

*О.В. Лазаренко, В.І. Желяк, канд. техн. наук, доцент
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКРАНУВАННЯ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВОДЯНОЮ ЗАВІСОЮ

В роботі проведено аналіз існуючих аналітичних досліджень стосовно визначення величини захисної дії водяної завіси від теплового випромінювання. Визначено перевагу променевого теплообміну над конвективним під час аналітичного дослідження. Запропоновано свою математичну модель досліджуваного процесу, обґрунтовано відмінність даної моделі від вже відомих, визначено вплив кута розкриття водяної завіси на коефіцієнт екранування, показано, що коефіцієнт екранування водяної завіси прямо пропорційний товщині водяної завіси.

Ключові слова: захисний водяний екран, теплове випромінювання, математична модель, коефіцієнт екранування.

Вступ. Одним з методів захисту людських та матеріальних ресурсів від теплового випромінювання є екранування. При гасінні пожеж, екранування теплового випромінювання додатково дає можливість знаходитись ближче до джерела запалювання та збільшити глибину гасіння пожежі. Крім того, в якості речовини для створення захисного екрана є можливим використання води, якою одночасно проводиться гасіння пожежі. На сьогодні питання ефективності використання захисного водяного екрана (ЗВЕ) від теплового випромінювання не є достатньо дослідженим.

Постановка проблеми. Теплопередача може відбуватись шляхом теплопровідності, конвекції та теплового випромінювання. В [2, 3] показано, що теплопередача від осередку пожежі до навколишнього середовища відбувається переважно внаслідок процесів теплового випромінювання та конвективного теплообміну. Аналіз процесу екранування конвективної та променистої складової теплового потоку вертикальною водяною завісою, утвореною з водяних крапель, проведено в роботах [4, 5].

У випадку конвективного теплообміну отримано вираз для визначення температури повітря за завісою:

$$T_{\Pi \text{ вих}}(h) = T_{B0} + (T_{\Pi \text{ вх}} - T_{B0}) \cdot e^{-\frac{\Delta}{\delta_x \cdot e^{\delta_h}}} \quad (1)$$

де $\delta_x = \frac{C_{\Pi} \rho_{\Pi} \vartheta_{\Pi}}{\pi d^2 n \alpha}$ і $\delta_h = \frac{C_B \rho_B \vartheta_B d}{6 \alpha}$ постійні величини, $T_{\Pi \text{ вих}}(y)$, $T_{\Pi \text{ вх}}$ – температура повітря за

та перед завісою, T_{B0} – початкова температура води на виході з розсіюючої щілини, Δ – товщина завіси, h – відстань від розсіюючої щілини, C_{Π} і ρ_{Π} – питома теплоємність та густина повітря, C_B і ρ_B – питома теплоємність та густина води, ϑ_{Π} і ϑ_B – швидкість потоку повітря від осередку пожежі та води у водяній завісі, d – діаметр крапель води у водяній завісі n – концентрація водяних крапель у водяній завісі, α – коефіцієнт теплообміну між краплинами води та повітрям.

Для характеристики захисної дії екрана від променевого теплообміну в [5] запропоновано використовувати коефіцієнт екранування $\eta = \frac{\Phi_e}{\Phi_0}$, де Φ_e та Φ_0 – енергетичні потоки після захисної завіси та від джерела випромінювання відповідно.

В кінцевому результаті було отримано вирази для визначення коефіцієнта екранування для різних віддалей від екрана до джерела випромінювання (a) та від екрана до об'єкту захисту (b).

При $a = b$, коефіцієнт екранування:

$$\eta = \frac{a^2 \cdot (2a)^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{4a^4} - \frac{1}{4 \cdot (r^2 + a^2)^2} \right) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a^4}{(r^2 + a^2)^2} \right) \quad (2)$$

в загальному випадку $a \neq b$:

$$\eta = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a - b)^2} \cdot \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} - \frac{2r^2 + a^2 + b^2}{\sqrt{(r^2 + a^2) \cdot (r^2 + b^2)}} \right) \quad (3)$$

На жаль в отриманих виразах не враховано фізичні характеристики речовини, яка утворює завісу, наприклад, її теплоємність, що обмежує область їх застосування.

Мета роботи. В даному дослідженні ставиться за мету визначити, яким переважно шляхом відбувається передача тепла при пожежі до об'єктів захисту на відкритій місцевості (шляхом конвекції чи теплового випромінювання) та дослідити як впливають на захисні властивості суцільної радіальної водяної завіси від теплового потоку її товщина та кута нахилу.

Виклад матеріалів дослідження. При конвективному теплообміні, згідно з (1), тепловий потік виникає внаслідок переміщення мас повітря з швидкістю \mathcal{G}_H від осередку пожежі внаслідок різниці густини нагрітого та холодного повітря в гравітаційному полі [1]. При нагріванні повітря осередком пожежі його густина стає меншою ніж при температурі навколишнього середовища внаслідок чого на частинки повітря діє виштовхувальна сила [1]:

$$F_A = g(\rho_n - \rho) = g\rho_n\beta(T - T_n) \quad (4)$$

де g – прискорення вільного падіння, β – коефіцієнт об'ємного розширення повітря, T_n і T – значення температури повітря в осередку пожежі та на деякій віддалі від нього, ρ_n і ρ – густина повітря при температурах T_n і T .

З (4) видно, що у відкритому просторі повітря переміщується лише у вертикальному напрямі і тому теплопередача шляхом конвекції у відкритому середовищі може відбуватися лише у вертикальному від осередку пожежі напрямі. В той же час у всіх інших напрямках тепловий потік, очевидно, поширюється завдяки теплому випромінюванню.

Для нормальної складової теплового Φ випромінювання від ізотропного точкового джерела потужність теплового потоку буде рівною

$$P_0 = \int_S \Phi ds, \quad (5)$$

де S – площа поверхні осередку пожежі.

Причому:

$$\Phi = \int_{\lambda} e(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

де $e(\lambda)$ – спектральна густина теплового випромінювання осередку пожежі, λ – довжина хвилі теплового випромінювання.

При розповсюдженні електромагнітної хвилі у вакуумі потік випромінювання на відстані l від точкового джерела визначається як:

$$\Phi_0 = \frac{P_0}{4 \cdot \pi \cdot l^2} \quad (7)$$

В реальному середовищі з інтегральним коефіцієнтом поглинання K частина енергії електромагнітного випромінювання розсіюється. Величину потоку випромінювання, який пройшов крізь середовище на відстань l від джерела випромінювання можна визначити згідно з законом Бугера-Ламберта-Бера [6]:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-Kl} \quad (8)$$

Величина інтегральної поглинальної здатності K визначається за спектральною поглинальною здатністю k_λ :

$$K = \int_0^\infty k_\lambda d\lambda , \quad (9)$$

З врахуванням (5) вираз (6) набуде виду:

$$\Phi = \frac{P_0}{4 \cdot \pi \cdot l^2} e^{-Kl} \quad (10)$$

Отже, за відсутності водяної завіси величина густини потоку випромінювання залежить від відстані до осередку пожежі l та коефіцієнта поглинання теплового потоку повітрям K_{Π} .

У випадку розміщення на шляху потоку теплового випромінювання водяної завіси відбувається додаткове відбивання теплового потоку на межі повітря–вода та поглинання при проходженні через водяний шар.

Визначимо величину потоку випромінювання за завісою.

При цьому вважатимемо, що через розсіювальну щілину шириною $\delta_{щ}$ та радіусом $r_{щ}$ розсіюється вода з об'ємною витратою Q_0 під кутом ψ до його осі (рис. 1). Представимо водяну завісу в виді еквівалентного ізотропного суцільного середовища заповненого водою.

Згідно з (8), величина теплового потоку, який потрапляє на водяну завісу, визначиться як:

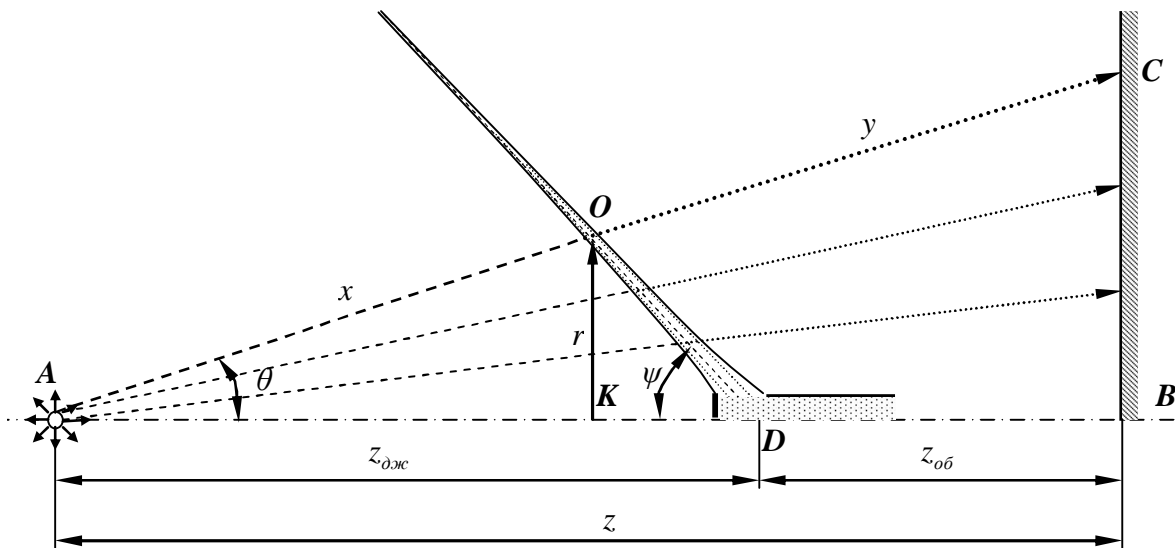


Рис.1. Схема поширення потоку теплового випромінювання: A – осередок пожежі; B – об'єкт захисту; D – розсіювальна щілина ствола, шириною $\delta_{щ}$

$$\Phi_{ex} = \frac{P_0}{4 \cdot \pi \cdot x^2} e^{-K_{\Pi}x} , \quad (11)$$

де x – відстань від осередку пожежі до елемента водяної завіси.

На межі повітря-вода частина теплового потоку відіб'ється від водяної завіси. Тому величина потоку, який пройде крізь межу, визначиться:

$$\Phi^*_{ex} = \Phi_{ex} (1 - V) \quad (12)$$

де V – інтегральна відбиваюча здатність межі вода-повітря, яка залежить від спектральної відбиваючої здатності v_λ :

$$V = \int_0^{\infty} v_{\lambda} d\lambda \quad (13)$$

Проходження теплового випромінювання через водяну завісу супроводжується поглинанням випромінювання відповідно до (10), тому потік теплового випромінювання на виході із завіси визначиться, як:

$$\Phi_{вих}^* = \Phi_{вх}^* e^{-K_B \Delta}, \quad (14)$$

На межі вода-повітря відбувається повторне відбивання випромінювання у відповідності до (12). Тому тепловий потік, що пройде в повітря, визначиться, як:

$$\Phi_{вих} = \Phi_{вих}^* (1 - V). \quad (15)$$

Подальше проходження випромінювання через повітря супроводжується частковим поглинанням енергії теплового випромінювання. Тому величина теплового потоку за завісою визначиться:

$$\Phi_3 = \Phi_{вих} e^{-K_{пl}}. \quad (16)$$

З урахуванням (11, 20, 22, 23) вираз для визначення потоку випромінювання за завісою (16) набуде виду:

$$\Phi_3 = \frac{P_0}{4 \cdot \pi \cdot l^2} e^{-K_{пx}} (1 - V) e^{-K_B \Delta} (1 - V) e^{-K_{пy}} = \frac{P_0 (1 - V)^2}{4 \cdot \pi \cdot l^2} e^{-K_{п(x+y)} - K_B \Delta}, \quad (17)$$

або враховуючи, що: $l = x + \Delta + y$:

$$\Phi_3 = \frac{P_0 (1 - V)^2}{4 \cdot \pi \cdot l^2} e^{-K_{п(l-\Delta)} - K_B \Delta} = \frac{P_0 (1 - V)^2}{4 \cdot \pi \cdot l^2} e^{-K_{пl}} e^{-(K_B - K_{п}) \Delta}. \quad (18)$$

Визначимо коефіцієнт екранування водяної завіси ε як відношення потоку теплового випромінювання за відсутності завіси до потоку випромінювання за наявності завіси (що з фізичної точки зору є більш правильним, ніж як це зроблено в роботі [5] у вигляді $\eta = \frac{\Phi_e}{\Phi_0}$).

Таким чином

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_3} = \frac{\frac{P_0}{4 \cdot \pi \cdot l^2} e^{-K_{пl}}}{\frac{P_0 (1 - V)^2}{4 \cdot \pi \cdot l^2} e^{-K_{пl}} e^{-(K_B - K_{п}) \Delta}} = \frac{1}{(1 - V)^2} e^{(K_B - K_{п}) \Delta}. \quad (19)$$

З (19) видно, що величина коефіцієнта екранування водяної завіси залежить від товщини шару завіси Δ та фізичних характеристик середовища: інтегральної відбивальної здатності межі повітря-вода V , інтегральної поглинальної здатності повітря $K_{п}$ та води K_B , які залежать від спектральної поглинальної здатності k_{λ} для повітря та води. Величина відбивальної здатності залежить від показників заломлення n_{λ} повітря та води.

Визначимо залежність товщини шару водяної завіси Δ від кута θ . Згідно з законом нерозривності потоку для перерізу водяної завіси, можна записати:

$$\delta_{щ} \cdot \sin \psi \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{щ} \cdot v_0 = d \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot v, \quad (20)$$

де $\delta_{щ}$ – ширина розсіювальної щілини, $r_{щ}$ – радіус розсіювальної щілини, v_0 – швидкість витікання води через щілину, d – товщина водяної завіси на відстані r від осі ствола, ψ – кут розкриття водяної завіси, v – швидкість води у водяній завісі.

Звідки визначимо величину еквівалентної товщини завіси:

$$d = \frac{\delta_{щ} \cdot \sin \psi \cdot r_{щ} \cdot v_0}{r \cdot v}. \quad (21)$$

Шлях Δ , який пройде потік теплового випромінювання у водяній завісі визначимо як:

$$\Delta = \frac{d}{\cos(90 - \psi - \theta)} = \frac{\delta_{щ} \cdot \sin \psi \cdot r_{щ}}{\cos(90 - \psi - \theta) \cdot r} \cdot \frac{v_0}{v}. \quad (22)$$

Виразимо величину r через відстань від джерела випромінювання до ствола. Для трикутника ΔAOD можна записати, що $r \cdot ctg \psi + r \cdot ctg \theta = z_{дж}$, звідки:

$$r = \frac{z_{дж}}{ctg \psi + ctg \theta}. \quad (23)$$

Таким чином (13) з урахуванням (14) набуде вигляду:

$$\Delta = \frac{d}{\cos(90 - \psi - \theta)} = \frac{\delta_{щ} \cdot r_{щ} \cdot \sin \psi \cdot (ctg \psi + ctg \theta)}{\cos(90 - \psi - \theta) \cdot z_{дж}} \cdot \frac{v_0}{v}, \quad (24)$$

Спростивши (24) за формулами зведення $\cos(90 - \psi - \theta) = \sin(\psi + \theta)$, отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{\delta_{щ} \cdot r_{щ} \cdot \sin \psi \cdot (ctg \psi + ctg \theta)}{\sin(\psi + \theta) \cdot z_{дж}} \cdot \frac{v_0}{v} = \frac{\delta_{щ} \cdot r_{щ} \cdot \sin \psi \cdot \left(\frac{\cos \psi}{\sin \psi} + \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right)}{(\sin \psi \cos \theta + \cos \psi \sin \theta) \cdot z_{дж}} \cdot \frac{v_0}{v} = \\ &= \frac{\delta_{щ} \cdot r_{щ} \cdot \sin \psi \cdot \frac{\cos \psi \sin \theta + \cos \theta \sin \psi}{\sin \psi \sin \theta}}{(\sin \psi \cos \theta + \cos \psi \sin \theta) \cdot z_{дж}} \cdot \frac{v_0}{v} = \frac{\delta_{щ} \cdot r_{щ}}{\sin \theta \cdot z_{дж}} \cdot \frac{v_0}{v}. \end{aligned} \quad (25)$$

З виразу (25) видно, що кутовий розподіл відстані Δ , яку проходить теплове випромінювання в радіальній водяній завісі, не залежить від кута її розкриття ψ .

Отже, з врахуванням (25), вираз для коефіцієнта екранування (19) радіальної водяної завіси набуде виду:

$$\varepsilon = \frac{1}{(1 - V)^2} e^{\frac{(K_B - K_{II}) r_{щ} \delta_{щ} v_0}{\sin \theta z_{дж} v}}. \quad (26)$$

Остання залежність показує, що логарифм натуральний від коефіцієнта екранування водяної завіси прямо пропорційний ширині розсіювальної щілини $\delta_{щ}$ та обернено пропорційний добуткові відстані від осередку пожежі до розсіювальної щілини $z_{дж}$ на синус кута θ .

Для підтвердження теоретичних досліджень та їх уточнення необхідно провести експериментальні дослідження з визначення захисних властивостей ЗВЕ.

Висновки. Аналітичне визначення коефіцієнта екранування теплового випромінювання ЗВЕ показало, що ефективність екранування радіального водяного екрана не залежатиме від кута конусності ЗВЕ. Коефіцієнт екрануючої здатності ЗВЕ буде прямо пропорційний ширині розсіювальної щілини.

Список літератури:

1. Михеев М.А., Основы теплопередачи. Изд. 2-е, / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: «Энергия», 1977. – 344 с.
2. Теплопередача при пожаре / под ред. П.Блэкшера; сокр. пер.с англ. В.Т. Потемкина. – М.: Стройиздат, 1981. – 164 с.
3. Основы пожарной теплофизики / [Башкирцев М.П., Бубырь Н.Ф., Минаев Н.А., Ончуков Д.Н.]. – М.: Стройиздат, 1984. – 200 с.
4. Виноградов А.Г. Конвективный теплообмен розпиленої води з повітрям // Пожежна безпека: теорія і практика №1, 2008, С.26-32.
5. Виноградов А.Г. Аналіз процесу екранування теплового випромінювання водяною завісою // Пожежна безпека: теорія і практика №1, 2008, С.20-25.
6. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКРАНИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДЯНОЙ ЗАВЕСОЙ

В работе проведен анализ существующих аналитических исследований касающихся определения величины защитного действия водяной завесы от теплового излучения. Определено преимущество лучевого теплообмена над конвективным во время аналитического исследования. Предложена своя математическая модель исследуемого процесса, обосновано отличие данной модели от уже известных, определено влияние угла раскрытия водяной завесы на коэффициент экранирования, показано что, коэффициент экранирования водяной завесы прямо пропорционален толщине водяной завесы.

Ключевые слова: защитный водяной экран, тепловое излучение, математическая модель, коэффициент экранирования

O.V. Lazarenko, V. I. Zhelyak

MATHEMATICAL SIMULATION OF HEAT RADIATION SHIELDING WATER CURTAIN

The paper analyzes the existing analytical studies on the determination of the protective action of water curtain from thermal radiation. Determined by the preference of radiation over convective heat transfer in the analytical study. Asked his mathematical model of the process, grounded unlike the model of the already known, determined the effect of opening angle on the water curtain shielding factor, it is shown that water curtain shielding factor is directly proportional to the thickness of the water curtain.

Key words: water-protective screen, thermal radiation, mathematical model, shielding factor

