

УДК 532.525.3:62-784.7

Теплозахисні властивості суцільної плівки води

Виноградов А.Г.

Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, м. Черкаси, Україна

Анотація. Розглянуто процес формування на поверхні вертикальної протипожежної штори, що зрошується струменем розпиленої води, рухомої водяної плівки. Виконано теоретичний аналіз руху водяної плівки під дією сили тяжіння, представлено методику розрахунку її середньої товщини та швидкості руху в залежності від інтенсивності зрошування. Теоретично розглянуто процес нагрівання водяної плівки тепловим випромінюванням інфрачервоного діапазону, характерного для типових осередків пожеж. Визначено ефективний сумарний коефіцієнт пропускання розпиленним струменем і водяною плівкою променистого теплового потоку та його залежність від основних фізичних і технічних параметрів.

Ключові слова: протипожежний захист; теплове випромінювання; розпилена вода; водяна плівка.

Теплове випромінювання є одним із найбільш небезпечних чинників, що супроводжують будь-яку пожежу, воно загрожує здоров'ю й життю людей, обмежує зону активних дій рятувальних підрозділів. Розглянуто новітню схему колективного захисту від дії теплового випромінювання, що використовує високоефективну екрануючу здатність суцільної водяної плівки. Відомо, що вода має сильну спектральну залежність показника поглинання, яка робить воду прозорою у видимому діапазоні (довжини хвиль 0,4 – 0,8 мкм) і непрозорою в інфрачервоному діапазоні, характерному для випромінювання пожеж (довжини хвиль 2 – 15 мкм) [1]. Завдяки цьому навіть тонка водяна плівка (товщиною менше 1 мм) може бути ефективним захисним екраном і непроникною перешкодою для теплового випромінювання.

У спрощеному вигляді схему ослаблення теплового випромінювання представлено на рис. 1. Створення водяної плівки здійснюється завдяки зрошенню протипожежної штори струменем розпиленої води (СРВ). Захисна дія цієї системи забезпечується двома чинниками: 1) ослабленням випромінювання при його проходженні через СРВ; 2) ослабленням при проходженні через водяну плівку. Враховуючи таке 2-ступеневе ослаблення теплового випромінювання, можна написати наступні співвідношення:

$$I_2 = H_c \cdot I_1,$$

$$I_3 = H_f \cdot I_2,$$

звідки

$$I_3 = H_c \cdot H_f \cdot I_1,$$

де I_1 , I_2 , I_3 – інтенсивності теплового випромінювання, відповідно, падаючого на захисну систему, прохідного через СРВ і прохідного через водяну плівку; H_c , H_f – коефіцієнти пропускання, відповідно, СРВ і водяної плівки.

Загальна витрата води Q є сумою витрат зрошувачів Q_s . Для N однакових зрошувачів:

$$Q = N \cdot Q_s.$$

Розпилена вода розподіляється між СРВ і водяною плівкою:

$$Q = Q_c + Q_f.$$

Для визначення величин Q_c і Q_f застосуємо коефіцієнт розподілу води k ($0 < k < 1$):

$$Q_c = k \cdot Q, \quad Q_f = (1 - k) \cdot Q.$$

Величина k залежить від напрямку зрошувачів відносно вертикалі й від φ_y – кута розкриття віялових СРВ зрошувачів у площині xy (рис. 1).

Згідно з розрахунками, для коефіцієнту заломлення води $n_w = 1,33$ від її поверхні відбивається лише близько 2% променистого теплового потоку. В даному випадку цією величиною можна знехтувати і вважати, що при падінні теплового випромінювання на поверхню водяної плівки воно проходить усередину плівки в повному обсязі без відбивання.

При проходженні випромінювання з довжиною хвилі λ всередині плівки через воду відбувається його часткове поглинання, внаслідок чого інтенсивність випромінювання при виході з плівки зменшується в залежності від довжини шляху d (товщина плівки) згідно із законом Бугера-Ламберта-Бера [2]:

$$I_{\lambda 3} = I_{\lambda 2} e^{-k_w \cdot d}$$

де $I_{\lambda 2}$ – спектральна (з довжиною хвилі λ) початкова інтенсивність випромінювання при вході в плівку; k_w – коефіцієнт поглинання води. Внаслідок сильної залежності k_w від λ плівка води пропускає електромагнітне випромінювання вибірково, переважно ті ділянки спектру, для яких k_w є найменшим.

Загалом, коефіцієнт пропускання H_f залежить від спектрального складу падаючого на плівку випромінювання й визначається за допомогою інтегрування по всій ширині спектру. Таке інтегрування виконується чисельно в комп'ютері на основі попередньо завантаженої табличної залежності $k_w(\lambda)$ [1]. Для визначення H_f такий розрахунок є відносно простим, оскільки довжина шляху d є фіксованою (середня товщина плівки з урахуванням хвиль).

Для визначення коефіцієнту пропускання водяної завіси H_c розрахунок є значно більш складним, оскільки необхідно виконати аналіз процесу проходження теплового випромінювання через розпилену воду. При цьому необхідно врахувати форму крапель, їх розподіл за розмірами та їх розподіл у просторі. Результати такого аналізу представлено в роботі [3]. Зокрема, в цій роботі представлено співвідношення для чисельного розрахунку коефіцієнту пропускання водяної завіси для теплового випромінювання, яке за спектральним складом є близьким до випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ) із заданою ефективною температурою. У цьому випадку:

$$H_c = \exp \left[-1,4 \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{l_{eq}}{D_{eq}} \right],$$

де для коефіцієнту пропускання сферичної краплі η , товщини еквівалентного шару води l_{eq} і еквівалентного діаметру крапель СРВ D_{eq} знайдено відповідні функції апроксимації для їх спрощеного розрахунку без застосування операції чисельного інтегрування.

Для коефіцієнту пропускання плівки H_f також знайдено функцію апроксимації, за допомогою якої можна виконати розрахунок H_f , якщо

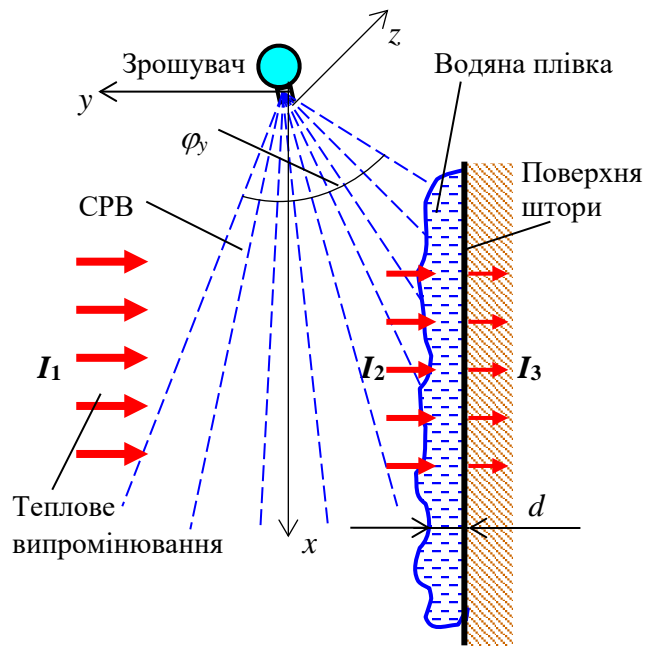


Рис. 1. Схема ослаблення теплового випромінювання

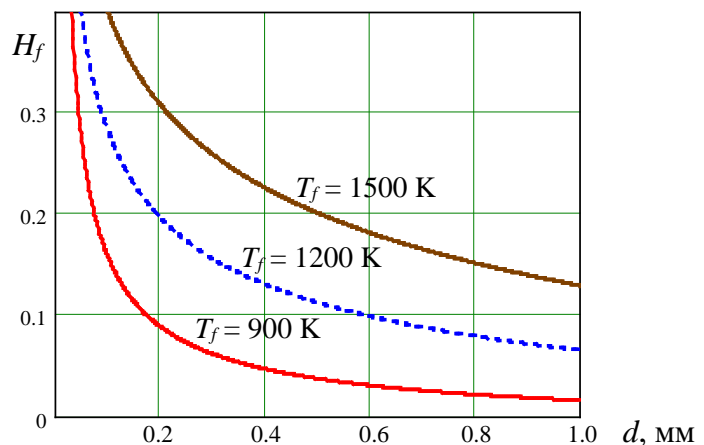


Рис. 2. Залежність коефіцієнту пропускання теплового випромінювання водяною плівкою від її товщини для окремих значень температури осередку пожежі

задати товщину плівки d і ефективну температуру осередку пожежі T_f .

На рис. 2 представлено графічний результат розрахунку залежності $H_f(d)$ для трьох величин T_f , виконаний за знайденими в роботі формулами.

Товщина водяної плівки є ключовим параметром, від якого залежить якість теплового екранування. Для знаходження методу її розрахунку використано методу, запропоновану для подібного процесу в роботі [4]. Для цього розглянуто процес формування водяної плівки при потраплянні частини розпиленої води на поверхню штори та її стіканні вниз під дією сили тяжіння за наступних умов: 1) поверхня, на якій утворюється плівка, є плоскою, гладкою і вертикально розташованою; 2) вода добре змочує поверхню; 3) вода подається на верхню частину цієї поверхні рівномірно вздовж координати z ; 4) рух води вздовж поверхні є одновимірним, тобто вектор швидкості спрямований вертикально вниз (вздовж координати x). Відхилення реальної захисної системи від зазначених умов надалі, при потребі, можуть бути враховані за допомогою емпіричних коефіцієнтів.

При вільному стіканні рідини по твердій поверхні гідродинамічний режим її руху визначається величиною критерію Рейнольдса. За припущення щодо одновимірної ламінарної течії в напрямі x розв'язок відповідного рівняння Нав'є-Стокса для плівки дозволив отримати просторовий розподіл модуля швидкості руху води з кінематичною в'язкістю ν_w у перерізі водяної плівки в залежності від горизонтальної координати y (рис. 3):

$$v = \frac{g}{\nu_w} \cdot y \cdot \left(d - \frac{y}{2} \right)$$

Вигляд залежності від координати y швидкості руху води всередині плівки схематично представлено на рис. 3. Це параболічна залежність із вершиною параболі, що співпадає з межею розділу «плівка – повітря», на якій максимальне значення швидкості:

$$v_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{\nu_w} \cdot d^2$$

На основі знайденої залежності виконано розрахунок середньої товщини водяної плівки d та її залежність від технічних параметрів. В свою чергу, це дозволило визначити температурний режим водяної плівки за різних умов її теплового опромінення та оптимізувати технічні параметри захисної протипожежної системи.

Розрахунок еквівалентного діаметру крапель СРВ D_{eq} виконано у відповідності до методу, представленої в роботі [5].

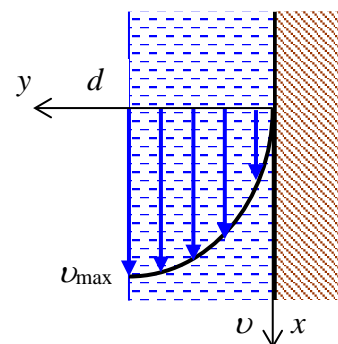


Рис. 3. Розподіл швидкостей у плівці води

Список літератури

1. Hale G.M. Optical constants of water in the 200 nm to 200 mm wavelength region / G.M. Hale, M.P. Querry // Appl. Optics. – 1973. – V. 12, No. 3. – P. 555–563.
2. Handbook of Optics, Volume I: Fundamentals, Techniques and Design. – Optical Society of America, McGraw-Hill, Inc., 1995. – 1606 p.
3. Виноградов А.Г. Взаимосвязь параметров противопожарных водяных завес с эффективностью экранирования теплового излучения / А.Г. Виноградов., О.М. Яхно, В.А. Дунюшкин // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2015. – № 1 (31). – С. 36-45.
4. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии / В.Б. Коган. – Л.: Химия, 1977. – 592 с.
5. Виноградов А.Г. Эквивалентный диаметр капель струй распыленной воды и его зависимость от технических параметров / А.Г. Виноградов., О.М. Яхно // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», сер. Машинобудування. – 2016. – № 1 (76). – С. 39-45.