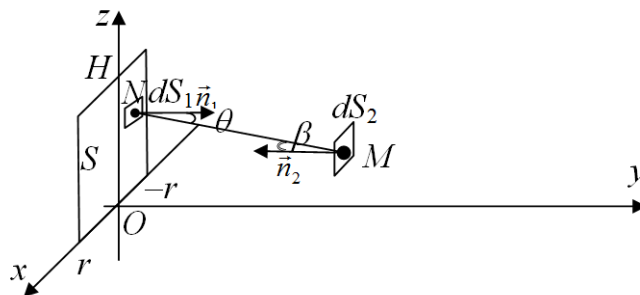


Рис. 2. Випромінювання з вертикальної поверхні на вертикальну елементарну поверхню

Обчислимо інтенсивність теплового потоку з вертикальної поверхні полум'я висотою H , м та шириною $2r$, м на вертикальну елементарну поверхню dS_2 (рис. 2). Елементарна поверхня dS_1 , розташована на поверхні полум'я на висоті z , м, від горизонтальної поверхні, випромінює на dS_2 тепловий потік $d\Phi$, який обчислюється за формулою [5]

$$d\Phi = I_n \cos\theta \cos\beta dS_2 d\omega, \quad (1)$$

де I_n – інтенсивність випромінювання у напрямку нормалі до поверхні з поверхні одиничної площі, θ – кут між нормаллю \vec{n}_1 до поверхні dS_1 , проведеною у точці N , та напрямком випромінювання (відрізок NM), β – кут між цим відрізком та нормаллю \vec{n}_2 до поверхні dS_2 , а $d\omega$ – елементарний тілесний кут, під яким видно поверхню dS_1 з поверхні dS_2 та який обчислюється за формулою

$$d\omega = \frac{dS_1}{R^2}, \quad (2)$$

Величина I_n обчислюється як частка

$$I_n = \frac{E}{\pi}, \quad (3)$$

де E – потужність випромінювання, Вт/м², яка пропорційна четвертому степеню абсолютної температури T , К, і обчислюється з закону Стефана-Больцмана

$$E = \varepsilon\sigma T^4, \quad (4)$$

де ε – відносна випромінювальна здатність (для поверхонь полум'я $\varepsilon=0,95$), $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴) – стала Стефана-Больцмана.

Точка N має координати $(x, 0, z)$, а точка M , відповідно, $(0, y_0, h)$.

Для визначення кута θ використаємо формулу скалярного добутку між векторами $\vec{n}_1 = (0, 1, 0)$ та $\vec{NM} = (-x, y_0, h - z)$. Отримуємо таку формулу

$$\cos \theta = \frac{y_0}{\sqrt{x^2 + y_0^2 + (h-z)^2}}. \quad (5)$$

Кут β визначаємо як кут між векторами $\overrightarrow{MN} = (x, -y_0, z-h)$ та $\vec{n}_2 = (0, -1, 0)$:

$$\cos \beta = \frac{-(-y_0)}{\sqrt{x^2 + y_0^2 + (z-h)^2}} = \cos \theta. \quad (6)$$

Використовуємо формулу довжини відрізка

$$MN = R = \sqrt{x^2 + y_0^2 + (z-h)^2}. \quad (7)$$

Враховавши, що $dS_1 = dx dz$, та проінтегрувавши по поверхні S , отримуємо формулу для визначення щільності теплового потоку, який потрапляє на вертикальну поверхню в точці M з поверхні полум'я:

$$q = \iint_s \frac{\varepsilon \sigma T^4}{\pi} \cdot \frac{y_0^2}{(x^2 + y_0^2 + (z-h)^2)^2} dx dz. \quad (8)$$

Для розрахунків цю формулу запишемо у вигляді

$$q = \int_0^H \int_{-r}^r \frac{\varepsilon \sigma T^4}{\pi} \cdot \frac{y_0^2}{(x^2 + y_0^2 + (z-h)^2)^2} dx dz. \quad (9)$$

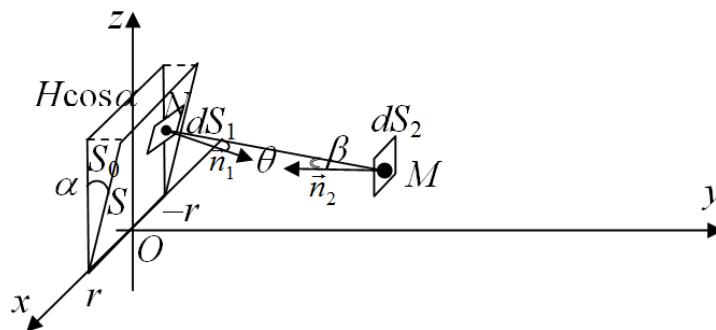


Рис. 3. Випромінювання з поверхні, нахиленої під кутом α до вертикалі, на елементарну вертикальну поверхню

Якщо під дією вітру поверхня полум'я S відхилиться від вертикального положення на кут α (рис.3), точка N буде мати координати (x, y, z) , а точка M , відповідно, $(0, y_0, h)$. Вектор \vec{n}_1 не буде паралельним до горизонтальної поверхні та матиме координати $\vec{n}_1 = (0, \cos \alpha, -\sin \alpha)$, вектор $\overrightarrow{NM} = (-x, y_0 - y, h - z)$. Тоді

$$\cos \theta = \frac{\cos \alpha (y_0 - y) - \sin \alpha (h - z)}{\sqrt{x^2 + (y_0 - y)^2 + (h - z)^2}}. \quad (10)$$

Кут β між векторами $\overrightarrow{MN} = (x, y - y_0, z - h)$ та $\vec{n}_2 = (0, -1, 0)$ визначаємо з формули

$$\cos \beta = \frac{-(y - y_0)}{\sqrt{x^2 + (y - y_0)^2 + (z - h)^2}} = \frac{y_0 - y}{\sqrt{x^2 + (y - y_0)^2 + (z - h)^2}}. \quad (11)$$

Довжина відрізка MN у цьому випадку визначається за формулою

$$MN = R = \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2 + (z - h)^2}. \quad (12)$$

Рівняння поверхні S має вигляд

$$y \cos \alpha - z \sin \alpha = 0, \quad (13)$$

або

$$y = z \operatorname{tg} \alpha. \quad (14)$$

Проінтегрувавши по вертикальній поверхні S_0 , у яку проектується S , враховуючи, що $dx dy = dS_1 \cos \alpha$, отримуємо формулу

$$q = \iint_{S_0} \frac{\varepsilon \sigma T^4}{\pi} \cdot \frac{(y_0 - y)(\cos \alpha (y_0 - y) - \sin \alpha (h - z))}{(x^2 + (y - y_0)^2 + (z - h)^2)^2} \cdot \frac{dx dz}{\cos \alpha}. \quad (15)$$

Цю формулу запишемо у вигляді

$$q = \int_0^{H \cos \alpha} \int_{-r}^r \frac{\varepsilon \sigma T^4}{\pi} \cdot \frac{(y_0 - y)(\cos \alpha (y_0 - y) - \sin \alpha (h - z))}{(x^2 + (y - y_0)^2 + (z - h)^2)^2} \cdot \frac{dx dz}{\cos \alpha}. \quad (16)$$

З урахуванням (14) формула (16) набуває вигляду

$$q = \int_0^{H \cos \alpha} \int_{-r}^r \frac{\varepsilon \sigma T^4}{\pi} \cdot \frac{(y_0 - z \operatorname{tg} \alpha)(\cos \alpha (y_0 - z \operatorname{tg} \alpha) - \sin \alpha (h - z))}{(x^2 + (z \operatorname{tg} \alpha - y_0)^2 + (z - h)^2)^2} \cdot \frac{dx dz}{\cos \alpha}. \quad (17)$$

Зауважимо, що формула (9) є частковим випадком формули (16) при $\alpha=0$.

З формули (16) отримано залежності інтенсивності теплового потоку, який потрапляє з поверхні полум'я висотою $H=3$ м на вертикальну поверхню, розташовану на висоті $h=1,5$ м від горизонтальної поверхні, від відстані до основи поверхні полум'я (рис. 3). Розглядаємо випадок, який зустрічається в практичній роботі пожежників. Персональний сигналізатор небезпечного рівня густини теплового потоку (СТП-02) розміщується на рівні і в місці знаходження вразливих точок на тілі людини, а це: чоло, грудина, живіт, поперек, спина, передпліччя, плече, стегно, гомілка, стопа, кисть. В даному випадку це грудина у місці розташування серця, 1,5 метра від рівня землі. Джерелом випромінювання є, як і в попередньому випадку, прямокутне деко з відповідною площею горіння і висотою полум'я $H=3$ м.

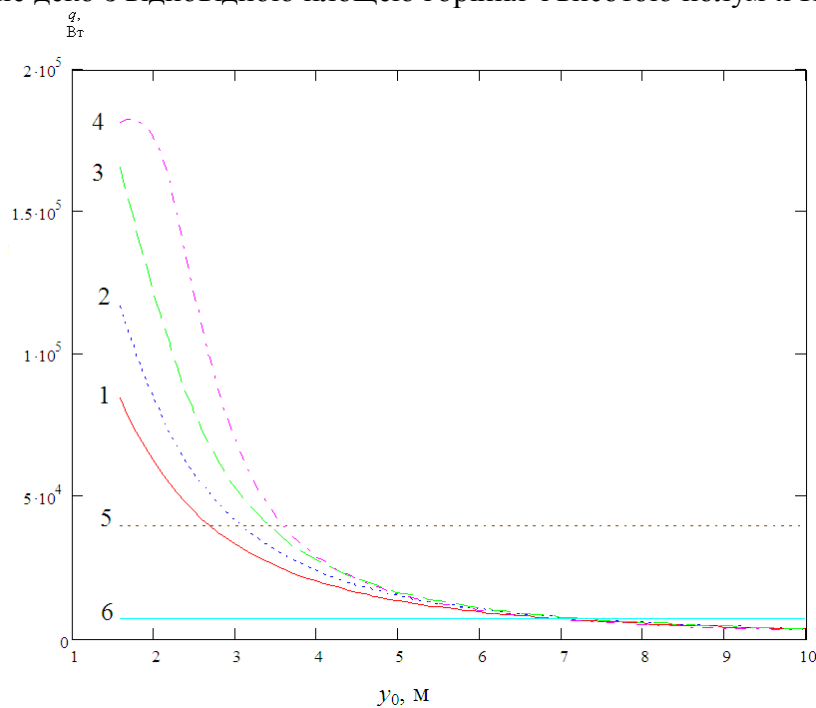


Рис. 4. Залежність інтенсивності теплового потоку від відстані до основи полум'я висотою 3 м і шириною 1,5 м, вертикального (крива 1) і нахилоного від вертикалі на кут 15° (крива 2), 30° (крива 3) і 45° (крива 4).

Горизонтальна пряма 5 побудована на рівні 40 кВт/м^2 , а 6 – на рівні 7 кВт/м^2

З рис. 4 ми бачимо, що при $q=40 \text{ кВт/м}^2$ (теплове опромінення, яке витримує тепловідибний костюм протягом певного проміжку часу) і збільшенні кута нахилу полум'я безпечна відстань $y_0 (L)$ збільшується. Якщо це перевести на випадки практичної роботи пожежни-

ків то така ситуація може трапитись в будь-яку хвилину на пожежі при зміні швидкості повітряних потоків, наприклад зміна швидкості і напрямку вітру. А це свідчить про те, що повинні бути прилади, які забезпечать безпечну роботу в захисному одязі та попереджатимуть завчасно про досягнення безпечної відстані з певним коефіцієнтом безпеки. Наприклад при вертикальному полум'ї $q_{к.з.о} = q_{к.} = 40 \text{ кВт/м}^2$ буде досягнуто на відстані $L_1 = 2,75 \text{ м}$, а при нахиленому полум'ї на 30° $q_{кр.} = 40 \text{ кВт/м}^2$ на відстані $L_3 = 3,45 \text{ м}$. В такому випадку коефіцієнт безпеки повинен становити $\beta = (L_3 - L_1) / L_3 + 1 = 1,2$.

Висновки.

1. Отримано залежність інтенсивності теплового потоку, який потрапляє з поверхні полум'я висотою H на вертикальну поверхню, розташовану на висоті h від горизонтальної поверхні, від відстані до основи поверхні полум'я.

2. В деяких випадках при гасінні пожеж, факел (полум'я) під дією повітряних потоків може нахилитись, що раптово може збільшити величину теплового потоку, який діє на опромінену поверхню.

3. Для забезпечення нормальних параметрів роботи для захисних костюмів введено поняття – коефіцієнт безпеки β . Коефіцієнт β повинен становити не менше 1,2 і його треба використовувати при конструюванні індивідуальних приладів вимірювання теплового потоку, які в свою чергу забезпечать не перевищення $q_{к.з.о}$.

Список літератури:

1. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. Бомштейна К. Г.; Под ред. Кошмарова Ю. А. – М. : Стройиздат, 1990. – 424 с.

2. Мичко А. А. Математичне моделювання теплового випромінювання для випробування захисного одягу пожежників-рятувальників / А. А. Мичко, А. Д. Кузык, А. С. Лин // Пожежна безпека. – 2009. – №14. – С. 171-176.

3. Романенко П. Н. Теплопередача в пожарном деле / П. Н. Романенко, Н.Ф. Бубырь, М.П. Башкирцев. – М : Высшая школа МВД СССР, 1969. – 425 с.

4. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : ГОСТ. Р. 12.3.047:98. – [Введен 2000-01-01]. – Госстандарт РФ, 2000. – 12 с.

5. Р. Зигель, Дж. Хауэлл. Теплообмен излучением / Пер. с англ. Под редакцией Хрусталева Б. А. - М: Мир, 1975.– 934с.

6. Математичне моделювання та дослідження величини теплового потоку факела пожежі / М. М. Семерак, А. М. Домінік, М. І. Мигаленко, Д. В. Руденко // Вісник ЛДУ БЖД. – 2013. – №7. – С. 210-217.

Вол. В. Ковальшин, А. Д. Кузык, В. В. Ковальшин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНОГО

В работе представлены статистические данные по травматизму и гибели пожарных при исполнении служебных обязанностей. Разработана математическая модель для определения теплового потока на пожаре при горении макетных очагов. Рассмотрены различные случаи изменения тепловых потоков под влиянием воздушных потоков. С учетом этого введен коэффициент безопасной работы, который может использоваться при конструировании индивидуальных приборов оповещения о достижении критических параметров тепловых потоков для защитной одежды различного типа.

Ключевые слова: коэффициент безопасной работы, тепловое излучение, индивидуальный радиометр, защитная одежда пожарного.

SAFE OPERATION COEFFICIENT DETERMINING FOR DIFFERENT TYPES OF FIREFIGHTERS' PROTECTIVE CLOTHING

The paper presents statistics on injuries and deaths of firefighters on duty. A mathematical model for determining the heat transfer rate on the different types of model fires is developed. Various cases of changes in heat transfer rate under the influence of air currents are regarded. Safe operation coefficient is calculated. It can be used during creating and introducing individual devices for informing firefighters about reaching the critical parameters of the heat transfer rate.

Key words: safe operation coefficient, thermal radiation, individual radiometer, firefighters' protective clothing.

