

УДК 614.895.5:621.5

**Виноградов А.Г.**, д-р техн. наук, доцент  
(Черкаський національний університет  
ім. Б. Хмельницького, м. Черкаси)

**Костенко Т.В.**, канд. техн. наук  
(Черкаський інститут пожежної безпеки  
ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, м. Черкаси)

**Костенко В.К.**, д-р техн. наук, професор,  
**Зав'ялова О.Л.**, канд. техн. наук, доцент  
(Донецький національний технічний  
університет, м. Покровськ)

### **ЗАСТОСУВАННЯ ПЛІВКИ ВОДИ ДЛЯ ЗАХИСТУ РЯТУВАЛЬНИКІВ ВІД ПОТУЖНОГО ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

**Виноградов А.Г.**, д-р техн. наук, доцент  
(Черкасский национальный университет  
им. Б. Хмельницкого, г. Черкассы)

**Костенко Т.В.**, канд. техн. наук  
(Черкасский институт пожарной безопасности  
им. Героев Чернобыля НУГЗ Украины, г. Черкассы)

**Костенко В.К.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Завьялова Е.Л.**, канд. техн. наук, доцент  
(Донецкий национальный технический  
университет, г.Покровск)

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛЕНКИ ВОДЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СПАСАТЕЛЕЙ ОТ МОЩНОГО ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Vinogradov A.G.**, D. Sc. (Tech.), Associate Professor  
(Bogdan Khmelnytsky Cherkassy National University)

**Kostenko T.V.**, PhD (Tech.)  
(Cherkassy Institute of Fire Safety named after  
Heroes of Chernobyl of NUCP of Ukraine)

**Kostenko V.K.**, D. Sc. (Tech.), Professor,  
**Zavyalova E.L.**, PhD (Tech.), Associate Professor  
(Donetsk National Technical University, Pokrovsk)

### **WATER FILM USED FOR RESCUER PROTECTION AGAINST POWERFUL THERMAL RADIATION**

**Анотація.** В статті розглянуто процес формування струменем розпиленої води рухомої водяної плівки на поверхні теплозахисного одягу рятувальника. За умови спрощеної геометрії (вертикальна плоска поверхня) виконано теоретичний аналіз руху плівки під дією сили тяжіння та її нагрівання внаслідок дії теплового випромінювання інфрачервоного діапазону, характерного для типових осередків пожеж.

Визначено коефіцієнт пропускання розпиленим струменем і водяною плівкою променистого теплового потоку та його залежність від основних фізичних і технічних параметрів. Виконано чисельні розрахунки і побудовано графічні залежності, що дають змогу сформулювати рекомендації щодо раціональних значень окремих технічних параметрів.

**Ключові слова:** теплозахисний одяг, теплове випромінювання, розпилена вода, водяна плівка.

**Вступ.** Теплове випромінювання є одним із найбільш небезпечних чинників, що супроводжують будь-яку пожежу, воно ускладнює дії рятувальників, загрожує їх здоров'ю й життю, обмежує зону оперативних дій рятувальних підрозділів.

Для захисту від дії теплового випромінювання в небезпечній зоні використовуються різні засоби: колективні (пересувні теплозахисні екрани, штори і перегородки, водяні завіси) та індивідуальні, до яких належать, перш за все, захисні костюми різних типів (захисний одяг пожежника, тепловідбивні костюми, ізолюючі костюми тощо). Кожний із цих засобів має свої переваги й недоліки, які зумовлюють для кожного засобу свою область застосування.

У даній роботі розглядається новітня схема індивідуального захисту рятувальника від дії теплового випромінювання, що використовує високоефективну екрануючу здатність суцільної водяної плівки.

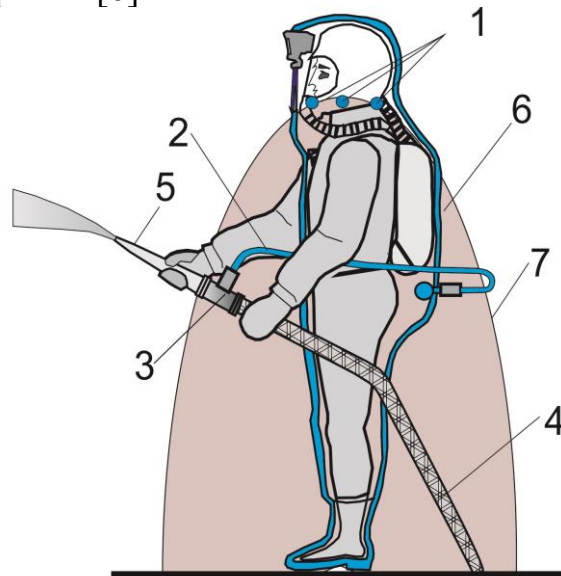
Відомо, що вода має унікальні фізичні властивості, які дозволяють використовувати її в якості теплового екрана в різноманітних захисних пристроях. Відомі спроби використання приладів для зрошення поверхонь одягу рятувальників [1, 2], але вони не одержали розповсюдження через те що не було науково обґрунтовано параметри подавання води. Підтверджено ефективність плівкових протипожежних завіс [3, 4], але такі конструкції не дістали широкого розповсюдження внаслідок громіздкості та значних витрат води.

До привабливих фізичних властивостей води належать високі питомі теплоємність та теплота випаровування. Але особливо важливе значення в даному випадку має надзвичайно сильна спектральна залежність показника поглинання, яка робить воду прозорою субстанцією у видимому спектральному діапазоні (довжини хвиль 0,4 – 0,8 мкм) і непрозорою в інфрачервоному діапазоні, характерному для випромінювання пожеж (довжини хвиль 2 – 10 мкм) [5]. Саме ця обставина робить водяну плівку навіть доволі малої товщини (менше 1 мм) ефективним захисним екраном, який є майже непроникною перешкодою для теплового випромінювання.

**Мета роботи.** Для найбільш раціонального використання екрануючої здатності водяної плівки необхідно побудувати математичну модель і виконати розрахунки, які дозволять визначити технологічні параметри захисного пристрою (кількість і тип розпилювачів, тиск і витрата води), що для заданих умов (інтенсивність і спектральний склад теплового опромінення) забезпечать режим формування плівки з оптимальними характеристиками теплового

екранування (коефіцієнт пропускання теплового потоку, кінцева температура води).

**Основна частина.** Для забезпечення індивідуального захисту рятувальника від дії теплового випромінювання запропоновано захисний пристрій, схему якого представлено на рис. 1 [6].



1 – зрошувачі, 2 – трубки, 3 – вставка, 4 – пожежний рукав, 5 – пожежний ствол, 6 – захисний одяг, 7 – водяна завіса

Рисунок 1 - Охолоджуючий пристрій теплозахисного костюму [6]

Згідно зі схемою захисту, теплозахисний пристрій костюму представляє собою систему зрошувачів 1, що розташовані на рівні ший рятувальника. Вони підключені до трубок 2 з охолоджувачем (водою) за допомогою вставки 3, встановленої на пожежному рукаві 4 перед пожежним стволом 5. Розпилена вода зі зрошувачів утворює в повітряному просторі навколо рятувальника (нижче голови) дисперсну водяну завісу 7, частина води з якої потрапляє на захисний одяг 6 і стікає вниз, утворюючи на одязі водяну плівку. Для захисту голови рятувальника та забезпечення достатньої прозорості для його очей передбачено додаткову захисну систему, і яку буде розглянуто в іншій роботі.

У спрощеному вигляді схему ослаблення теплового випромінювання представлено на рис. 2. Захист частини тіла рятувальника від його плечей і нижче забезпечується двома основними чинниками:

- дисперсна водяна завіса (струмінь розпиленої води (СРВ));
- водяна плівка, що утворюється на поверхні захисного одягу.

Враховуючи 2-ступеневе ослаблення теплового випромінювання (при проходженні випромінювання спочатку через водяну завісу, а потім через плівку), можна написати наступні співвідношення:

$$I_2 = H_c \cdot I_1,$$

$$I_3 = H_f \cdot I_2,$$

звідки

$$I_3 = H_c \cdot H_f \cdot I_1, \quad (1)$$

де  $I_1, I_2, I_3$  – інтенсивності теплового випромінювання, відповідно, падаючого на водяну завісу, прохідного через водяну завісу і прохідного через водяну плівку;  $H_c, H_f$  – коефіцієнти пропускання, відповідно, завіси і плівки.

Загальна витрата води  $Q$  на систему захисту визначається як сума витрат зрошувачів  $Q_s$ . У випадку  $N$  однакових зрошувачів:

$$Q = N \cdot Q_s, \quad (2)$$

$$Q_s = K \cdot \sqrt{p}, \quad (3)$$

де  $K$  – коефіцієнт продуктивності зрошувача.

Витрата розпиленої води розподіляється між СРВ і водяною плівкою:

$$Q = Q_c + Q_f.$$

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

$$Q_c = k \cdot Q, \quad (4)$$

$$Q_f = (1 - k) \cdot Q. \quad (5)$$

Величина коефіцієнта  $k$  залежить від напрямку зрошувачів відносно вертикалі й від  $\varphi_y$  – кута розкриття віялових СРВ зрошувачів у площині  $xz$  (рис. 2). Отже, величину коефіцієнта  $k$  (і відносну величину коефіцієнтів пропускання  $H_c$  і  $H_f$ ) можна змінювати суто конструктивним шляхом.

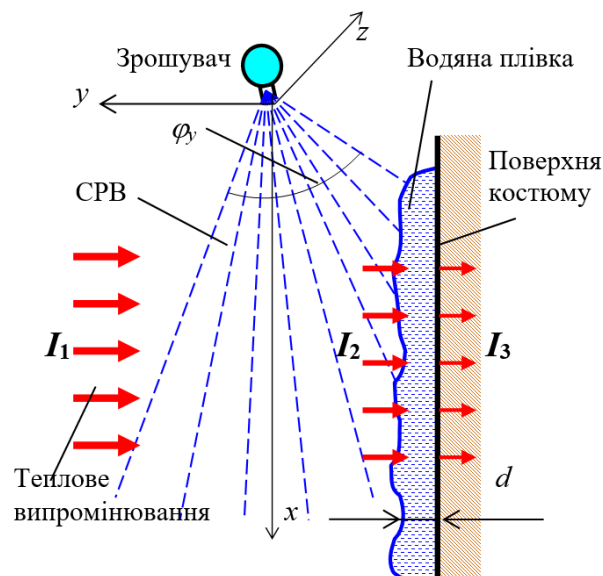


Рисунок 2 - Схема ослаблення теплового випромінювання розпиленою та плівкоподібною водою

При падінні електромагнітного випромінювання на поверхню води частина випромінювання відбивається, а решта проходить усередину води. Елементарний розрахунок дозволяє визначити, що 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 водної плівки воно проходить всередину плівки у повному обсязі без відбивання.

При проходженні монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  всередині плівки через однорідне середовище (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 [5], [Ландсберг Г.С., 1976]:

$$I_{\lambda 3} = I_{\lambda 2} e^{-k_w \cdot d}, \quad (6)$$

де  $I_{\lambda 2}$  – спектральна (з довжиною хвилі  $\lambda$ ) початкова інтенсивність випромінювання при вході в плівку;  $k_w$  – коефіцієнт поглинання води, пов'язаний із її показником поглинання  $\chi_w$  співвідношенням:

$$k_w = \frac{4\pi \cdot \chi_w}{\lambda}. \quad (7)$$

Внаслідок сильної залежності  $\chi_w$  від  $\lambda$  плівка води пропускає через себе електромагнітне випромінювання вибірково, переважно ті ділянки спектру, для яких  $k_w$  є найменшим. Зокрема, при підвищенні температури джерела випромінювання його спектр зміщується до більш коротких довжин хвиль (закон Віна), для яких величина  $k_w$  є відносно меншою. Тому для більш високотемпературного полум'я товщина захисної плівки води повинна бути більшою.

Загалом, коефіцієнт пропускання  $H_f$  залежить від спектрального складу падаючого на плівку випромінювання і визначається за допомогою інтегрування по всій ширині спектру:

$$H_f = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda 3} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda 2} \cdot d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda 2} e^{-k_w \cdot d} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda 2} \cdot d\lambda}. \quad (8)$$

Таке інтегрування виконується чисельно в комп'ютері на основі попередньо завантаженої табличної залежності  $k_w(\lambda)$  [Hale G.M., 1973]. Для визначення коефіцієнту пропускання плівки  $H_f$  такий розрахунок є відносно простим, оскільки довжина шляху  $d$  (товщина плівки) є фіксованою.

Для визначення коефіцієнту пропускання водної завіси  $H_c$  розрахунок є значно більш складним, оскільки необхідно виконати аналіз процесу

проходження теплового випромінювання через розпилену воду. При цьому необхідно врахувати його статистичний характер, оскільки шлях  $d$  (див. (6)) є різним для різних променів всередині окремої сферичної краплі, а крім того, краплі мають різні розміри й просторове розташування. Тому необхідно врахувати форму крапель, їх розподіл за розмірами та їх розподіл у просторі.

Результати такого аналізу представлено в роботі [4]. 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) з ефективною температурою в межах  $700 \text{ K} < T_f < 1800 \text{ K}$ , характерною для температур типових осередків пожеж. У цьому випадку

$$H_c = \exp \left[ -1,4 \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{l_{eq}}{D_{eq}} \right], \quad (9)$$

а для коефіцієнту пропускання сферичної краплі води  $\eta$  знайдено наступну функцію апроксимації [4]:

$$\eta = A \cdot D_{eq}^B + C, \quad (10)$$

де коефіцієнти:

$$A = 1,25 \cdot 10^{-35} \cdot (T_f - 207,6)^{11,02}; \quad (11)$$

$$B = -2,329 + 1,6362 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,0519 \cdot 10^{-6} \cdot T_f^2 - \\ - 1,386 \cdot 10^{-9} \cdot T_f^3 + 5 \cdot 10^{-13} \cdot T_f^4 - 0,651 \cdot 10^{-16} \cdot T_f^5; \quad (12)$$

$$C = -9,59 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,002495 \cdot T_f}; \quad (13)$$

товщина еквівалентного шару води:

$$l_{eq} = k \cdot \frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{1,68 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_z}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_z \cdot d_0^2}} - 1 \right)}; \quad (14)$$

еквівалентний діаметр крапель СРВ:

$$D_{eq} = C_0 \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \cdot \left( \frac{\sigma_w}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{d_0}{\mu_j} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot p^{-\frac{1}{3}}; \quad (15)$$

$\rho_a$  – густина повітря;  $\rho_w$  – густина води;  $x$  – вертикальна координата (відстань від зрошувачів);  $\Delta z$  – відстань між зрошувачами;  $\varphi_z$  – кут розкриття віялового

СРВ окремого зрошувача у площині  $xz$ ;  $d_0$  – діаметр вихідного отвору зрошувача;  $C_0$  – коефіцієнт дисперсності зрошувача,  $\sigma$  – параметр форми функції розподілу крапель за діаметрами;  $p$  – тиск води;  $\sigma_w$  – коефіцієнт поверхневого натягу води;  $\mu_j$  – коефіцієнт витрат зрошувача.

Для коефіцієнту пропускання плівки  $H_f$  можна застосувати функцію апроксимації, подібну до (10), з певним уточненням:

$$H_f = A \cdot (1,2 \cdot d)^B + C, \quad (16)$$

де коефіцієнти  $A$ ,  $B$  і  $C$  розраховуються за співвідношеннями (11) – (13).

Отже, для розрахунку  $H_f$  необхідно задати лише дві величини: товщину плівки  $d$  і ефективну температуру осередку пожежі  $T_f$ . Для розрахунку  $H_c$  за формулою (9) необхідно задати значно більшу кількість величин, що визначають параметри  $l_{eq}$  і  $D_{eq}$  (див. (14) і (15)).

Кількісний розрахунок залежності  $H_f(d)$  для трьох величин  $T_f$ , виконаний за формулами (11) – (13), (16) надано на рис. 3. Він призначений для визначення орієнтовної величини товщини водяної плівки, необхідної для забезпечення достатньо ефективного екранування променистого теплового потоку від типової пожежі.

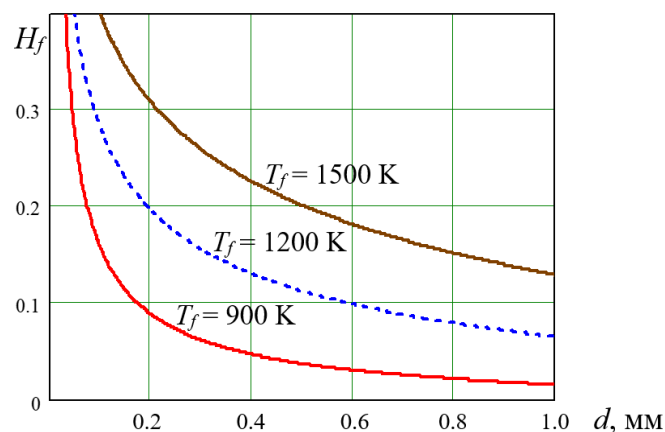


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнту пропускання теплового випромінювання водяною плівкою від її товщини для окремих значень температури осередку пожежі

При типовій температурі осередку пожежі  $T_f = 1200$  К для зниження інтенсивності теплового випромінювання в 10 разів ( $H_f = 0,1$ ) достатньо водяної плівки товщиною 0,6 мм. При температурі  $T_f = 900$  К, яка також є достатньо реалістичною в багатьох випадках, для такого ж результату достатньо водяної плівки товщиною 0,2 мм.

Товщина водяної плівки є ключовим параметром, від якого залежить якість теплового екранування, а тому необхідно знайти метод її розрахунку та її залежність від інших технічних параметрів. Виконаємо аналіз процесу формування водяної плівки при потраплянні частини розпиленої води на поверхню костюму та її стіканні вниз під дією сили тяжіння. Для цього

використаємо методику розрахунку, запропоновану для подібного процесу в роботі [Коган В.Б., 1977].

Коефіцієнт пропускання водяної плівки  $H_f$  будемо визначати, використовуючи наступні умови для побудови спрощеної математичної моделі:

а) поверхня, на якій утворюється плівка, є плоскою, гладкою і вертикально розташованою;

б) вода добре змочує поверхню;

в) вода, що утворює плівку, подається на верхню частину цієї поверхні рівномірно вздовж координати  $z$  (горизонтальна координата вздовж зрошуваної поверхні);

г) рух води вздовж поверхні є одновимірним, тобто вектор швидкості спрямований вертикально вниз (вздовж координати  $x$  (див. рис.2)).

Відхилення реального захисного костюму 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:

$$Re = \frac{4 \cdot d \cdot v_{av}}{\nu_w}, \quad (17)$$

де  $v_{av}$  – середня по перерізу плівки швидкість руху рідини,  $\nu_w$  – кінематична в'язкість рідини. Коефіцієнт 4 зумовлений специфічною геометрією процесу.

В залежності від величини  $Re$  можливими є наступні режими руху рідини:

- при  $Re < 30$  – ламінарна течія без утворення хвиль на поверхні рідини;

- при  $30 < Re < 1600$  – ламінарна течія з утворенням хвиль на поверхні рідини;

- при  $Re > 1600$  – турбулентна течія.

За припущення щодо одновимірної ламінарної течії в напрямі  $x$  рівняння Нав'є-Стокса для плівки має вигляд [Коган В.Б., 1977]:

$$\mu_w \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \rho_w g, \quad (18)$$

де  $\mu_w$  – динамічна в'язкість води,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $v$  – поточна швидкість руху води при координаті  $y$ .

Для плівки рідини, вільно текучої по твердій поверхні, тобто при відсутності напруженості зсуву на межі розділу рідини з газом, граничні умови для рівняння (18) мають наступний вигляд:

- при  $y = 0$  –  $v = 0$ ;

- при  $y = d$  –  $\mu_w \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial y} = 0$ .

Після інтегрування рівняння (18) з урахуванням граничних умов отримаємо:



$$v = \frac{g}{v_w} \cdot y \cdot \left( d - \frac{y}{2} \right). \quad (19)$$

Вигляд залежності від координати у швидкості руху води всередині плівки схематично представлено на рис. 4. Це параболічна залежність із вершиною параболі, що співпадає з межею розділу «плівка – повітря», на якій максимальне значення швидкості:

$$v_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{v_w} \cdot d^2. \quad (20)$$

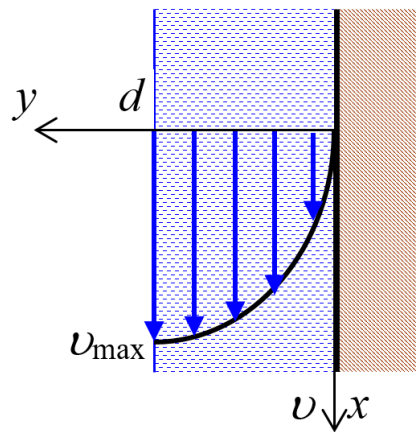


Рисунок 4 - Розподіл швидкостей у плівці води

Середнє значення швидкості руху плівки:

$$v_{av} = \frac{1}{d} \cdot \int_0^d v \cdot dy = \frac{1}{3} \cdot \frac{g}{v_w} \cdot d^2, \quad (21)$$

або

$$v_{av} = \frac{2}{3} \cdot v_{\max}. \quad (22)$$

Об'ємна витрата води на одиницю довжини (вздовж осі  $z$ ) плівки:

$$\Gamma = \frac{Q_f}{L} = v_{av} \cdot d, \quad (23)$$

де  $L$  – горизонтальний розмір плівки.

Підставляючи (21) в (23), отримаємо:

$$\Gamma = \frac{1}{3} \cdot \frac{g}{v_w} \cdot d^3,$$

звідки:

$$d = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot v_w \cdot \Gamma}{g}}, \quad (24)$$

або, враховуючи (9), (10) і (23):

$$d = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot v_w \cdot (1-k) \cdot N \cdot Q_s}{g \cdot L}}. \quad (25)$$

З урахуванням (17), (21) і (25), критерій Рейнольдса для плівки:

$$Re = \frac{4 \cdot (1-k) \cdot N \cdot Q_s}{v_w \cdot L}. \quad (26)$$

При  $30 < Re < 1600$  (ламінарна течія з утворенням хвиль на поверхні рідини) середня товщина плівки приблизно на 7% менша від розрахованої за формулами (24) і (25), при цьому амплітуда хвиль складає 0,46 від середньої товщини плівки [9].

Загалом, слід зважити на те, що в цілому температурний баланс всієї системи встановлюється внаслідок не лише променистого, але й конвективного теплообміну. Важливим стабілізуючим чинником температурного режиму є тепловідвід від костюму до водяної плівки, яка обтікає його й забезпечує конвективний теплообмін, внаслідок якого температура поверхні костюму є близькою до температури плівки. Внаслідок цього, крім коефіцієнту теплового випромінювання, важливим параметром режиму роботи теплозахисного костюму є приріст температури водяної плівки  $\Delta T$ .

Елементарний розрахунок дозволяє визначити, що, якщо під час руху плівки на неї діє теплове випромінювання інтенсивністю  $I_2$ , спрямоване нормально до плівки, то, за умови повного поглинання цього випромінювання плівкою, за час руху плівки вона буде нагріватися від початкової температури води  $T_0$  до максимальної температури  $T_{\max} = T_0 + \Delta T$ , де приріст температури

$$\Delta T = \frac{3 \cdot v_w \cdot h \cdot I_2}{g \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot d^3} = \frac{L \cdot h \cdot H_c \cdot I_1}{c_w \cdot \rho_w \cdot (1-k) \cdot N \cdot Q_s}, \quad (27)$$

де  $h$  – вертикальний розмір плівки (висота на рівні плечей рятувальника);  $c_w$  – питома теплоємність води.

Максимальна температура  $T_{\max}$  досягається в нижній частині водяної плівки. Розрахунок (27) виконано за умови нехтування випаровуванням плівки під час її руху. Ця умова є виправданою з огляду на малий час нагрівання (час руху плівки вздовж розміру  $h$ ):

$$\tau = \frac{h}{v_{av}}. \quad (28)$$

Розрахунки свідчать, що за типових умов роботи цей час не перевищує кількох секунд.

Для розрахунку витрат води зрошувачів за формулою (3) використаємо залежність коефіцієнту продуктивності зрошувача  $K$  від діаметру вихідного отвору зрошувача  $d_0$ . При цьому скористаємось тим фактом, що коефіцієнт

витрати води  $\mu_j$  від конструкції зрошувача майже не залежить і зазвичай має чисельне значення в межах 0,7...0,8 [7]:

$$K = \mu_j \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_w}} \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}. \quad (29)$$

Для виконання розрахунків використано пакет комп'ютерної математики MathCAD. В якості базових задано такі (достатньо реалістичні) значення фізичних та технічних величин:

$L = 1$  м;  $x = 0,5$  м;  $h = 1,5$  м;  $\varphi_z = 2,0$  рад;  $\sigma = 0,5$ ;  $C_0 = 2,5$ ;  $\mu_j = 0,7$ ;  $I_1 = 2 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>;  $T_f = 1000$  К;  $p = 5 \cdot 10^5$  Па;  $d_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $N = 10$ ;  $k = 0,5$ .

В результаті обчислень за наведеними вище формулами отримано значення параметрів, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 - Результат розрахунків параметрів системи захисту від теплового випромінювання

$Q_s$ , л/с	$Q$ , л/с	$d$ , мм	$v_{av}$ , м/с	Re	$D_{eq}$ , мм	$l_{eq}$ , мм	$\eta$	$\Delta T$ , К	$H_c$	$H_f$	$H = H_c \cdot H_f$	$I_3$ , кВт/м <sup>2</sup>
0,039	0,39	0,31	0,63	1565	0,15	0,036	0,17	28	0,76	0,09	0,068	1,36

Згідно з отриманими результатами, при застосуванні захисної системи у складі 10 зрошувачів з вихідними отворами діаметром 1,5 мм при тиску води 5 бар і коефіцієнту розподілу води 0,5 на поверхні теплозахисного костюму утворюється плівка води товщиною 0,31 мм, яка рухається із середньою швидкістю 0,63 м/с. Витрата води всією системою захисту складає 0,39 л/с. При опроміненні захисної системи тепловим випромінюванням інтенсивністю 20 кВт/м<sup>2</sup> водяна плівка нагрівається до максимальної температури ( $T_0 + 28$ ) К. Отже, якщо здійснювати живлення системи водою, охолодженою до +10°C, то в нижній частині костюму (ступні ніг) водяна плівка буде нагріта випромінюванням до +38°C, а в середній частині температура плівки буде складати близько +(20...30)°C. При живленні системи водою кімнатної температури зазначені температурні показники будуть на 10...15°C вище. Для заданих параметрів коефіцієнти пропускання теплового випромінювання набувають таких значень:

- для водяної завіси  $H_c = 0,76$ ;
- для водяної плівки  $H_f = 0,09$ ;
- загальний  $H = 0,068$ .

За цих умов на поверхню теплозахисного костюму діє теплове випромінювання інтенсивністю 1,36 кВт/м<sup>2</sup>, яке не є небезпечним для рятувальника.

При конструюванні подібної системи захисту суттєвою проблемою є оптимізація всього комплексу технічних параметрів з урахуванням зручності її експлуатації й забезпечення прийнятних умов роботи рятувальника в

небезпечній зоні. Із цією метою за допомогою представлених вище розрахункових формул отримано низку графічних залежностей, для яких значення всього комплексу фіксованих параметрів прийнято рівними зазначеним вище при виконанні обчислень для табл. 1. На рис. 5 представлено графічні залежності величин  $H_c$ ,  $H_f$ ,  $H$  і  $\Delta T$  від параметрів  $k$  (коефіцієнт розподілу води),  $N$  (кількість зрошувачів) і  $p$  (тиск води).

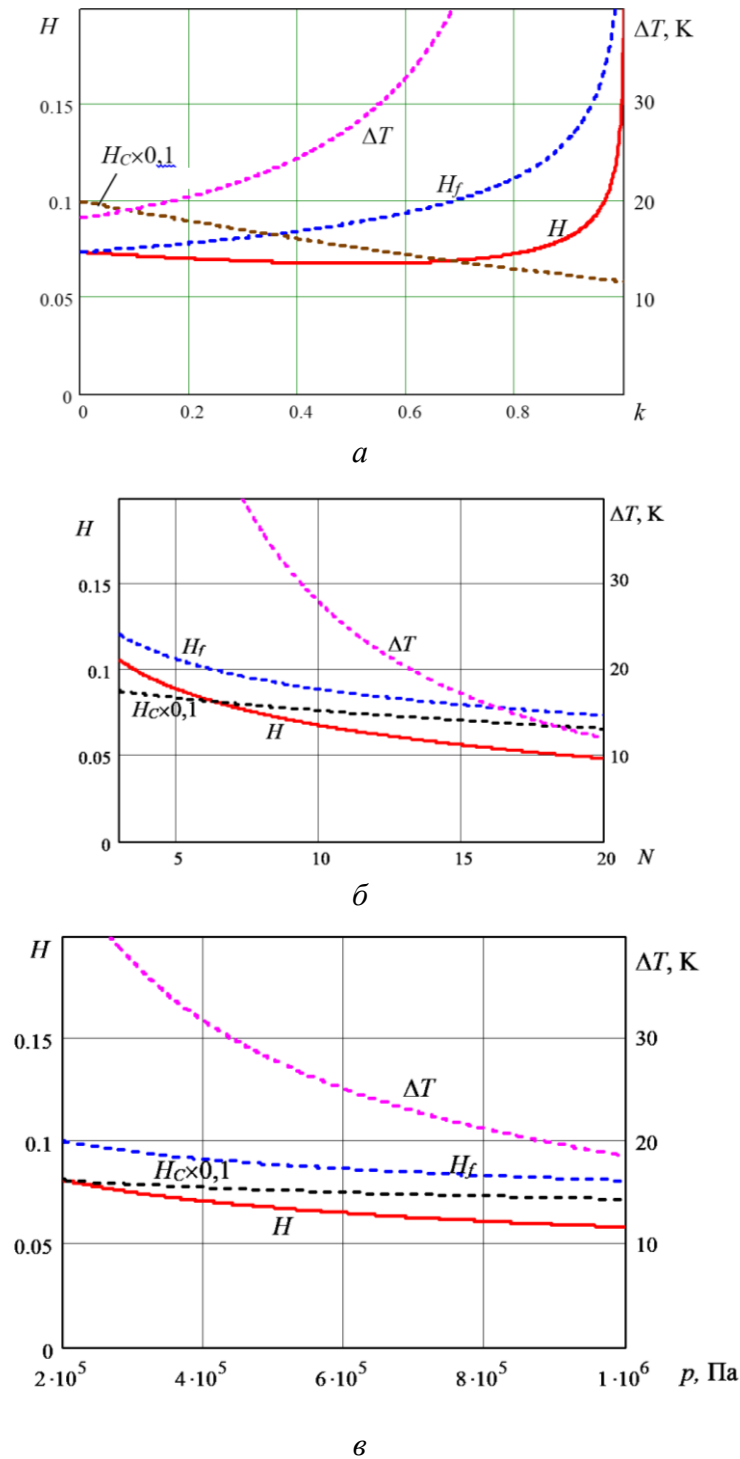


Рисунок 5 - Залежності приросту температури води, коефіцієнтів пропускання теплового випромінювання водяної завіси, водяної плівки і загалом системи захисту від технічних параметрів: а) коефіцієнту розподілу води  $k$ ; б) кількості зрошувачів  $N$ ; в) тиску води  $p$

Загальний коефіцієнт пропускання теплового випромінювання  $H$  в інтервалі значень  $0 < k < 0,8$  майже не залежить від  $k$ , а тому при визначенні цієї величини перевагу слід надати значенням  $k$  від 0 до 0,3, з метою забезпечення мінімальних значень  $\Delta T$ .

При визначенні кількості зрошувачів  $N$  і тиску води  $p$  увагу слід звернути на те, що параметри теплового екранування покращуються при збільшенні цих величин, але при цьому зростає також і витрата води. Тому величини  $N$  і  $p$  необхідно обирати з міркувань розумного компромісу.

**Висновки.** Для удосконаленої конструкції теплозахисного костюму, призначеного для забезпечення захисту рятувальників від потужного теплового випромінювання під час роботи в зоні пожежі, побудовано спрощену математичну модель основних процесів, що зумовлюють його захисні властивості.

Розглянуто процес формування навколо костюму дисперсної водяної завіси, а на його поверхні, що зрошується струменем розпиленої води, рухомої водяної плівки. За умови спрощеної геометрії (вертикальна плоска поверхня) виконано теоретичний аналіз руху плівки під дією сили тяжіння та її нагрівання внаслідок дії теплового випромінювання інфрачервоного діапазону, характерного для типових осередків пожеж. Визначено коефіцієнт пропускання розпиленим струменем і водяною плівкою променистого теплового потоку та його залежність від основних фізичних і технічних параметрів. Виконано чисельні розрахунки і побудовано графічні залежності, що дають змогу сформулювати рекомендації щодо раціональних значень окремих технічних параметрів.

Наступним етапом роботи над вдосконаленням теплозахисного костюму такого типу повинно бути створення математичної моделі теплозахисного пристрою, що забезпечує захист від потужного теплового випромінювання обличчя рятувальника зі збереженням прозорості цього пристрою в оптичному діапазоні для забезпечення нормальної функції зору.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 1853460 US, A62B17/00. Protective clothing / Rudolf Rzemieniecki (США)– № 220787; заявл. 20.09.1927; опубл. 12.04.1932. – 3 с. : ил.
2. Пат. 2043777 RU, A62B17/00. Устройство для индивидуальной защиты от теплового воздействия / И.И. Шеховцов, Г.С. Ожог - № 92005008/23; заявл. 06.11.1992; опубл. 20.09.1995. – 4 с. : ил.
3. Виноградов, А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва, 2014. – Т. 23. - № 1. – С. 45-56.
4. Виноградов, А.Г. Взаимосвязь параметров противопожарных водяных завес с эффективностью экранирования теплового излучения / А.Г. Виноградов., О.М. Яхно, В.А. Дунюшкин // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2015. – № 1 (31). – С. 36-45.
5. Handbook of Optics, Volume I: Fundamentals, Techniques and Design. – Optical Society of America, McGraw-Hill, Inc., 1995. – 1606 p.
6. Пат. 115193 UA Україна, МПК (2017.01) A62B17/00, A41D13/002 (2006.01). Охлаждающий пристрій теплозахисного костюму / В.К. Костенко, Т.В. Костенко, В.М. Покалюк, А.О. Майборода, О.М. Нуянзін, А.А. Нестеренко – № u2016 09849; заявл. 26.09.2016; опубл. 10.04.2017, Бюл. №7. – 5 с. : ил.

7. 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.

#### REFERENCES

1. Rzemieniecki, Rudolf. (1927), *Protective clothing*, U.S., Pat. 1,853,460.
2. Shekhovtsov, I. and Ozhog, G. (1995), *Ustroystvo dlya individualnoy zashchity ot teplovogo vozdeystviya* [Device for individual protection against heat exposure], Moscow, RU, Pat. № 92005008/23.
3. Vinogradov, A.G. (2014), “Method for calculating the screening properties of water curtains”, *Fire and explosion safety*, no. 23, pp. 45-56.
4. Vinogradov A.G., Yakhno O.M. and Dunyushkin V.A. (2015), “Interrelation of the parameters of fire water curtains with the efficiency of shielding thermal radiation”, *Scientific Bulletin of UkrNIPB*, no. 1(31), pp. 36-45.
5. Handbook of Optics, Volume I: Fundamentals, Techniques and Design (1995). Optical Society of America, McGraw-Hill, Inc.
6. Kostenko, V.K., Kostenko, T.V., Pokalyuk, V.M., Mayboroda, A.O., Nuyanzin, O.M. and Nesterenko, A.A., (2017), *Okholodzhuyuchy prystryi teplozakhysnoho kostyumu* [Cooling device for a heat-protective suit], Kyiv, UA, Pat. № 115193.
7. Vinogradov, A.G. and Yakhno, O.M. (2016), “Equivalent diameter drops of streams of the nebulized water and his dependence of technical parameters”, *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, ser. *Engineering*, no. 1(76), pp. 39-45.

---

#### Об авторах

**Виноградов Анатолій Григорович**, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, Черкаський національний університет ім. Богдана Хмельницького, м. Черкаси, Україна, [vinogradov.ag@gmail.com](mailto:vinogradov.ag@gmail.com)

**Костенко Татяна Вікторівна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичних систем безпеки і електроустановок, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУГЗ України, м. Черкаси, Україна, [tatiana.kostenko@gmail.com](mailto:tatiana.kostenko@gmail.com)

**Костенко Віктор Климентійович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри природоохоронної діяльності, Донецький національний технічний університет МОН України, м. Покровськ Донецької обл., Україна, [vk.kostenko@gmail.com](mailto:vk.kostenko@gmail.com)

**Зав'ялова Олена Леонідівна**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природоохоронної діяльності, Донецький національний технічний університет МОН України, м. Покровськ Донецької обл., Україна, [elenazavialova@rambler.ru](mailto:elenazavialova@rambler.ru)

#### About the authors

**Vynogradov Anatoliy Grigorovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Physics, Cherkassy National University named after Bogdan Khmelnytsky, Cherkassy, Ukraine, [vinogradov.ag@gmail.com](mailto:vinogradov.ag@gmail.com)

**Kostenko Teayiana Viktorivna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor sn the Department of Automatic Safety Systems and Electrical Installations, Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine, [tatiana.kostenko@gmail.com](mailto:tatiana.kostenko@gmail.com)

**Zavyalova Olena Leonidivna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Nature and Environmental Activity, Donetsk National Technical University MES of Ukraine, Pokrovsk, Donetsk Region, Ukraine, [elenazavialova@rambler.ru](mailto:elenazavialova@rambler.ru)

**Kostenko Viktor Klymentiyovych**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of the Department of Nature and Environmental Activity, Donetsk National Technical University MES of Ukraine, Pokrovsk, Donetsk Region, Ukraine, [vk.kostenko@gmail.com](mailto:vk.kostenko@gmail.com)

---

**Аннотация.** В статье рассмотрен процесс формирования струей распыленной воды подвижной водяной пленки на поверхности теплозащитной одежды спасателя. При упрощенной геометрии (вертикальная плоская поверхность) выполнен теоретический анализ движения пленки под действием силы тяжести и ее нагрев вследствие действия теплового излучения инфракрасного диапазона, характерного для обычных очагов пожара. Определен

коэффициент пропускания распыленной струей и водяной пленкой лучистого теплового потока и его зависимость от основных физических и технических параметров. Выполнены численные расчеты и построены графические зависимости, позволяющие сформулировать рекомендации по определению рациональных значений отдельных технических параметров.

**Ключевые слова:** теплозащитная одежда, тепловое излучение, распыленная вода, водяная пленка.

**Abstract.** The article deals with the process of forming, by spray water jet, a movable water film on the surface of the rescuer's thermal protective cloth. Under simplified geometry (vertical flat surface), the authors conducted theoretical analysis of film motion under the influence of gravity and its heating due to thermal radiation of the infrared range, which is typical for seats of fires.

Coefficient of radiant heat flux pass through the spray jet and water film is determined as well as its dependence on basic physical and technical parameters. Numerical calculations were fulfilled, and diagrams of dependences were built, which made it possible to formulate recommendations on rational values for some technical parameters.

**Keywords:** thermal clothing, thermal radiation, spray water, water film.

*Статья поступила в редакцию 1.08. 2017*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Т.В. Бунько*