

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 536.331:532.529.5:614.84

DOI:10.20535/1810-0546.2016.1.54479

А.Г. Виноградов¹, О.М. Яхно²¹Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна²Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

ПРОЦЕСИ РАДІАЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ Й ВИПАРОВУВАННЯ КРАПЕЛЬ І ЇХ ВПЛИВ НА ЕКРАНУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНИХ ВОДЯНИХ ЗАВІС

Background. Water curtains are one of effective means of protection against fire thermal radiation. The analysis of the water curtain shielding properties is carried out by means of mathematical model operation. But the process of droplets evaporation as a result of their heating by fire thermal radiation is not considered in the existing mathematical model.

Objective. A central objective of the study is the analysis of processes of droplets radiant heating and evaporation, and also their influence on the water curtain shielding properties.

Methods. Thermodynamic analysis of the specified processes is made on the basis of the corresponding heat balance equations both for water curtain in general, and for separate droplets.

Results. Main results of the study are the numerical calculations and the graphic dependences of the parameters characterizing droplets evaporation for the typical regimes of thermal shielding. For the purpose of verification of the received results their comparison with results of earlier executed experimental studies on evaporation of water droplets at impact of laser radiation of infrared range was executed. It is established that theoretical results in limits of errors are in consent with the experimental results.

Conclusions. The conclusion follows from the received results that evaporation of droplets owing to their heating by a fire thermal radiation has no essential impact on the shielding properties of water curtains. This process can be not considered when performing technical calculations.

Keywords: fire water curtain; thermal radiation shielding; evaporation of droplets.

Вступ

Одним із засобів захисту від потужного теплового випромінювання в зоні пожежі є водяні завіси, тобто певним чином розміщені в просторі струмені розпиленої води (СРВ) [1, 2]. Для створення водяних завіс використовуються щільні дренчерні зрошувачі, що розпилюють воду у формі плоского віяла. Така форма СРВ найбільш відповідає задачі теплового екранування.

На практиці нині розрахунки дренчерних водяних завіс при їх проектуванні виконуються згідно з існуючими методиками (наприклад, [3], а також ДСТУ 5027:2008). При розрахунках таких систем ураховуються їх геометричні розміри, загальна й питома витрата води, інтенсивність зрошення. Виходячи з цього, вибирається тип зрошувачів, розраховуються їх кількість, просторове положення, параметри трубопроводу й тиск подачі води. Однак у методиках розрахунків відсутні такі параметри, як коефіцієнт екранування теплового випромінювання, діаметр крапель і їх концентрація, які фактично визначають захисні властивості водяної завіси. У технічних паспортах дренчерних зрошувачів ці параметри також відсутні. Таким чином, названі методики є фактично непридатними для розв'язання цієї задачі.

Наукові дослідження в напрямі створення надійних методів розрахунків протипожежних водяних завіс в Україні та країнах СНД не проводяться, судячи з відсутності відповідних публікацій. Аналогічного висновку дійшли також автори нещодавно опублікованих оглядів на цю тему [2, 4]. Аналіз численних закордонних публікацій (наприклад, [5–8]) свідчить про те, що загалом інтенсивність досліджень у цьому напрямі у світі в останні 20–25 років доволі висока. Однак проблема створення надійних розрахункових методів і на їх основі стандартних методик розрахунків екрануючих властивостей водяних завіс поки що не вирішена.

Альтернативою названим вище недосконалим методикам може бути розрахунок екрануючих властивостей водяної завіси, виконаний за допомогою нещодавно створеної математичної моделі, розробленої авторами дійсної роботи [9–12]. Вона дає змогу на основі технічних параметрів дренчерної системи й параметрів осередку пожежі визначити коефіцієнт пропускання водяною завісою теплового випромінювання пожежі. У моделі враховано основні фізичні процеси, що впливають на параметри теплового екранування (гідроаеродинаміку розпиленого струменя, взаємодію теплового випромінювання із краплями СРВ), однак деякі важливі аспекти цієї моделі вима-

гають додаткового вивчення. Зокрема, необхідно дослідити питання нагрівання крапель СРВ тепловим випромінюванням пожежі та їх випаровування. Випаровування крапель супроводжується зменшенням їх діаметра і потенційно може впливати на екрануючі властивості водяної завіси.

Постановка задачі

Необхідно встановити, які параметри впливають на швидкість радіаційного нагрівання й випаровування крапель, знайти відповідні функціональні залежності й виконати числові розрахунки для типових режимів екранування теплового випромінювання пожеж. На цьому етапі мова йде лише про оціночні розрахунки, на підставі яких можна зробити висновки про те, наскільки істотними є зазначені процеси й чи потрібно їх урахувати при побудові математичної моделі екранування теплового випромінювання пожеж за допомогою водяних завіс.

Інтегральний аналіз процесу випаровування СРВ

На рис. 1 зображено схему процесу екранування теплового випромінювання.

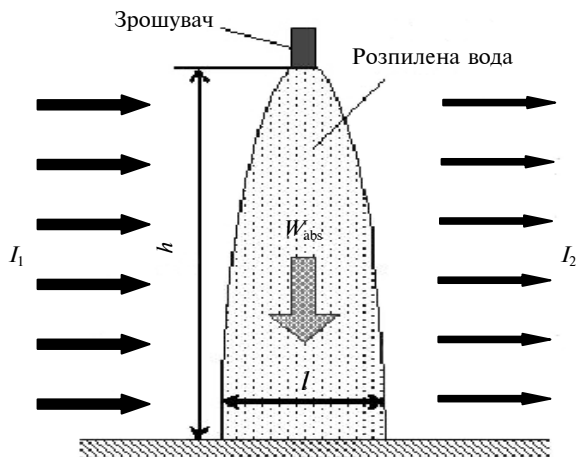


Рис. 1. Схема процесу теплового екранування дренчерною завісою

Випромінювання інтенсивністю I_1 від осередку пожежі падає на дренчерну завісу висотою h і товщиною l . Частина променистого теплового потоку W_{abs} поглинається краплями (внаслідок чого їх температура підвищується), і

далі проходить ослаблене випромінювання інтенсивністю I_2 .

Коефіцієнтом пропускання водяної завіси називається величина

$$H = \frac{I_2}{I_1},$$

де I_1 – інтенсивність падаючого випромінювання, Вт/м²; I_2 – інтенсивність прохідного випромінювання, Вт/м².

Згідно з математичною моделлю, представленою в працях [11, 12], розрахунок коефіцієнта пропускання може бути виконаний за формулою

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

де η – коефіцієнт пропускання краплі; l_{eq} – товщина еквівалентного шару води, м; D_{eq} – еквівалентний діаметр крапель завіси, м. Усі три величини в правій частині формули залежать від розміру крапель. Таким чином, зменшення розміру крапель у процесі їх випаровування повинно вплинути на величину H .

Спочатку розглянемо процес радіаційного нагрівання й випаровування крапель на основі інтегральних характеристик: загальної потужності падаючого на завісу й прохідного випромінювання пожежі; загальної витрати води; кількості теплоти, необхідної для нагрівання й випаровування цієї води.

Оскільки розрахунок має оціночний характер, будемо вважати, що водяна завіса, створена N зрощувачами, має форму прямокутника висотою h , шириною $Z_c = N \cdot \Delta z$ і площею

$$S = Z_c \cdot h = N \cdot \Delta z \cdot h,$$

де Δz – відстань між зрощувачами, м.

Падаючий на водяну завісу і прохідний через неї теплові потоки обчислюються як

$$W_1 = I_1 \cdot S,$$

$$W_2 = I_2 \cdot S = H \cdot I_1 \cdot S.$$

Теплова потужність, що поглинається водяною завісою і витрачається на нагрівання й випаровування краплі:

$$W_{\text{abs}} = W_1 - W_2 = I_1 \cdot S \cdot (1 - H).$$

Загальна витрата води всіх зрошувачів:

$$Q_s = N \cdot Q_{\text{noz}} = N \cdot \pi \cdot b_0^2 \cdot u_0,$$

де Q_{noz} – витрата води зрошувача, м³/с; b_0 – радіус вихідного отвору зрошувача, м; u_0 – початкова швидкість крапель, м/с.

Якщо температура всієї води за час прольоту крапель підвищується в середньому на ΔT і частина цієї води випаровується: $\Delta Q_s = k \cdot Q_s$, де k – об'ємна частка води, що випарувалася, то можна написати рівняння теплового балансу (нехтуючи тепловим випромінюванням крапель):

$$W_{\text{abs}} = c_w \cdot \rho_w \cdot Q_s \cdot \Delta T + L \cdot \rho_w \cdot \Delta Q_s,$$

або

$$I_1 \cdot \Delta z \cdot h \cdot (1 - H) = \rho_w \cdot \pi \cdot b_0^2 \cdot u_0 \cdot (c_w \cdot \Delta T + k \cdot L),$$

де ρ_w – густина води, кг/м³; c_w – питома теплоємність води, Дж/(кг·К); L – питома теплота пароутворення води, Дж/кг.

Звідси можна визначити густину потужності падаючого теплового випромінювання, якої достатньо для випаровування об'ємної частки k усїєї води, що міститься в краплях водяної завіси, за час їх прольоту:

$$I_1(k) = \frac{\rho_w \cdot \pi \cdot b_0^2 \cdot u_0 \cdot (c_w \cdot \Delta T + k \cdot L)}{\Delta z \cdot h \cdot (1 - H)}.$$

На рис. 2 відображено розрахунок графіка залежності $I_1(k)$ для типових параметрів $b_0 = 3$ мм, $u_0 = 20$ м/с, $\Delta T = 80$ К, $\Delta z = 0,5$ м, $h = 5$ м, $H = 0,2$.

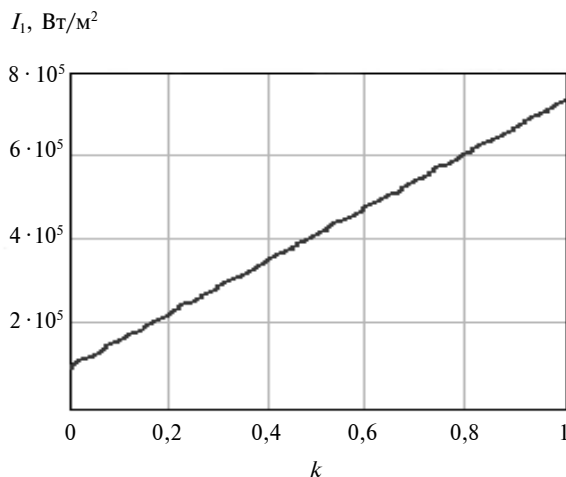


Рис. 2. Залежність $I_1(k)$

Цей розрахунок свідчить про те, що при заданих параметрах процесу навіть катастрофічна пожежа з інтенсивністю теплового випромінювання близько 200 кВт/м² здатна випарувати воду із крапель водяної завіси лише на 17%. Для типових же значень інтенсивності випромінювання пожеж 20–40 кВт/м² істотного випаровування загальної кількості води не відбувається.

Однак цей результат отримано для інтегральних характеристик водяної завіси, і він не враховує низку особливостей, які впливають на процес випаровування окремих крапель. Розпилений струмінь складається із крапель різних розмірів. Перебуваючи в рівних умовах, за однаковий час дрібні краплі нагріваються до точки кипіння й частково або повністю випаровуються, а великі краплі не встигають нагрітися до кипіння і майже не випаровуються.

Аналіз процесу випаровування окремих крапель

Виконаємо оціночний розрахунок мінімального часу нагрівання краплі діаметром D до температури кипіння. Поглинута краплею енергія теплового випромінювання витрачається на її нагрівання, випаровування й випускання теплового випромінювання. Як показують оцінки, останнім чинником за температур краплі менше 100 °С можна знехтувати. Час нагрівання краплі t буде мінімальним за відсутності її випаровування. За цих умов уся поглинута краплею енергія витрачається на її нагрівання зі зміною її температури на ΔT_d :

$$W_{d,\text{abs}} \cdot t = c_w \cdot \rho_w \cdot \frac{\pi D^3}{6} \cdot \Delta T_d, \quad (1)$$

де поглинутий краплею тепловий потік, Вт [5]:

$$W_{d,\text{abs}} = 0,934 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot (1 - \eta) \cdot I_1. \quad (2)$$

Обчислення коефіцієнта пропускання краплі η можна виконати за допомогою апроксимації [6, 7]:

$$\eta = A \cdot D^B + C,$$

де $A = 1,25 \cdot 10^{-35} \cdot (T_f - 207,6)^{11,02}$, $B = -2,329 + 1,6362 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,0519 \cdot 10^{-6} \cdot T_f^2 - 1,386 \cdot 10^{-9} \times T_f^3 + 5 \cdot 10^{-13} \cdot T_f^4 - 0,651 \cdot 10^{-16} \cdot T_f^5$, $C = -9,59 \times 10^{-5} \cdot 10^{0,002495 \cdot T_f}$, де T_f – ефективна температура осередку пожежі.

Мінімальний час нагрівання краплі до точки кипіння τ_b знайдемо з (1) і (2), покладаючи початкову температуру води близько 20 °С і $\Delta T_d = \Delta T_b \approx 80$ К:

$$\tau_b = \frac{c_w \cdot \rho_w \cdot D \cdot \Delta T_b}{1,4 \cdot (1 - \eta) \cdot I_1}, \quad (3)$$

де ΔT_b – приріст температури краплі при її нагріванні до точки кипіння, К.

З [10] знайдемо мінімальний час прольоту краплі на відстань h :

$$t_{fl} = \int_0^h \frac{dx}{u_m(x)} = \frac{\rho_a \cdot \Delta z}{12,5 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0} \times \int_0^h \frac{x \cdot dx}{\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1}}, \quad (4)$$

де x – вертикальна координата, м; u_m – швидкість крапель на осі СРВ, м/с; ρ_a – густина повітря, кг/м³; φ_0 – кут розхилу розпиленого струменя, рад.

Розрахований у (4) час не залежить від діаметра крапель, оскільки в застосованій у роботі [10] математичній моделі для розрахунку швидкості крапель використовується наближення, при якому краплі діаметром менше 0,2 мм після швидкої релаксації рухаються разом із повітрям, утворюючи водяний туман. Для крапель діаметром понад 0,2 мм час про-

льоту зменшується порівняно з (4), а тому їх випаровування не є визначальним для цього аналізу.

На рис. 3 наведено розрахунки залежностей $\tau_b(D)$ і $t_{fl}(h)$ для типових параметрів $b_0 = 3$ мм, $\varphi_0 = 2,5$ рад, $\Delta z = 0,5$ м, $T_f = 1200$ К і для вказаних на рисунках значень I_1 і u_0 .

Порівнюючи розрахункові значення τ_b і t_{fl} , можна побачити, що це величини одного порядку, а отже, можлива ситуація, коли крапля досягне точки кипіння ще в польоті. Після закипання процес випаровування краплі різко прискорюється, й практично вся поглинута краплею енергія випромінювання йде на її випаровування. Цьому процесу відповідає рівняння енергетичного балансу:

$$0,934 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot I_1 \cdot [1 - \eta(D)] \cdot dt = -L \cdot \rho_w \cdot \pi D^2 \cdot dD, \quad (5)$$

або

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{0,934}{4} \cdot \frac{1 - \eta(D)}{L \cdot \rho_w} \cdot I_1. \quad (6)$$

Інтегруючи (5) від початкового діаметра D до кінцевого D_f , одержимо час випаровування краплі:

$$\tau_{ev} = \frac{4,28 \cdot \rho_w \cdot L}{I_1} \cdot \int_{D_f}^D \frac{dD}{1 - \eta(D)}. \quad (7)$$

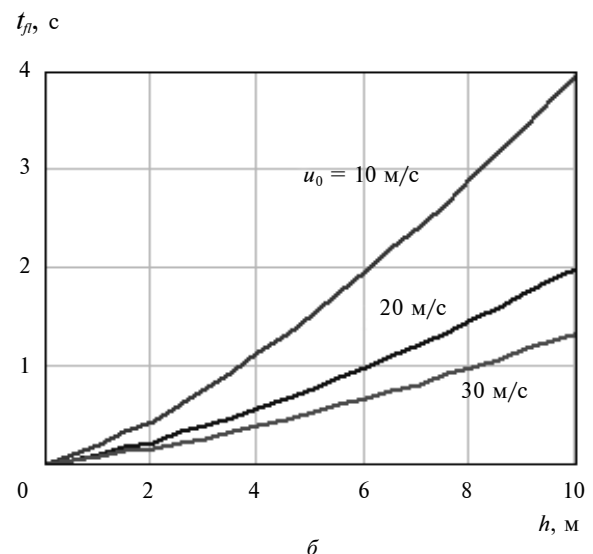
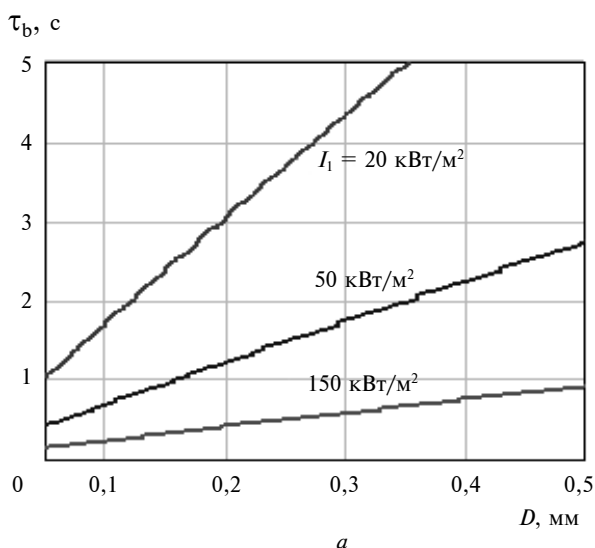


Рис. 3. Результати розрахунків: *a* – часу нагрівання краплі до точки кипіння; *b* – часу прольоту краплі вздовж висоти водяної завіси

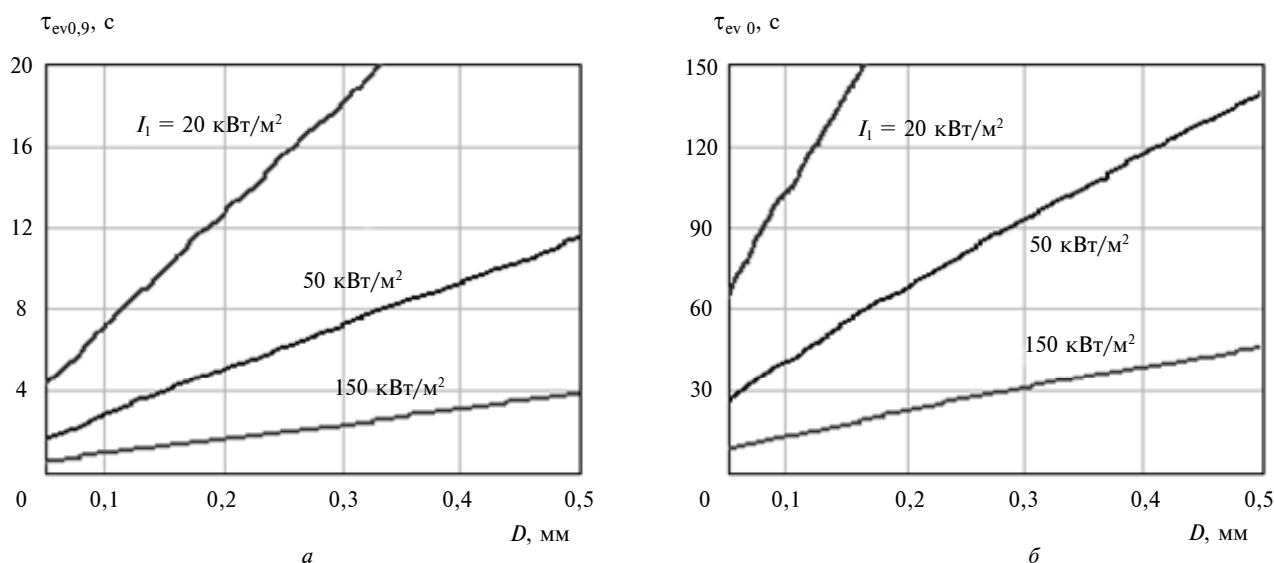


Рис. 4. Час випаровування краплі, нагрітої до точки кипіння: а – часткове випаровування (до 0,9·D); б – повне випаровування

На рис. 4 наведено розрахунки залежності $\tau_{ev,0,9}(D)$ для $D_f = 0,9 \cdot D$ (часткове випаровування краплі (рис. 4, а)) і $\tau_{ev,0}(D)$ для (повне випаровування краплі (рис. 4, б)).

Для визначеності подальших розрахунків покладемо граничне значення величини D_f , при досягненні якого вплив процесу випаровування крапель на коефіцієнт екранування водяної завіси необхідно враховувати при розрахунках. Як таке значення візьмемо $D_f = 0,9 \cdot D$, при якому геометрична площа перерізу краплі зменшується на ~20%. Таке зменшення повинно бути враховане, якщо воно відбувається не в кінці траєкторії краплі, а значно раніше. Отже, умова необхідності врахування випаровування краплі має такий вигляд: $\tau_b + \tau_{ev,0,9} \ll t_{fl}$. Для визначеності візьмемо: $\tau_b + \tau_{ev,0,9} < 0,5 \cdot t_{fl}$.

З урахуванням співвідношень (3), (4) і (7) одержимо нерівність:

$$\frac{c_w \cdot \rho_w \cdot D \cdot \Delta T_b}{1,4 \cdot (1 - \eta) \cdot I_1} + \frac{4,28 \cdot \rho_w \cdot L}{I_1} \times \int_{0,9 \cdot D}^D \frac{dD}{1 - \eta(D)} < 0,5 \cdot \frac{\rho_a \cdot \Delta z}{12,5 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0} \times \int_0^h \frac{x \cdot dx}{\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1}$$

Звідси умова для мінімальної інтенсивності випромінювання, вище якої випаровування краплі необхідно враховувати:

$$I_{1 \min} = \frac{107 \cdot \rho_w^2 \cdot b_0^2 \cdot u_0}{\rho_a \cdot \Delta z} \times \frac{\frac{c_w \cdot D \cdot \Delta T_b}{6 \cdot [1 - \eta(D)]} + L \cdot \int_{0,9 \cdot D}^D \frac{dD}{1 - \eta(D)}}{\int_0^h \frac{x \cdot dx}{\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1}}$$

На рис. 5 наведено розрахунки залежностей $I_{1 \min}(D)$ за цією формулою для типових параметрів: $b_0 = 3$ мм, $\varphi_0 = 2,5$ рад, $\Delta z = 0,5$ м, $T_f = 1200$ К, $\Delta T_b = 80$ К, $h = 10$ м. Задання величин u_0 зазначено на рисунку.

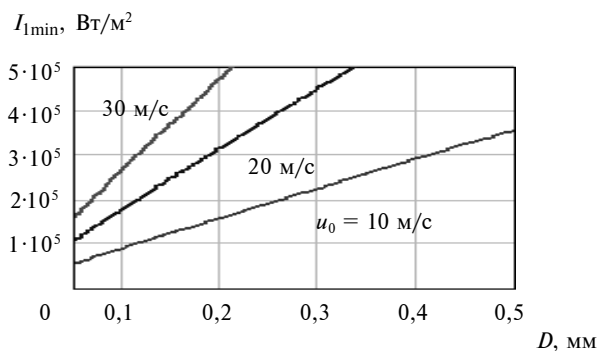


Рис. 5. Мінімальна інтенсивність випромінювання, за якої необхідним є врахування випаровування крапель

Оскільки в реальних дренчерних зрошувачах початкова швидкість крапель зазвичай перевищує 20 м/с, то на основі представлених на рис. 5 результатів розрахунків можна зробити висновок про те, що випаровування крапель практично не впливає на екрануючі властивості водяних завіс навіть при максимально можливих інтенсивностях випромінювання пожеж $\sim 100\text{--}150 \text{ кВт/м}^2$.

Порівняння з експериментом

Для верифікації отриманих результатів використаємо дані з праці [13], у якій наведено результати експериментального дослідження впливу лазерного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ на випаровування крапель води радіусом $\sim 1 \text{ мм}$. Лазерний промінь потужністю 3 Вт фокусувався за допомогою лінзи на краплю, підвішену на тонкій нитці зі скловолокна діаметром 60 мкм.

Результати експериментів свідчать про те, що крапля починає випаровуватися через $\sim 0,5 \text{ с}$ після початку впливу, і далі радіус краплі R змінюється з часом за законом, близьким до лінійного. У межах похибок вимірювань швидкість випаровування краплі для інтенсивності випромінювання $40\text{--}120 \text{ Вт/см}^2$ можна апроксимувати лінійною залежністю (в перерахунку на одиниці СИ) [13]:

$$\left| \frac{dR}{dt} \right| = 2 \cdot 10^{-9} + 8,7 \cdot 10^{-11} \cdot I_1. \quad (8)$$

На основі співвідношення (6), підставляючи константи, враховуючи, що при $R \sim 1 \text{ мм}$ і $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ $\eta \rightarrow 0$, і переходячи від діаметра до радіуса краплі, одержимо для швидкості випаровування

$$\left| \frac{dR}{dt} \right| = 5,12 \cdot 10^{-11} \cdot I_1. \quad (9)$$

При порівнянні співвідношень (8) і (9) у діапазоні інтенсивностей $(4\text{--}12) \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ константою $2 \cdot 10^{-9}$ в (8) можна знехтувати. Різ-

ницю між коефіцієнтами при I_1 у (8) і (9) можна пояснити тим, що, згідно з даними [13], при впливі потужного лазерного випромінювання відбувається не лише випаровування краплі, але й викид з неї великої кількості (від декількох сотень до 3 тисяч) дрібних частинок (крапель) діаметром від 10 до 100 мкм. Очевидно, цей процес призводить до зростання величини $|dR/dt|$. Інтенсивність теплового випромінювання пожеж є істотно нижчою (на 1-2 порядки), а тому можна очікувати, що при його екрануванні викид із крапель дрібних частинок не буде суттєво впливати на процес їх випаровування.

У цілому, узгодження експериментального (8) і теоретичного (9) співвідношень, з урахуванням викладеного вище, можна вважати задовільним. Крім того, прості оцінки свідчать про те, що кількісна відмінність між цими співвідношеннями не є принциповою, і зроблений раніше висновок залишається в силі й у тому випадку, якщо скоригувати (9) з урахуванням (8).

Висновки

У результаті теоретичного аналізу знайдено розрахункові формули для швидкості та часу випаровування крапель протипожежної водяної завіси під впливом теплового випромінювання осередку пожежі. Встановлено, що в межах похибок вони збігаються з експериментально знайденою залежністю.

Встановлено, що для типових режимів роботи протипожежних водяних завіс процес випаровування крапель унаслідок їх нагрівання тепловим випромінюванням пожежі не чинить істотного впливу на екрануючі властивості водяних завіс; при виконанні технічних розрахунків цей процес можна не враховувати.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення математичної моделі екранування теплового випромінювання пожеж за допомогою водяних завіс.

Список літератури

1. Жаров А., Зархин А., Митрофанова М. Дренчерные завесы: теория и практика // БДИ. – 2006. – № 5 (68). – С. 24–28.
2. Собежанський Д.І., Анохін Г.О., Склизкова Л.А. Водяні завіси в системах забезпечення протипожежного захисту об'єктів різного призначення // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2010. – № 2 (22). – С. 148–153.
3. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / Л.М. Мешман, С.Г. Цариченко, В.А. Былинкин и др.; под общ. ред. Н.П. Копылова. – М.: ВНИИПО МЧС РФ, 2002. – 413 с.

4. *Проблемы численного моделирования водяных завес, создаваемых оросителями: обзор публикаций* / А.Н. Бородкин, П.А. Леончук, В.В. Лицкевич, В.Г. Шамонин // *Пожарная безопасность*. – 2009. – № 4. – С. 92–105.
5. *The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression* / W. Yang, T. Parker, H.D. Ladouceur, R.J. Kee // *Fire Safety J.* – 2004. – **39**. – P. 41–66.
6. *Buchlin J.-M. Thermal shielding by water spray curtain* // *J. of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2005. – **18**, № 4-6. – P. 423–432.
7. *Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield* / A. Collin, S. Lechene, P. Boulet, G. Parent // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. – 2010. – **57**. – P. 537–553.
8. *Contribution to fire protection of the LNG storage tank using water curtain* / A. Benbrik, M. Cherifi, S. Meftah et al. // *Int. J. Thermal & Environmental Eng.* – 2011. – **2**, № 2. – P. 91–98.
9. *Виноградов А.Г. Поглощение лучистого теплового потока в распыленной водяной струе* // *Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування*. – 2012. – № 65. – С. 145–152.
10. *Виноградов А.Г. Методика розрахунків параметрів водяних завіс на основі теорії затоплених струменів* // *Науковий вісник УкрНДІПБ*. – 2013. – № 2 (28). – С. 127–139.
11. *Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес* // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2014. – **23**, № 1. – С. 45–56.
12. *Виноградов А.Г., Яхно О.М., Дунюшкин В.А. Взаимосвязь параметров противопожарных водяных завес с эффективностью экранирования теплового излучения* // *Науковий вісник УкрНДІПБ*. – 2015. – № 1 (31). – С. 36–45.
13. *Испарение больших капель воды под воздействием инфракрасного излучения* / В.К. Рудаш, В.П. Бисярин, Н.М. Ильин и др. // *Квантовая электроника*. – 1973. – № 5. – С. 21–26.

References

1. A. Zharov *et al.*, “Drencher curtains: theory and practice”, *BDI*, no. 5 (68), pp. 24–28, 2006 (in Russian).
2. D.I. Sobeshhans'kyj *et al.*, “Water curtains in the systems of ensuring fire protection of various designation objects”, *Naukovyj Visnyk UkrNDIPB*, no. 2 (22), pp. 148–153, 2010 (in Ukrainian).
3. L.M. Meshman *et al.*, *Projection of Water and Foamy Automatic Installations of a Firefighting*, N.P. Kopylov, Ed. Moscow, Russia: VNIPO, 2002, 413 p. (in Russian).
4. A.N. Borodkin *et al.*, “Problems of numerical modeling of water spray curtains produced by sprinklers: the publication review”, *Pozharnaja Bezopasnost'*, no. 4, pp. 92–105, 2009 (in Russian).
5. W. Yang *et al.*, “The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression”, *Fire Safety J.*, vol. 39, pp. 41–66, 2004.
6. J.-M. Buchlin, “Thermal shielding by water spray curtain”, *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 18, no. 4-6, pp. 423–432, 2005.
7. A. Collin *et al.*, “Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield”, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 57, pp. 537–553, 2010.
8. A. Benbrik *et al.*, “Contribution to fire protection of the LNG storage tank using water curtain”, *Int. J. Thermal & Environmental Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 91–98, 2011.
9. A.G. Vinogradov, “Absorption of the radiant heat flux in the sprayed water jet”, *Visnyk NTUU KPI. Ser. Mashynobuduvannya*, no. 65, pp. 145–152, 2012 (in Russian).
10. A.G. Vinogradov, “Calculation method of water curtain parameters on basis of the submerged jet theory”, *Naukovyj Visnyk UkrNDIPB*, no. 2 (28), pp. 127–139, 2013 (in Ukrainian).
11. A.G. Vinogradov “Calculation method of water curtain shielding properties”, *Pozharovzryvobezopasnost'*, vol. 23, no. 1, pp. 45–56, 2014 (in Russian).
12. A.G. Vinogradov *et al.*, “Interrelation of fire water curtains parameters with their heat radiation shielding effectiveness”, *Naukovyj Visnyk UkrNDIPB*, no. 1 (31), pp. 36–45, 2015 (in Russian).
13. V.K. Rudash *et al.*, “Evaporation of large water droplets under the influence of infrared radiation”, *Kvantovaja Jelektronika*, no. 5, pp. 21–26, 1973 (in Russian).

А.Г. Виноградов, О.М. Яхно

ПРОЦЕСИ РАДІАЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ Й ВИПАРОВУВАННЯ КРАПЕЛЬ І ЇХ ВПЛИВ НА ЕКРАНУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНИХ ВОДЯНИХ ЗАВІС

Проблематика. Водяні завіси є одним із ефективних засобів захисту від теплового випромінювання пожеж. Аналіз екрануючих властивостей водяних завіс здійснюється за допомогою математичного моделювання. Але в існуючій математичній моделі не враховано процес випаровування крапель унаслідок їх нагрівання тепловим випромінюванням.

Мета дослідження. Метою роботи є аналіз процесів радіаційного нагрівання і випаровування крапель водяної завіси, а також їх впливу на її екрануючі властивості.

Методика реалізації. Виконано термодинамічний аналіз вказаних процесів на основі відповідних рівнянь теплового балансу як для водяної завіси в цілому, так і для окремих крапель.

Результати дослідження. Для типових режимів теплового екранування виконано розрахунки й отримано графічні залежності параметрів, що характеризують випаровування крапель. З метою верифікації отриманих результатів їх було порівняно з результатами раніше проведених експериментальних досліджень з випаровування крапель води під впливом лазерного випромінювання інфрачервоного діапазону. Встановлено, що теоретичні результати в межах похибок узгоджуються з експериментальними результатами.

Висновки. На основі отриманих результатів зроблено висновок про те, що випаровування крапель унаслідок їх нагрівання тепловим випромінюванням пожежі не чинить істотного впливу на екрануючі властивості водяних завіс. При виконанні технічних розрахунків цей процес можна не враховувати.

Ключові слова: протипожежна водяна завіса; екранування теплового випромінювання; випаровування крапель.

А.Г. Виноградов, О.М. Яхно

ПРОЦЕССЫ РАДИАЦИОННОГО НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС

Проблематика. Водяные завесы являются одним из эффективных средств защиты от теплового излучения пожаров. Анализ экранирующих свойств водяных завес осуществляется с помощью математического моделирования. Но в существующей математической модели не учтен процесс испарения капель в результате их нагрева тепловым излучением.

Цель исследования. Целью работы является анализ процессов радиационного нагрева и испарения капель водяной завесы, а также их влияния на ее экранирующие свойства.

Методика реализации. В работе выполнен термодинамический анализ указанных процессов на основе соответствующих уравнений теплового баланса как для водяной завесы в целом, так и для отдельных капель.

Результаты исследования. Для типичных режимов теплового экранирования выполнены расчеты и получены графические зависимости параметров, характеризующих испарение капель. С целью верификации полученных результатов было выполнено их сравнение с результатами ранее проведенных экспериментальных исследований по испарению капель воды под воздействием лазерного излучения инфракрасного диапазона. Установлено, что теоретические результаты в пределах погрешностей находятся в согласии с экспериментальными результатами.

Выводы. На основе полученных результатов сделан вывод о том, что испарение капель в результате их нагрева тепловым излучением пожара не оказывает существенного влияния на экранирующие свойства водяных завес. При выполнении технических расчетов этот процесс можно не учитывать.

Ключевые слова: противопожарная водяная завеса; экранирование теплового излучения; испарение капель.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
3 листопада 2015 року