

Ю.В. Луценко, к.т.н., доцент, заст. нач. каф., НУЦЗУ,
О.Б. Васильев, к.т.н., доцент каф., НУЦЗУ,
Є.А. Яровий, викладач, НУЦЗУ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАСИВНОГО ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ ЛЮДИНИ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

(представлено д-ром техн. наук Басмановим О.Є.)

Приведена математична модель пасивного теплового захисту в умовах нестационарного теплового впливу на організм людини.

Ключові слова: час захисної дії, термозахисний одяг, висока температура.

Постановка проблеми. В розрахунках ефективності захисту людини від теплових впливів за допомогою композиції шарів одягу, майже завжди передбачається, що тепловий режим є стаціонарним.

Однак, в ряді випадків, в тому числі під впливом потужних потоків випромінювання і високих температур атмосфери, при пожежах необхідно враховувати суттєво нестационарний тепловий режим одягу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування відомих методик розрахунку теплозахисного одягу в стаціонарній підготовці при відносно невеликому часі її стійкої роботи може привести до значних похибок [1-3]. Тому є актуальним розроблення математичної моделі нестационарного переносу теплоти крізь багатошаровий комплект одягу до організму людини.

Постановка задачі та її рішення. Теплообмін між зовнішньою поверхнею одягу і оточуючим середовищем здійснюється шляхом випромінювання і конвекції. Поверхня одягу безперервно випромінює і поглинає променевою енергією із оточуючого середовища. Результуючий потік променевої енергії, який підводиться до зовнішньої сторони одягу визначається як різниця між потоками поглинутої і відданої енергії. Цей потік є функцією температури зовнішньої поверхні одягу, температури і площі оточуючих поверхонь, відстані, взаємного розташування і ступеня чорноти випромінюючих поверхонь одягу і оточуючих людину тіл.

Кількість теплоти, що поглинається одиницею поверхні одягу в одиницю часу шляхом випромінювання, визначається на основі закону Стефана-Больцмана

$$q_{\text{вип}} = \bar{\varepsilon} \sigma_0 \left[\left(\frac{T_{od}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{nov}}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

де $\bar{\varepsilon}$ – приведена ступінь чорноти при радіаційному теплообміні між зовнішньою поверхнею одягу людини і оточуючими його тілами; T_{od} і T_{nov} – температури зовнішньої поверхні одягу і оточуючих тіл.

Інтенсивність конвективного теплообміну одягу з оточуючим середовищем залежать від температури одягу T_{od} і повітря T_e , швидкості повітря \mathcal{G} , його вологості φ (або тиску), форми поверхні одягу, її розмірів і деяких других факторів. Тепловий потік на поверхні одягу визначається за формулою Ньютона – Ріхмана

$$q_c = \alpha_c (T_{od} - T_e), \quad (2)$$

де α_c – коефіцієнт теплообміну.

В спокійній атмосфері або при повільному русі повітря при швидкостях не більше 0,1 м/с, величина α_c може розглядатися як функція різниці температур поверхонь одягу і оточуючого повітря і може бути визначена за рівнянням Пулькрабека [4].

При рухливості атмосферного повітря α_c визначається для випадку теплообміну при обтіканні одного кругового циліндру, в якості якого може розглядатися тіло людини, під впливом набігаючого потоку повітря. Відповідно дослідним даним, теплообмін при поперечному обтіканні циліндра повітрям з природною ступінем турбулізації потоку може бути описаний рівнянням подібності

$$N_u = c \cdot R_e^m, \quad (3)$$

де N_u і R_e – числа Нуссельта і Рейнольдса, $N_u = \alpha_c \cdot d / \lambda$; $R_e = V \cdot d / \nu$; d – діаметр циліндра; ν – кінематична в'язкість потоку.

Значення коефіцієнтів c і m залежать від числа Рейнольдса:

$$\begin{aligned} c &= 0,81 \text{ і } m = 0,4 \text{ при } R_e = 5 - 80; \\ c &= 0,695 \text{ і } m = 0,46 \text{ при } R_e = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4; \\ c &= 0,197 \text{ і } m = 0,6 \text{ при } R_e \geq 5 \cdot 10^4. \end{aligned}$$

Якщо кут ψ між напрямком потоку і віссю циліндра менше 90 градусів, тоді в області кутів 90-70 градусів тепловіддача залишається практично незмінною, а в діапазоні кутів від 70 до 0 градусів α_c монотонно (приблизно лінійно) знижується до значення, яке складає 40%

від α_c при $\psi = 90$ градусів. Якщо тіло обтікає не повітря, тобто число Прандтля $P_r \neq 0,72$, то використовується рівняння подібності

$$N_u = 1,14 P_r^{0,4} R_e^m, \quad (4)$$

де $P_r = \frac{\lambda}{c}$ – число Прандтля.

Для знаходження температури $T_2(\tau)$ на внутрішній поверхні одягу, відокремленої від тіла повітряним прошарком ($i = 1$)

$$q_T = \frac{\lambda_6}{\delta_1} (T_2 - T_1) + \bar{\varepsilon}_1 \sigma_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]. \quad (5)$$

Рішення системи рівнянь (1) – (5) може бути отримано в результаті зміни чисельних методів. Для випадку стаціонарного стану одягу, при незмінних в часі ($\tau = const$) теплофізичних характеристик шарів одягу, рішення системи рівнянь може бути записано у вигляді

$$q = R(T_k - T_{вн}),$$

де R – загальний термічний опір теплозахисного комплексу одягу

$$R = \frac{1}{\alpha_{ef}} + \frac{1}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}} + \frac{1}{\alpha_{вн}},$$

де α_{ef} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні одягу до оточуючого середовища

$$\alpha_{ef} = \alpha + \varepsilon \sigma_0 \left[\left(\frac{T_{од} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{нов} + 273}{100} \right)^4 \right] / (T_{од} - T_{в}).$$

Одиничні температурні напори на окремих шарах одягу знаходять через повну різницю температур $T_k - T_{в}$ за допомогою формул:

$$T_k - T_1 = (T_k - T_{в}) \frac{\delta_1}{\lambda_{ef1}} \cdot R,$$

$$T_i - T_{i+1} = (T_k - T_e) \frac{\delta_i}{\lambda_i} \cdot R, \quad i=2, 3, \dots, j$$

$$T_j - T_e = (T_k - T_e) \frac{\delta R}{\lambda_{ef}}.$$

До теперішнього часу відсутні прості і достатньо надійні способи, які дозволяють проводити кількісну оцінку ступені теплового напруження. Це обумовлено тим, що при об'єктивній оцінці теплового стану людини необхідно враховувати велику кількість факторів, в тому числі, мікроклімат, стать, вік, функціональний стан організму. Для діагностики теплового стану людини в залежності від температурних діапазонів навколишнього середовища, в дослідженнях використовувалися розроблені нами залежності, які дозволяють обґрунтувати вибір спецодягу, здатного до застосування. Разом з тим, наведені рівняння показують, що зміна температурних показників теплового стану організму в умовах мікроклімату, що нагріває, проходить у відносно вузьких межах. Приймаючи також до уваги те, що тепловий потік до організму людини в умовах пожеж визначається різницею температур $T_e - T_k$, яка суттєво перевищує зміну температурних показників стану організму, можна запропонувати $T_k = \text{const}$; часто вважають [5] $T_k = 37^\circ\text{C}$.

Питомий потік тепла, який витрачається на випаровування поту з поверхні шкіри, є функцією температури шкіри, параметрів зовнішнього середовища і його вологості

$$q_{\text{вип}} = \kappa_{\text{вип}} W (P_k - \varphi P_e), \quad (6)$$

де $\kappa_{\text{вип}}$ – коефіцієнт теплопередачі випаровуванням зі зволоженої поверхні; W – коефіцієнт зволоження шкіри, який при нормальних умовах близький до 0,2, а при роботі в умовах інтенсивного нагрівання близький до одиниці; P_k – тиск водяних парів, насичених при температурі шкіри; P_e – тиск водяних парів, насичених при температурі оточуючого середовища; φ – відносна вологість.

В комфортних умовах кількість пару, який виділяється з 1 м^2 поверхні тіла людини складає біля 0,023 кг/год, а з усієї її поверхні: 0,040-0,042 кг/год. На випаровування цієї кількості поту витрачається 96-102 кДж, що складає біля 24-26% від метаболічного тепла. При дії на людину високотемпературного середовища, випаровування поту стає основним засобом тепловіддачі і в стані “тепло” на випаровування витрачається 30-40% від метаболічного тепла.

По рівнянню (7) безпосередньо може бути отримана швидкість

зміни середньозваженої температури тіла T_τ . Середня питома теплоємність тіла людини складає $c_p = 3,47 \cdot 10^3$ Дж/(кгК), тому зміна T_τ в часі

$$\frac{dT_\tau}{d\tau} = \frac{1}{c_p} \cdot \frac{dQ}{d\tau}. \quad (7)$$

Висновок. Приведена математична модель пасивного теплового захисту в умовах нестационарного теплового впливу на організм людини, використовується для оцінки ефективності засобів теплового захисту і розрахунку припустимого часу перебування в ліквідаційних зонах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Балтайтис В.Я. Исследования нагрева и охлаждения горного массива при пожаре в проветриваемой выработке / Балтайтис В.Я., Маркович Ю.М., Гринь В.Г. – Горный журнал МВССО СССР. – 1971. – № 9. – С. 75-78.

2. Определение безопасных расстояний от фронта пламени при тушении пожаров на открытом пространстве. Метод. рекомендации. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1989. – 51 с.

3. Колосніченко М.В. Методологічні підходи до обґрунтування тривалості захисної дії термозахисного спецодягу / Колосніченко М.В. – Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – № 4. – С. 186-188.

4. Курателадзе С.С. Теплообмен и трение в турбулентном слое / Курателадзе С.С., Леонтьев А.И. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.

5. Порхун А.И. Расчет стационарного теплового режима спецодяга в условиях сложного теплообмена / Порхун А.И., Порхун Л.Д. – Известия вузов ТПП. – 1990. – № 1. – С. 78-82.

Ю.В. Луценко, А.Б. Васильев, Е.А. Яровой

Математическая модель пассивной тепловой защиты человека в условиях пожара

Приведена математическая модель пассивной тепловой защиты в условиях нестационарного теплового воздействия на организм человека.

Ключевые слова: время защитного действия, термозащитная одежда, высокая температура.

Yu.V. Lutsenko, A.B. Vasiliev, E.A. Yarovoy

Mathematical model of passive thermal protection of a human in fire

A mathematical model of passive thermal protection under transient thermal effects on the human body is shown

Keywords: a protective effect, thermal protective wear, high temperature.