УДК 614.842

Ю.В. Луценко, канд. техн. наук, доцент, заступник начальника кафедри, НУЦЗУ
О.В. Миргород, канд. техн. наук, доцент, старший науковий співробітник, доцент кафедри, НУЦЗУ

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ НА ОТОЧУЮЧІ ОБ'ЄКТИ

(представлено д-ром техн. наук)

Теоретично досліджено параметри пожежі та їх вплив на оточуючі об'єкти. Встановлені аналітичні залежності площі горіння від основних параметрів розвитку пожежі в різних умовах; залежності випромінювання осередку пожежі від оптичних властивостей середовища і розмірів випромінюючого об'єму для елементарної поверхні оболонки та повного фізичного випромінювання при різних просторовій орієнтації факелу і віддаленості оточуючих предметів.

Ключові слова: параметри пожежі, площа горіння, випромінювання осередку пожежі, спеціальний захисний одяг.

Постановка проблеми. Запобігти поширенню пожеж можливо було б при їх локалізації і ліквідації на початковій стадії розвитку (до 3 хвилин), що на практиці майже неможливо. Локалізація і гасіння пожеж, як правило, проводяться по прибутті підрозділів на місце їх виникнення. Наразі існує проблема розробки різних видів надійного захисного спецодягу, що дозволить пожежним максимально наблизитися до осередку пожежі і знаходитися там протягом тривалого часу без реальної загрози їх життю і здоров'ю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження впливу теплового випромінювання полум'я на оточуючі поверхні виконано шляхом детального аналізу процесів теплообміну [1, 2].

При вивченні питань створення ефективного термозахисного одягу встановлено, що існуючі види спеціального захисного одягу (СЗО) не повною мірою забезпечують необхідний захист, а в окремих випадках створюють додаткові фактори небезпеки [2-4].

Постановка завдання та його вирішення. Для забезпечення високої точності прогнозування температурних умов в районі осередку пожежі доцільно провести математичне моделювання результатів впливу його теплової енергії на об'єкти, розташовані неподалік, та комплекти захисного спецодягу пожежних.

В загальному вигляді динаміка пожеж виглядає наступним чином [5, 6]: розповсюдження полум'я по поверхні горючого матеріалу (приблизно 1-3 хв); підвищення температури

навколишнього середовища; нарощування параметрів пожежі (збільшення зони горіння, інтенсифікація конвективного теплового і променевого потоків); об'ємне поширення пожежі (максимізація параметрів пожежі); стабілізація параметрів пожежі (наступає на 20-25 хв); зниження інтенсивності пожежі у випадку вигоряння основної частини пожежного завантаження; догоряння (повільне тління) і припинення пожежі. Тривалість кожної із фаз залежить від багатьох факторів і, в першу чергу, від виду пожежі.

Загальновідомо, що гасіння пожежі активним способом неможливе без присутності людей в безпосередній близькості від його осередку. Зона теплового впливу при пожежах визначається в більшості випадках променевим тепловим потоком. Тип пожежі є визначаючим для встановлення частки тепла променевого потоку від загальної кількості теплової енергії, яка впливає на пожежного, одягнутого в комплект захисного спецодягу.

Теоретичні основи розрахунку променевого потоку, що впливає на термозахисний комплект є узагальненими, однак, для кожного конкретного випадку існують окремі параметри з урахуванням інтенсивності разгоряння і динаміки горіння (залежно від природи горючих матеріалів).

Виходячи із часу прибуття перших відділень належним чином екіпірованих пожежних, в першу чергу необхідно визначити зону (площу) горіння (або її довжину) з урахуванням інтенсивності розгоряння і динаміки розвитку пожежі.

При наземних пожежах, залежність площі від основних параметрів розвитку [5], буде мати вигляд:

$$S_n = k \cdot (\vartheta_p \cdot \tau)^n, \qquad (1)$$

де k і n - параметри, які залежать від геометричної форми площі пожежі; ϑ_p, τ -відповідно лінійна швидкість розповсюдження пожежі і час його вільного розвитку.

Швидкість розвитку пожежі і її параметри в різні проміжки часу залежать від цілого ряду факторів і умов виникнення і протікання процесу горіння. Це наявність горючого матеріалу з його властивостями, швидкість повітря в оточуючому просторі, потужність джерела первинного загоряння, та ін.

Дослідження променевого теплоперенесення зводяться до наступного. Різні тіла при одній і тій же температурі мають різну променеву здатність, яка залежить від природи тіл, їх будови, форми і стану граничної поверхні тіла. При випромінюванні теплота тіла перетворюється в енергію електромагнітних коливань, а при

поглинанні енергії електромагнітних коливань частково або повністю знову перетворюється в теплоту.

Носіями енергії теплового випромінювання є електромагнітні хвилі, що виявляються в закономірностях його розповсюдження. Подібно видимому світлу вони можуть поглинатися, пропускатися або відбиватися поверхнею тіла і відкидати тіні при блокуванні непрозорих об'єктів.

Крім хвильового характеру, носії енергії випромінювання можна розглядати також як фотони, що рухаються і мають масу та імпульс (енергію).

Відповідно до закону Стефана-Больцмана, сумарна потужність теплового випромінювання, Вт/м^2, дорівнює [7, 8]:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \qquad (2)$$

де ε – степінь чорноти тіла (для абсолютно чорного тіла ε=1); σ – постійна Стефана-Больцмана, σ=5,67·10^{-8} Вт/м^2; (коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла); T – абсолютна температура тіла, К.

Врахування геометричного зв'язку між випромінюючим тілом і тілом, яке сприймає випромінювання проводиться за допомогою коефіцієнта опромінювання.

Практично всі рідини і тверді матеріали горять дифузійним полум'ям, яке світиться. В середині такого полум'я (факелу) утворюються мікроскопічні вуглецеві частки порядку 10…100 мкм, за рахунок яких спостерігається жовте світіння. Вони можуть або зникати, по мірі проходження зони окислення полум'я, або реагувати і взаємодіяти далі, утворюючи дим. Загальна випромінююча здатність полум'я залежить від концентрації цих часток і середньої довжини променя полум'я.

Напівсферичний променевий потік, що характеризує потужність випромінювача і рівний повній кількості енергії, яка випромінюється елементом поверхні dF, м^2, в півпростір за одиницю часу, Q, Вт, враховуючи його нерівномірну щільність, - розглядають в диференційному вигляді $dQ=E\cdot dF$, Вт (E – поверхнева щільність потоку випромінювання).

Інтенсивність енергії випромінювання $I = \frac{dE}{d\lambda} = \frac{d^2Q}{d\lambda \cdot dF}$, або інтенсивність випромінювання за напрямком - кількість енергії, що випромінюється в визначеному напрямку одиничною площадкою, яка розташована перпендикулярно напрямку випромінювання, в одиниці тілесного кута в одиницю часу.

Напівсферичний променевий потік dQ пов'язаний з елементарним dq співвідношенням $dQ = \int_{(2\pi)} dq$, тобто для елементарної площадки dF енергія випромінювання в межах тілесного кута, складе від загального потоку випромінювання поверхні F величину d^2Q. Проекція dF на щільність, перпендикулярну напрямку випромінювання, рівна $dF \cdot cos\ \varphi$, де φ – кут між напрямком випромінювання і нормаллю до площадки dF. Тоді:

$$I = \frac{\partial^2 Q}{\partial F \cdot \cos\varphi \cdot \partial\lambda} \quad , \tag{3}$$

якщо за всіма напрямками $I=const$, $(Вт/(м^2 стер)$, то таке випромінювання називають дифузійним. При цьому величина питомого потоку випромінювання:

$$E = \int_{(2\pi)} \frac{d^2 Q}{dF} = I \int_{(2\pi)} \cos\varphi \cdot d\omega = \pi \cdot I \ , \tag{4}$$

Це поверхні випромінювання, які підкоряються закону Ламберта. Закон Ламберта характеризує променевий теплообмін між твердими тілами в непоглинаючому середовищі.

В оптично непрозорому середовищі відносна зміна інтенсивності променя при проходженні крізь елементарний шар товщиною dx, м, відповідно закону Бугера [9] пропорційна довжині променя в цьому шарі. Поглинальна здатність α шару, товщиною L, м, для однорідного середовища рівна:

$$\alpha = 1 - e^{-K \cdot L} \ , \tag{5}$$

де κ – коефіцієнт послаблення променя, $м^{-1}$.

У зв'язку з суттєвою неоднорідністю об'ємної структури осередку пожежі (факелу), різними орієнтацією і віддаленістю оточуючих предметів від поверхонь (корпусів машин і механізмів, матеріалів одягу і відкритих ділянок тіла людини), променевий тепловий потік розподіляється на них нерівномірно. При цьому очевидна наявність максимальних і мінімальних значень в кожному із координатних напрямків простору для кожної елементарної площадки поверхні, що опромінюється.

Приймаємо, що $dV\ (x,y,z)$, $м^3$ – елементарний об'єм поглинаючого і розсіюючого середовища в області факелу, його температура T, К і характерний розмір l, м. Розглянемо променевий

теплообмін між об'ємом середовища *dV* і оточуючою її сферичною оболонкою. Вважаємо оболонку абсолютно чорною. Оскільки всередині оболонки знаходиться поглинаюче (недіатермічне) середовище, то відбувається теплообмін як між елементами оболонки, так і з елементами поглинаючого середовища. Частина енергії, що випромінюється елементом поверхні оболонки, буде поглинатися недіатермічним середовищем і одночасно з цим таку ж частку енергії середовища буде випромінювати на оболонку.

Поглинання і випромінювання енергії в об'ємі середовища буде проходити лише в тих областях спектра, в яких дане середовище володіє смугами поглинання. У всіх інших частинах спектра середовище є прозорим і випромінювання чорної оболонки проходить крізь нього без будь-якого послаблення.

Відповідно до закону Кірхгофа [10], сферичне випромінювання об'єкта, який розглядається, в даній області спектра дорівнює кількості енергії, яку поглинає цей об'єм від випромінювання оточуючої оболонки в цій же області спектра. Таким чином, замість безпосереднього розрахунку випромінювання об'єму *dV*, достатньо визначити частку енергії, яка поглинається від випромінювання оточуючої оболонки.

Визначимо випромінювання *dQ* елементарного кільцевого пояса dF_2 сферичної оболонки на елемент поверхні dF_1 через кульовий поглинаючий шар.

Спочатку вважаємо середовище непоглинаючим. Тоді відповідно закону Ламберта:

$$dQ = E_0 \cdot \frac{\cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2}{\pi \cdot r^2} \cdot dF_1 dF_2, \qquad (6)$$

де E_0 – енергія повного напівсферичного випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі Т.

Площа елементарного кільцевого поясу:

$$dF_2 = 2 \cdot \pi \cdot \rho \frac{r \cdot d\varphi}{\cos\varphi_2}, \qquad (7)$$

де $\rho = r \cdot \sin\varphi$.

Для сфери $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, тоді $dQ = 2E_0 \cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi \cdot dF_1$.

Оскільки середовище поглинаюче, то для області спектру, в якій воно володіє смугами поглинання:

$$dQ = 2E_0 \cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi \cdot dF_1 \qquad (8)$$

де E_0 – енергія напівсферичного випромінювання абсолютно чорного тіла в заданій області спектру.

Вважаємо *к*- спектральним коефіцієнтом послаблення променів в середовищі, що розглядається. Відповідно до закону Бугера [7], енергія, яка поглинається середовищем з випромінювання елементарної поверхні оболонки dF_2 дорівнює:

$$d(dq_{погл}) = (1 - e^{-\kappa \cdot r}) \cdot dQ = 2E(1 - e^{-k \cdot r}) \cos\varphi \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi \cdot dF_1 \qquad (9)$$

Оскільки $(\kappa \cdot r)$ дуже мале, можемо знехтувати членами другого і більш високого порядку малості після розкладання експоненціальної функції в ряд:

$$d(dq_{погл}) \approx 2E \cdot k \cdot l \cos^2\varphi \cdot d\varphi \cdot dF_1, \qquad (10)$$

де враховано, що $r = l \cdot \cos\varphi$.

Для визначення енергії, що поглинається середовищем із випромінювання, яке надсилається сферичною оболонкою на елемент dF_1, інтегруємо останній вираз за φ від 0 до $\pi/2$, тоді:

$$dq_{погл} = -2E \cdot k \cdot l \cdot dF_1 \int_0^{\pi/2} \cos^2\varphi \cdot d(\cos\varphi) = \frac{2}{3} E \cdot k \cdot l \cdot dF_1 \qquad (11)$$

Така ж кількість енергії, відповідно закону Кірхгофа, у вказаній області спектру буде випромінювати сам сферичний поглинаючий об'єм на елемент поверхні dF_1. В результаті повне сферичне випромінювання сферичного об'єму, який розглядається, поглинаючого середовища в заданому інтервалі довжин хвиль:

$$dq = \frac{2}{3} E \cdot k \cdot l. \qquad (12)$$

Враховуючи, що за законом Стефана-Больцмана $E = \sigma \cdot T^4$, отримаємо:

$$dq = \frac{2}{3} \sigma \cdot T^4 \cdot k \cdot l \cdot dF_1, \qquad (13)$$

Величина $\varepsilon = \kappa \cdot l$ являє собою оптичну щільність поглинаючого середовища, або поглинаючу здатність (ступінь чорноти) сірого тіла.

За фізичним змістом $\kappa \cdot l < 1$, тому процес випромінювання залежить від оптичних властивостей газу і розмірів об'єму, що випромінює *l*.

Повне фізичне випромінювання об'єму dV отримаємо, інтегруючи (3.43) по поверхні оболонки dV (площа сфери $S=\pi \cdot l^2$):

$$q = \frac{2}{3}\sigma \cdot T^4 \cdot k \cdot l \cdot \pi \cdot l^2 = k \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \frac{\pi \cdot l^3}{6} \qquad (14)$$

Величина $\frac{\pi \cdot l^3}{6}$ являє собою об'єм елементарної сферичної оболонки dv, в результаті отримаємо:

$$\delta q = k \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot d\mathrm{v} \qquad (15)$$

Позначимо: A – відстань від елементарного об'єму dv до довільно орієнтованої площадки з нормаллю $\bar{n}$, α - кут між напрямком нормалі і прямої, яка з'єднує центри сфери, що випромінює і поглинаючої площадки. Тоді відношення інтенсивностей теплових потоків крізь сферу dV і сферу радіусом A буде обернено пропорційне відношенню площин сфер, радіусом $l/2$ і A, тобто інтенсивність теплового потоку крізь сферу радіусом А з врахуванням закону Ламберта дорівнює:

$$\delta q = \frac{1}{\pi \cdot A^2} \cdot k \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \cos\alpha = k_0 \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot d\mathrm{v} \qquad (16)$$

де величина:

$$k_0 = \frac{k \cdot \cos\alpha}{\pi \cdot A^2}, \qquad (17)$$

називається коефіцієнтом опромінювання. Саме цим коефіцієнтом можна врахувати розташування об'єктів в просторі по відношенню до поверхні, яка випромінює. Вираз (16) дозволяє за відомим законом просторового розподілу температури і коефіцієнтів послаблення в факелі полум'я розрахувати щільності падаючих променевих потоків крізь поверхні різної просторової орієнтації.

Результати моделювання свідчать, що максимальна щільність падаючих на об'єкт променевих потоків q, Вт/м^2, від локального осередку пожежі на стадії їх розвитку (а саме такі пожежі гасяться активним способом) підкоряється степеневій залежності від відстані x до центру дзеркала осередку:

$$q = \gamma \cdot \sigma \cdot T_{еф}^4 \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{\beta}, \qquad (18)$$

де γ і β – емпіричні константи; $T_{еф}$ – ефективне значення температури в осередку, К. Величина $T_{еф}$ пропорційна коефіцієнту послаблення, діаметру D осередку і максимальній температурі в осередку.

Висновки. Теоретично досліджено параметри пожежі та їх вплив на оточуючі об'єкти при ліквідації аварій. Встановлені аналітичні залежності площі горіння від основних параметрів розвитку пожеж в різних умовах.

Отримані аналітичні залежності випромінювання осередку пожежі в залежності від оптичних властивостей середовища і розмірів випромінюючого об'єму для елементарної поверхні оболонки та повного фізичного випромінювання при різних просторовій орієнтації факелу і віддаленості оточуючих предметів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Исследование возможности разработки средств защиты от кратковременного воздействия пламени: Отчет о НИР (окончательный). / НИИГД; № ГР 1929130173. – Донецк, 1992. – 82 с.
2. Колосніченко М.В. Теоретичне обґрунтування впливу променевого теплового потока на об'єкти при ліквідації аварії / М.В. Колосніченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. - № 1. – С. 7-10.
3. Луценко Ю.В. Визначення гранично-припустимих показників теплового стану людини при роботі в термозахисному спеціальному одязі / Ю.В. Луценко, С.О. Тюпін // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – вип. 40. - С. 142-146. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1793.
4. Луценко Ю.В. Визначення параметрів системи охолодження в захисному спеціальному одязі рятівника / Ю.В. Луценко, Т.М. Курська // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУЦЗУ, 2017. – вип. 41. - С. 108-111. http: // repositsc. Nuczu .edu. ua/handle/ 123456789/1801.
5. Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. С. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. - М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1980. – 255 с.
6. Кимстач И.Ф., Девлишев П.П., Евтюшкин Н.М. Пожарная тактика. - М.: Стройиздат, 1984. – 591 с.
7. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 331 с.
8. Лансберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976. – 926 с.
9. Шорин С.Н. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1964. – 490 с.

10. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

Ю.В.Луценко, О.В. Миргород

Теоретические исследования влияния очага пожара на окружающие объекты.

Теоретически исследовано параметры пожара и их влияние на окружающие объекты. Установлены аналитические зависимости площади горения от основных параметров развития пожара в различных условиях; зависимости излучения очага пожара от оптических свойств среды и размеров излучающего объема для элементарной поверхности оболочки и полного физического излучения при различных пространственной ориентации факела и удаленности окружающих предметов.

Ключевые слова: параметры пожара, площадь горения, излучение очага пожара, специальная защитная одежда.

Yu.V.Lutsenko, O.V. Mirgorod

Theoretical studies of the effect of the fire on the surrounding objects.

The fire parameters and their influence on the surrounding objects are theoretically investigated. The analytical dependences of the burning area on the main parameters of fire development under various conditions are established; the dependence of the radiation source of fire on the optical properties of the medium and the size of the radiating volume for the elementary surface of the shell and the total physical radiation for different spatial orientation of the torch and the distance of surrounding objects.

Key words: fire parameters, burning area, radiation from a fire source, special protective clothing.