

*Р.М. Тацій, д-р фіз.-мат. наук, професор, Д.В. Руденко
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ДВОШАРОВОМУ ЗАХИСНОМУ КОЖУСІ ПОЖЕЖНОГО УСТАТКУВАННЯ

При розробленні дистанційно керованого пожежного устаткування однією з основних задач є забезпечення захисту системи керування від теплового випромінювання, що в свою чергу призведе до зменшення відстані подачі вогнегасних засобів до осередку пожежі. Розглянуто методику розрахунку температури на поверхні пожежного устаткування під дією теплового потоку вогнища та температури в зоні розміщення конструктивних елементів системи керування пожежного устаткування

Ключові слова: дистанційно кероване пожежне устаткування, захист від теплового випромінювання, покращення гасіння

Постановка проблеми. При розробленні дистанційно керованого пожежного устаткування однією з основних задач є забезпечення захисту дистанційно керованого пожежного устаткування та системи керування від теплової дії, що в свою чергу призводить до зменшення відстані подачі вогнегасних засобів до осередку пожежі.

Аналіз останніх досліджень. Одним з шляхів підвищення вогнестійкості металевих конструкцій є застосування покриттів, які спучуються, та дозволяють завдяки високій екрануючій та ізолюючій властивості сповільнити динаміку прогрівання металу до критичних температур, а отже, збільшити термін їх безпечної експлуатації в екстремальних умовах [1].

Мета. Для вирішення цієї задачі необхідно встановити зміну величини температури по товщині захисного кожуха дистанційно керованого пожежного устаткування.

Основна частина. Розроблене дистанційно кероване пожежне устаткування призначене для гасіння пожеж на нафтобазах, а також може бути використане при гасінні пожеж розлитих легкозаймистих рідин та горючих рідин на відкритих місцевостях, на вибухопожежних та пожежонебезпечних об'єктах. Система керування та приводи цього устаткування повинні бути захищені від впливу високих температур (не більше 72 °С) та забезпечувати миттєве відведення поглинутого тепла захисним кожухом. Захисний кожух у вигляді сталюого оцинкованого листа товщиною 0,5 мм, без відповідного додаткового теплоізолюючого покриття буде сильно нагріватись. Розглянемо схему конструкції захисного кожуха з наявністю запропонованих елементів теплоізолюючих шарів (рис.1).

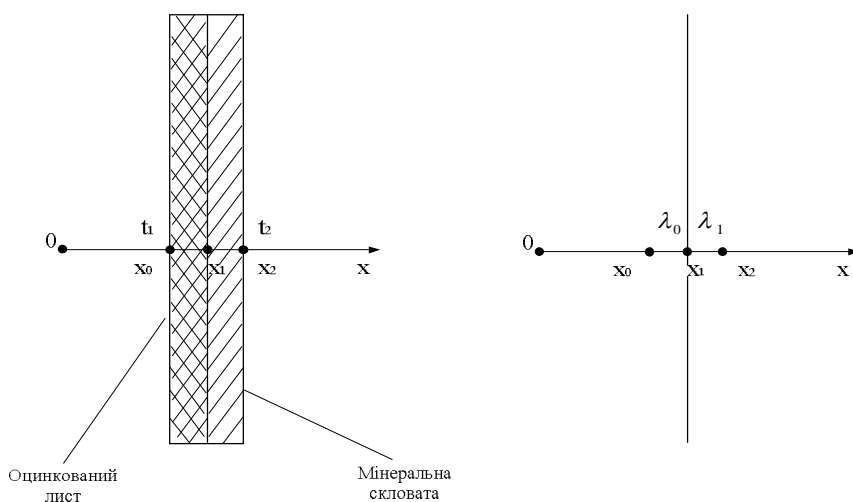


Рис. 1. Точки впливу температурних режимів на захисний кожух

Для визначення температури в зоні розміщення конструктивних елементів системи керування дистанційно керованого пожежного устаткування необхідно розв'язати диференціальне рівняння [2]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \frac{qv}{c\rho},$$

де $t(x)$ – температура по товщині захисного кожуха, К;

τ – час, с;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

c – питома теплоємність, Дж/кг·К;

ρ – густина, кг/м³;

qv – внутрішнє джерело тепла, Вт/м³.

Коефіцієнт теплопровідності задається виразом:

$$\lambda(t) = \lambda_0 [1 + b(t - t_0)],$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності при $t_0 = 293\text{K}$;

b – стала величина, яка залежить від матеріалу.

Розв'язуємо диференціальне рівняння враховуючи лише розповсюдження по одній координаті оскільки прийняли, що температура поширюється в одному напрямку [2].

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right),$$

та закон Фур'є

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}.$$

В одновимірному випадку вважається, що:

$$(-\lambda t')' = 0$$

У випадку неідеального теплового контакту, стаціонарного (незалежного від часу) процесу

$$(\lambda t') = s_1 \cdot \delta(x - x_1), \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності Вт/м·К;

s_1 – коефіцієнт «неідеальності контакту», Вт,

$$\lambda = \lambda_0 \theta_0 + \lambda_1 \theta_1,$$

де $\theta_0; \theta_1$ – характеристики функції півінтервалів $[x_0, x_1]$ та $(x_1, x_2]$ відповідно;

$\delta(x - x_1)$ – функція Дірака з носієм в точці $x = x_1$ (зосереджена в точці x_1).

Тоді рівняння (1) може бути записане у вигляді:

$$((\lambda_0 \theta_0 + \lambda_1 \theta_1) \cdot t')' = S_1 \cdot \delta(x - x_1) \quad (1?)$$

Введемо позначення:

$q^{[1]}$ – тепловий потік (звичайно математично його називають квазіпохідною) Вт/м².

$$q^{[1]} \stackrel{df}{=} \lambda \cdot t',$$

Рівняння (1?) ще не описує повністю процес теплообміну. Для однозначності такого опису необхідно задати певні умови. В цьому випадку на лівій стінці ($x = x_0$) задається температура і тепловий потік:

$$\begin{cases} t(x_0) = t_0 \\ q^{[1]}(x_0) = q_0^{[1]} \end{cases} \quad (2)$$

Задача розв'язування рівняння (квазидиференціальний) (1) чи (1?) із врахуванням умов (2) називається задачею Коші.

Ідея розв'язування – зведення задачі (1?), (2) до систем диференціальних рівнянь 1-го порядку

Введемо вектори $\bar{y} = (t, q^{[1]})^T$

$$\bar{S}_1 = (0, S_1)^T,$$

а також матриці

$$A_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \lambda_0 \end{pmatrix},$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \end{pmatrix}.$$

Тоді на проміжку $[X_0, X_1]$ отримаємо систему диференціальних рівнянь

$$\begin{pmatrix} t \\ q^{[1]} \end{pmatrix}' \equiv \bar{y}' = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \lambda_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t \\ q^{[1]} \end{pmatrix}_0, \quad (3)$$

яка еквівалентна скалярному рівнянню

$$(\lambda_0 t')' = 0.$$

Аналогічно переконуємося, що система диференціальних рівнянь

$$\begin{pmatrix} t \\ q^{[1]} \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t \\ q^{[1]} \end{pmatrix}_1, \quad (4)$$

рівносильна рівнянню

$$(\lambda_1 \cdot t')' = 0.$$

Безпосередньою перевіркою переконуємося, що матриця функції

$$B_0(x, s) \equiv \begin{pmatrix} 0 & \frac{x-s}{\lambda_0} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

є матрицею Коші системи (3):

1) Вона задовольняє матричне рівняння

$$B_{0x}^1(x, s) \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \lambda_0 \end{pmatrix} \cdot B_0(x, s)$$

Дійсно

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \lambda_0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & x-s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

2)
$$B_0(x, s) = E$$

За допомогою цієї матриці розв'язок системи (2) шукаємо у вигляді:

$$\bar{Y}_0 = B_0(x, x_0) \cdot \bar{P}_0, \quad (6)$$

де \bar{P}_0 – поки-що невідомий вектор. Абсолютно аналогічно переконуємося, що матриця-функція

$$B_1(x, s) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{x-s}{\lambda_1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

є функцією Коші системи (4). Розв'язок цієї системи шукаємо у вигляді

$$\bar{Y}_1(x) = B_1(x, x_1) \cdot \bar{P}_1, \quad (8)$$

де \bar{P}_1 – також покищо невідомий вектор.

Початкові умови (2) теж запишемо у векторній формі:

$$\bar{Y}(x_0) = \begin{pmatrix} t_0 \\ q_0^{[1]} \end{pmatrix} \equiv \bar{P}_0. \quad (9)$$

В точці $X=X_1$ (це відомий факт з теорії систем) повинна виконуватися умова спряження:

$$\bar{Y}_1(x_1) - \bar{Y}_0(x_1) = S_1. \quad (10)$$

Розпишемо умову (10) розгорнуто, використовуючи формули (6), (7) та вигляд вектора \bar{S}_1 : $B_1(x_1, x_1) \cdot \bar{P}_1 = B_0(x_1, x_0) \cdot \bar{P}_0 + \bar{S}_1$,

але

$$B_1(x_1, x_1) = E,$$

отже

$$\bar{P}_1 = B_0(x_1, x_0) \cdot \bar{P}_0 + \bar{S}_1 \quad (11)$$

Прийнявши $\bar{P}_0 = \bar{Y}(x_0) = \begin{pmatrix} t_0 \\ q_0^{[1]} \end{pmatrix}$ з формули (9), послідовно отримуємо:

$$\bar{P}_1 = B_0(x_1, x_0) \cdot \bar{Y}(x_0) + \bar{S}_1,$$

або

$$\bar{P}_1 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{x_1 - x_0}{\lambda_0} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_0 \\ q_0^{[1]} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ s_1 \end{pmatrix},$$

або

$$\bar{P}_1 = \begin{pmatrix} t_0 - q_0^{[1]} \cdot \frac{x_1 - x_0}{\lambda_0} \\ q_0^{[1]} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ s_1 \end{pmatrix},$$

остаточно

$$\bar{P}_1 = \begin{pmatrix} t_0 - \frac{q_0^{[1]}(x_1 - x_0)}{\lambda_0} \\ q_0^{[1]} + s_1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Після цього можемо записати розв'язки $\bar{Y}_0(x)$ та $\bar{Y}_1(x)$ відповідно на проміжках $[x_0, x_1]$ та $[x_1, x_2]$.

З формули (6) отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_0(x) &= \begin{pmatrix} 1 & \frac{x-x_0}{\lambda_0} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_0 \\ q_0^{[1]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_0 - \frac{q_0^{[1]}(x-x_0)}{\lambda_0} \\ q_0^{[1]} \end{pmatrix}, \\ \bar{Y}_1(x) &= \begin{pmatrix} 1 & \frac{x-x_1}{\lambda_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_0 - \frac{q_0^{[1]}(x_1-x_0)}{\lambda_0} \\ q_0^{[1]} + s_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_0 - \frac{q_0^{[1]}(x_1-x_0)}{\lambda_0} - \frac{x-x_1}{\lambda_1}(q_0^{[1]} + s_1) \\ q_0^{[1]} + s_1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (13)$$

зокрема, в точці $x=x_2$

$$\bar{Y}_1(x_2) = \begin{pmatrix} t_0 - \frac{q_0^{[1]}(x_1-x_0)}{\lambda_0} - \frac{x-x_1}{\lambda_1}(q_0^{[1]} + s_1) \\ q_0^{[1]} + s_1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

або остаточно температура та тепловий потік в точці $x=x_2$ відповідно такі:

$$\begin{cases} t(x_2) = t_0 - \frac{q_0^{[1]}(x_1-x_0)}{\lambda_0} - \frac{x_2-x_1}{\lambda_1} \cdot (q_0^{[1]} + s_1), \\ q^{[1]}(x_2) = q_0^{[1]} + s_1 \end{cases}, \quad (15)$$

або остаточно температура точці $x=x_2$, враховуючи зменшення відстані від осередку вогнища, відповідно:

$$t(x_2) = t_0 - \frac{q_0^{[1]}(x_1-x_0)}{\lambda_0} - \frac{q_0^{[1]}(x_2-x_1)}{\lambda_1} - \frac{q_0^{[1]}(x_1)}{\lambda_2}. \quad (16)$$

Приймаємо, що:

t_0 – температура зовнішньої стінки на відстані x , мм;

$q_0^{[1]}$ – густина теплового потоку, Вт/м²;

$x_1 - x_0 = \delta_1$ – товщина зовнішньої стінки (оцинкований лист), мм;

$x_2 - x_1 = \delta_3$ – товщина ізолюючого матеріалу (шлакова вата), мм;

$x_1 = \delta_2$ – товщина з'єднувального матеріалу (бітумно-полімерна мастика Ceresit BT41), мм;

λ_0 – коефіцієнт теплопровідності зовнішньої стінки, Вт/м·К;

λ_1 – коефіцієнт теплопровідності ізолюючого матеріалу, Вт/м·К;

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності з'єднувального матеріалу, Вт/м·К.

Висновки. На підставі запропонованого моделювання, буде розроблено захисний кожух запропонованого варіанта для теплового захисту системи керування дистанційно керуваного пожежного устаткування та будуть проведені експериментальні дослідження, що дасть змогу покращити технічні характеристики самого устаткування з можливістю подачі вогнегасних засобів на ближчих відстанях до осередку пожежі.

Список літератури:

1. Беликов А.С., Шлыков Н.Ю., Кияница А.О. Оценка стойкости огнезащитных покрытий //Сб. научн. тр. «Строительство, Материаловедение, Машиностроение».– Дн-ск: ПГАСА, 2003. – Вып.№24. – С.98-103.

2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е. перераб. и доп. М., «Энергия», 1975. 488с.

Р.М. Тацкий, Д.В. Руденко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ДВУХСЛОЙНОМ ЗАЩИТНОМ КОЖУХЕ ПОЖАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При разрабатывании дистанционно управляемого пожарного оборудования одной из основных задач есть обеспечение защиты системы управления от теплового излучения, которое в свою очередь приведет к уменьшению расстояния подачи огнетушительных средств к ячейке пожара. Рассмотрена методика расчета температуры на поверхности пожарного оборудования под действием теплового потока очага и температуры в зоне размещения конструктивных элементов системы управления пожарного оборудования

Ключевые слова: дистанционно управляемое пожарное оборудование, защита от теплового излучения, улучшение тушения

R.M. Tatsiy, D.V. Rudenko

MODELLING OF FIELD TEMPERATURE IN DOUBLE-LAYER PROTECTIVE COAT OF FIRE EQUIPMENT

At development distance guided fire equipment one of the basic tasks is providing of system control defence from heat radiation which will be will be resulted in diminishing of distance of fire-extinguisher facilities serving to fire origin. The method of temperature calculation on the surface of fire equipment is considered under the action of thermal stream of fire and temperature in the area of structural elements of system control of fire equipment.

Key words: distance guided fire equipments, protection from heat radiation, improvement of extinguishing

