

*С.Ю. Рагімов, к.т.н., доцент, НУЦЗУ,
Ю.М. Сенчихін, к.т.н., професор, НУЦЗУ,
Н.В. Долгополова, к.т.н., с.н.с., ІПМаш НАН України*

РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАХИСНОГО ШОЛОМУ РЯТУВАЛЬНИКА

(представлено д.т.н. Тарасенком О.А.)

Проаналізовано важливість підвищення захисних якостей забрала шолому-каска від теплової дії. Запропоновано метод розв'язання стаціонарної задачі теплопровідності багатопарового захисного забрала каски при впливі температурних полів.

Ключові слова: безпека, захисні каски і забрала, теплопровідність, багатопарове оскління, оболонка.

Постановка проблеми. Питання про захист рятувальників, що працюють в умовах підвищеного ризику вирішується спеціальним екіпіруванням, де одним з невід'ємних елементів є ударно-захисний шолом-каска, що захищає найбільш вразливу і життєво важливу частину тіла людини – голову. Варто підкреслити, що для безпечної роботи рятувальників, необхідно мати ефективний і надійний захист, перш за все, обличчя, шиї та органів зору від механічного, променевого та теплових впливів, що виникають при пожежах. Тому важливим є вдосконалення захисту рятувальників від небажаних дій, а саме теплового випромінювання, здебільшого на обличчя та органи зору [1].

Однією із проблем є відсутність достатньо обґрунтованих методів розрахунку параметрів теплового стану елементів захисного шолому рятувальника, що не дає можливості аналізувати та надавати необхідні пропозиції для роботи рятувальників в умовах теплової дії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При вивченні досліджень захисних заходів на предмет теплової дії на пожежних рятувальників майже не знайдено робіт щодо забрала касок. Велика частина робіт в цьому напрямку присвячена дослідженню теплозахисних костюмів рятувальників та безпеки захисту касок від механічного впливу [2, 3]. Але в роботі [4] детально розглянуті питання моделювання теплового впливу на пожежний шолом. Для того, щоб краще зрозуміти явища теплопередачі, що мали місце в експериментах в даній роботі, було розроблено дві різні моделі теплопередачі. Обидві моделі є одновимірними. Перша модель була базується на основі постійного падаючого теплового потоку на зовнішню поверхню оболонки шолома-каска. Друга модель, більш точно відображає фактичні експериментальні променисті умови теплопередачі.

У статті [5] запропоновано альтернативний варіант методу граничних елементів до розв'язання задач згину пластин, які перебувають у температурному полі. Для розв'язання задач термопружного згину багат шарових оболонок, як правило, застосовуються чисельні методи, такі, як методи скінченних різниць та скінченних елементів [6-8].

Таким чином, розробка ефективних методів, що дозволяють представити розв'язок задачі в аналітичному або чисельно-аналітичному вигляді, залишається актуальною задачею.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є розробка методу розрахунку параметрів теплового стану елементів захисного шолому рятувальника з підвищеними параметрами термосилового навантаження при впливі температурних полів, що трапляються при виникненні НС.

Розглянемо елемент захисного забрала, як незамкнену багат шарову циліндричну оболонку, яка складається з I шарів та отримаємо розв'язок задачі теплопровідності. Циліндрична оболонка розглядується в декартовій системі координат, яка прив'язується до внутрішньої поверхні забрала (рис. 1).

На координатній площині пластина займає область Ω , що обмежена контуром прямокутника. На зовнішніх S_0 , S_I і бічній $S_L = \sum_{i=1}^I S_L^i$, поверхнях оболонки відбувається конвективний теплообмін.

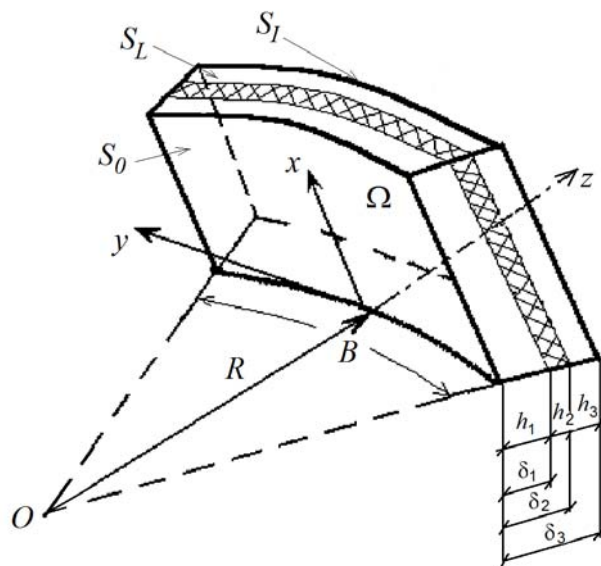


Рис. 1. Геометрія елемента захисного забрала

Нестационарний перенос тепла теплопровідністю описується рівнянням

$$\rho_i c_i \frac{\partial T^i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T^i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T^i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T^i}{\partial z} \right) + Q_i(x, y, z, t). \quad (1)$$

Рівняння теплопровідності і граничні умови для багат шарової оболонки одержують із варіаційного рівняння теплового балансу [6].

Розподіл температури в шарах пластини визначається за допомогою рівнянь

$$-\frac{\rho_i c_i}{k_i} \dot{T}^i + \Delta_R T^i = -\frac{Q^i}{k_i}; \Delta_R = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{RR_z} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; R_z = 1 + \frac{z}{R};$$

$$(x, y) \in \Omega; \delta_{i-1} \leq z \leq \delta_i; i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

де i – номер шару; $\delta_i = \sum_{j=1}^i h_j$, h_j – товщина j -го шару; T^i – температура i -го шару; Q^i – внутрішнє джерело тепла i -го шару; ρ_i – щільність матеріалу i -го шару; c_i – теплоємність матеріалу i -го шару; k_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -го шару; R – радіус кривизни поверхні Ω .

Та граничних умов на бічних поверхнях

$$\frac{\partial T^i}{\partial n} + \frac{H_L^i}{k_i} (T^i - T_L^i) = 0; (x, y, z) \in S_L^i; i = \overline{1, I}, \quad (3)$$

де T_L^i – температура на бічній поверхні i -го шару; H_L^i – коефіцієнт конвективного теплообміну на бічній поверхні i -го шару, яка визначається умовами конвективного теплообміну на верхній і нижній поверхнях оболонки

$$\frac{\partial T^1}{\partial z} + \frac{H_1}{k_1} (T^1 - T_\infty^1) = 0; z = 0$$

$$\frac{\partial T^1}{\partial z} + \frac{H_I}{k_1} (T^1 - T_\infty^I) = 0; z = \delta_I, \quad (4)$$

де T_∞^1 та T_∞^I – температура середовища на границях з першим та I -м шаром, H_1 та H_I – коефіцієнти конвективного теплообміну на внутрішній і зовнішній поверхнях пакету відповідно.

А також, початковими умовами

$$T^i = T_0^i, t = 0. \quad (5)$$

Умови рівності потоків тепла і температур на границях контакту сусідніх шарів з урахуванням можливих теплових впливів на поверхнях шарів запишемо як

$$k_i \frac{\partial T^i}{\partial z} + k_{i+1} \frac{\partial T^{i+1}}{\partial z} = 0; \quad T^i = T^{i+1}; \quad z = \delta_i. \quad (6)$$

Похідні невідомої функції по поперечній координаті z , що входять в рівняння (2), а також умови (4) та (6), замінимо їх кінцево-різницеvim представленням. Для цього будемо використовувати симетричні різності [9].

$$\frac{\partial T_r^i}{\partial z} = \frac{T_{r+1}^i - T_{r-1}^i}{2\Delta_{hi}}, \quad \frac{\partial^2 T_r^i}{\partial z^2} = \frac{T_{r+1}^i - 2T_r^i + T_{r-1}^i}{\Delta_{hi}^2}, \quad (7)$$

де $\Delta_{hi} = \frac{h_i}{r_i}$ – шаг сітки, $r_i + 1$ – кількість вузлів в i -тому шарі; T_r^i – значення шуканої функції в r -му вузлі i -го шару.

В результаті система рівнянь (1) приймає вигляд

$$\begin{aligned} -\Delta_{hi}^2 \frac{\rho_i c_i}{k_i} \dot{T}^i + \left(1 - \frac{\Delta_{hi}}{2RR_r^i}\right) T_{r-1}^i - \left(2 + \Delta_{hi}^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{(R_r^i)^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\right) T_r^i + \\ + \left(1 - \frac{\Delta_{hi}}{2RR_r^i}\right) T_{r+1}^i = -\frac{\Delta_{hi}^2}{k_i} Q_r^i, \quad R_r^i = 1 + \frac{\delta_{i-1} + r\Delta_{hi}}{R}. \end{aligned} \quad (8)$$

Умови конвективного теплообміну на верхній і нижній поверхнях оболонки (4) і умови на кордоні контакту сусідніх шарів (6) має вигляд:

$$\begin{aligned} -\left(\frac{T_1^1 - T_{-1}^1}{2\Delta_{h1}}\right) + \frac{H_1}{k_1} (T_0^1 - T_\infty^1) = 0, \quad z = 0; \\ \left(\frac{T_{r_1+1}^1 - T_{r_1-1}^1}{2\Delta_{h1}}\right) + \frac{H_1}{k_1} (T_{r_1}^1 - T_\infty^1) = 0, \quad z = \delta_1, \end{aligned} \quad (9)$$

$$k_i \left(\frac{T_{r_i+1}^1 - T_{r_i-1}^1}{2\Delta_{hi}}\right) + k_{i+1} \left(\frac{T_1^{i+1} - T_{-1}^{i+1}}{2\Delta_{hi+1}}\right) = 0, \quad T^i = T^{i+1}, \quad z = \delta_i. \quad (10)$$

Рівняння (9) та (10) дають можливість виключити з системи (8) значення функцій, які треба знайти в вузлових точках з номерами $r=-1$ та $r=r_i+1$ в i -му шарі ($i = 1, I$), а також з номерами $r=0$ (в усіх шарах, окрім 1-го).

В результаті отримаємо систему рівнянь, що має вигляд

$$[A]T = B + [C]Q. \quad (11)$$

Звідси отримуємо систему рівнянь теплопровідності і систему граничних умов на бічній поверхні оболонки.

Висновки. Проведено аналіз літературних джерел, що дозволяє зробити висновки про доцільність вивчення впливу тепла на захисні каски-шоломи та окремо забрала, що захищає обличчя рятувальників від шкідливої дії тепла.

Запропоновано метод розв'язання задачі стаціонарної теплопровідності в тривимірній постановці для багат шарових циліндричних захисних щитків шолома рятувальника, який дозволяє достовірно описувати тепловий стан багат шарових елементів, зібраних з шарів з різними механічними характеристиками.

Отримані системи рівнянь дають можливість провести розрахункове проектування захисних елементів шолому-каска та запропонувати нові напрямки вдосконалення теплового захисту обличчя рятувальників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Засоби індивідуального захисту голови. Каски пожежні (EN 443:1997, IDT): ДСТУ EN 443:2006. – [Чинний від 2007-01-10].

2. Обеспечение безопасности головы работающего на объектах стройиндустрии в экстремальных условиях / А. С. Беликов, О. А. Сабитова, Н. В. Долгополова, А.С. Чаплыгин // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности. – 2015. – Вып. 83. – С. 23-29.

3. Комплексные исследования влияния динамической нагрузки, параметров толщины панели и радиуса кривизны на НДС лицевого щитка пожарного шлема / А. С. Беликов, О. А. Сабитова, Н. В. Долгополова, Е. В. Рабич // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности. – 2015. – Вып. 83. – С. 23-29.

4. Barnett David L., Evaluation of fire-fighting helmet surface technology for high radiant heat applications [Електронний ресурс]: University of Kentucky Master's Theses. – 2003. Paper 305. – 102 p. – Режим доступу: http://uknowledge.uky.edu/gradschool_theses/305.

5. Туровцев Г.В. Итерационный метод граничных интегральных уравнений для исследования изгиба температурного изгиба пластин / Г.В. Туровцев, А.Т. Шадманов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов. – Н. Новгород, 1991. – С. 35-39.

6. Федик И.И. Температурные поля и термонапряжения / И.И. Федик, В.С. Колесов, В.Н. Михайлов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.

7. Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях / В.А. Кудинов, Б.В. Аверин, Е.В. Стефанюк, С.А. Назаренко. – Самара: Самар. ГТУ, 2006. – 304 с.

8. Метод конечных элементов в механике твердых тел / [Сахаров А.С., Альтенбах И., Кислокий В.Н. и др.]. – Киев: Вища шк., 1980. – 480 с.

9. Бахвалов Н.С. Численные методы / Бахвалов Н.С. – М.: Наука, 1975. – 632 с.

Отримано редколегією 13.03.2017

С.Ю. Рагимов, Ю.Н. Сенчихин, Н.В. Долгополова

Разработка метода расчета параметров теплового состояния элементов защитной каски спасателя

Проанализирована важность повышения защитных качеств забрала шлема-каска от теплового воздействия. Предложен метод решения стационарной задачи теплопроводности многослойного защитного забрала каски при воздействии температурных полей.

Ключевые слова: безопасность, защитные каски и забрала, теплопроводность, многослойное остекление, оболочка.

S.U. Ragimov, J.N. Senchykhin, N.V. Dolgopolova

Development of a method for calculating the parameters of the thermal state of the elements of the protective helmet of the rescuer

The importance of increasing the protective qualities of helmet-helmet visor against heat exposure is analyzed. A method is proposed for solving the stationary problem of thermal conductivity of a multilayer protective visor of a helmet under the influence of temperature fields.

Keywords: safety, protective helmets and visor, thermal conductivity, multilayer glazing, shell.