

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ УЧАСТКИ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ ОДЕЖДЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

MODELING OF WARMTH TRANSFER PROCESS THROUGH THE SITES LOCATED AROUND A SEAM IN SPECIAL PURPOSE CLOTHES IN THE CONDITIONS OF NON-STATIONARY HEAT CONDUCTIVITY

В.П. Довыденкова*

Витебский государственный технологический университет

УДК 677.072.6 – 037.4

V. Davydenkava*

Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТНАЯ ОДЕЖДА ПОЖАРНЫХ, ПЕРФОРИРОВАННЫЙ МАТЕРИАЛ, ПЕРЕНОС ТЕПЛОТЫ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Объектами исследования являются узлы и соединения специальной защитной одежды пожарных, изготавливаемой из огнестойких многослойных материалов с металлизированным покрытием.

Целью работы является математическое моделирование процесса переноса теплоты через неповреждённые участки околошовной зоны одежды специального назначения в условиях нестационарной теплопроводности на базе применения метода сеток.

Рассмотрена и формализована задача моделирования механизма переноса теплоты через участки околошовной зоны одежды специального назначения. Представлены математические зависимости, отражающие изменение температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности неповреждённых околошовных участков защитной одежды в условиях нестационарной теплопроводности. Получена обобщённая математическая зависимость в виде системы уравнений, позволяющая моделировать, последовательно воспроизводить процесс нагрева и определять температуру и плотность теплового потока на внутренней поверхности огнестойкого металлизированного материала в любой момент времени. Данная зависимость является базовой для дальнейшего исследова-

ABSTRACT

SPECIAL PROTECTIVE CLOTHING FOR FIRE-GUARD, PERFORATED MATERIAL, WARMTH TRANSFER, FINITE DIFFERENCE METHOD

The problem of modeling of the mechanism of a warmth transfer through sites which are located around a seam in clothes of a special purpose are considered and formalized. The mathematical dependence, reflecting temperature and heat flux density changes in an internal surface of the integrity of the sites which are located round a seam in protective clothes in the conditions of non-stationary heat conductivity is presented. The generalized model is received which allows to simulate, and consistently reproduce process of heating and to determine temperature and a heat flux density on an internal surface of the multilayered metallized material at any moment of time. Adequacy to the received mathematical model is confirmed experimentally.

* E-mail: davydenkava@mail.ru (V. Davydenkava)

ния и визуализации процесса переноса теплоты через перфорированные иглой швейной машины участки специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий тяжелого типа в условиях нестационарной теплопроводности. Адекватность полученной базовой математической зависимости в виде системы уравнений подтверждена экспериментальными исследованиями.

Для обеспечения безопасных условий труда пожарных используется специальная одежда, защищающая от воздействия интенсивных тепловых потоков, высоких температур, механических и климатических воздействий. При её изготовлении в настоящее время все чаще применяются многослойные огнестойкие материалы. Металлизированные огнестойкие материалы на тканой основе обладают рядом преимуществ. Не теряя свойств, присущих текстилю (невысокая жёсткость, хорошая драпируемость, высокие прочностные характеристики), они приобретают свойства, присущие металлам (обладают электрической проводимостью, отражают тепловое и электромагнитное излучение).

При соединении деталей специальной защитной одежды из огнестойких металлизированных материалов с пленочным покрытием возникают повреждения металлизированного слоя и тканой основы. В процессе эксплуатации происходит постепенное увеличение размера отверстий от прокола иглы в местах ниточного скрепления, в результате чего между боковой поверхностью поры огнестойкого металлизированного материала и переплетением швейных ниток образуются зазоры, способствующие переносу влаги и теплоты.

Специальная защитная одежда, изготовленная из указанных материалов, предназначена для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и проведения аварийно-спасательных работ непосредственно вблизи или в очаге пожара. Несущественное и незаметное при визуальном осмотре повреждение огнестойкого металлизированного материала в околошовной зоне и последующая раздвижка нитей в швах не является индикатором очевидных повреждений,

но может привести к преждевременному отказу готового изделия во время его использования.

Для исключения возможных отказов специальной защитной одежды пожарных необходим всесторонний контроль, включающий исследование динамики изменения теплозащитных свойств огнестойкого металлизированного материала верха на неповрежденных участках и в местах соединения деталей, то есть в швах.

В настоящее время известен ряд работ российских и зарубежных ученых, посвященных исследованию теплозащитных свойств материалов (пакетов материалов). Однако теоретических исследований, описывающих механизм переноса теплоты через околошовные участки одежды, устанавливающих влияние размеров пор на изменение теплозащитных свойств готовых изделий, не существует.

Целью данной работы является математическое моделирование процесса переноса теплоты через неповрежденные участки околошовной зоны одежды специального назначения в условиях нестационарной теплопроводности на базе применения метода сеток. Полученная математическая зависимость будет являться исходной для исследования и визуализации процесса переноса теплоты через перфорированные иглой швейной машины участки одежды специальной защитной пожарной от повышенных тепловых воздействий тяжелого типа (далее ОСЗ ПТВ Т) в условиях нестационарной теплопроводности.

В работах российских и зарубежных исследователей решение задач теплопроводности в многослойных текстильных материалах (пакетах материалов) реализовано преимущественно с использованием классических методов расчёта

(метода разделения переменных, операционного). Однако получение точного аналитического решения применительно к процессу нагрева (охлаждения) текстильного многослойного материала зачастую связано с трудностью адекватного описания граничных условий, которые не всегда однозначны.

В реальных условиях ликвидации чрезвычайных ситуаций при воздействии высоких температур, интенсивного теплового излучения между источником теплоты и огнетермостойким металлизированным материалом происходит теплообмен, включающий: 1) сложный теплообмен между источником и внешней поверхностью огнетермостойкого металлизированного материала; 2) теплопроводность в огнетермостойком металлизированном материале; 3) конвективную теплоотдачу от внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала к внутреннему слою воздуха.

Сложный теплообмен, протекающий между источником и внешней поверхностью огнетермостойкого металлизированного материала, является результатом совместного действия конвекции и лучеиспускания. В данном случае огнетермостойкий металлизированный материал расположен в непосредственной близости к источнику излучения, соответственно плотность теплового потока, подводимого к внешней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала (q_1), определена без учета конвективной составляющей, так как основная часть теплоты передается лучеиспусканием. Расчёт лучистой составляющей теплообмена между источником и внешней поверхностью огнетермостойкого металлизированного материала подробно рассматривался ранее в [1]. Формула для определения плотности теплового потока, подводимого к внешней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала, записана в виде выражения:

$$q_1 = \frac{\varepsilon_{прив.} \cdot C_0}{10^8} (T_{ист.}^4 - T_{н1}^4), \quad (1)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $Вт/(м^2 \cdot К^4)$; $T_{ист.}$ – температура источника, которая в данном случае равна

температуре среды ($T_{с1}$) со стороны внешней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала, $К$; $T_{н1}$ – температура на внешней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала, $К$; $\varepsilon_{прив.}$ – приведенная поглощающая способность системы, определяемая по формуле:

$$\varepsilon_{прив.} = \frac{1}{\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1}, \quad (2)$$

где ε_1 – степень черноты источника излучения; ε_2 – степень черноты поверхности исследуемого огнетермостойкого металлизированного материала.

Зависимость для определения плотности теплового потока, отведенного от внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала (q_2) путем конвективной теплоотдачи была получена экспериментально, так как получить аналитическую зависимость, которая бы учитывала влияние всех факторов (объема пространства, физических свойств среды и т. п.), возникающих при проведении эксперимента в лабораторных условиях, не представляется возможным:

$$q_2 = 16 \exp [0,085 \Delta T_{вн.}], \quad (3)$$

где $\Delta T_{вн.}$ – изменение температуры на внутренней поверхности материала, $К$, определяемое по формуле:

$$\Delta T_{вн.} = T_{н2} - T_{с2}, \quad (4)$$

где $T_{н2}$ – температура на внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала, $К$; $T_{с2}$ – температура среды со стороны внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала, $К$.

При проведении работ вблизи источника теплового излучения происходит постепенное нагревание огнетермостойкого металлизированного материала, то есть имеет место процесс

переноса теплоты внутри твердого тела при нестационарном режиме.

В настоящее время существует множество различных численных методов расчёта теплопроводности, которые дают хорошее приближение к решению задач, трудноразрешимых при помощи аналитических методов. Из численных методов решения задач теплопроводности в настоящее время наиболее широко используется метод конечных разностей (метод сеток) [2].

Решение поставленной задачи методом конечных разностей сводится к разбиению огнетермостойкого металлизированного многослойного материала на элементарные объёмы, как показано на рисунке 1, с выделением опорных узловых точек: 1 – на границе «воздух – металлизированный слой»; 2 – внутри расчетной области «металлизированный слой»; 3 – на границе «металлизированный слой – слой полимерной пленки»; 4 – внутри расчетной области «слой полимерной пленки»; 5 – на границе «слой полимерной пленки – слой стекловолокна»; 6 – внутри расчетной области «слой стекловолокна»; 7 – на границе «слой стекловолокна – воздух».

Должно выполняться равенство:

$$q_1 = q_2 + q_{н.м.},$$

где $q_{н.м.}$ – тепловой поток на нагрев огнетермостойкого металлизированного многослойного материала за время (τ) , $Вт/м^2$:

$$q_{н.м.} = \frac{\Delta U}{F \Delta \tau}.$$

Расход теплоты ($\Delta Q_{н.м.}$) на нагрев огнетермостойкого металлизированного многослойного материала, $Дж$:

$$\Delta Q_{н.м.} = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 = \Delta U_{\Sigma} = c\rho V(\Delta T),$$

где ΔT – разность температур между внешней и внутренней поверхностью огнетермостойкого металлизированного материала за время (τ) , $К$.

Для разработанной модели приняты следующие обозначения: ΔQ_1 – количество теплоты, подведенное к наружной поверхности огнетермостойкого металлизированного материала при нагревании, $Дж$; ΔQ_2 – количество теплоты, отведенное от внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала при нагревании, $Дж$; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – соответственно, толщина металлизированного слоя, слоя полимерной плёнки, слоя тканой основы огнетермостойкого металлизированного материала, $м$; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – соответственно, коэффициенты теплопроводности металлизированного слоя, слоя полимерной плёнки, слоя тканой основы огне-

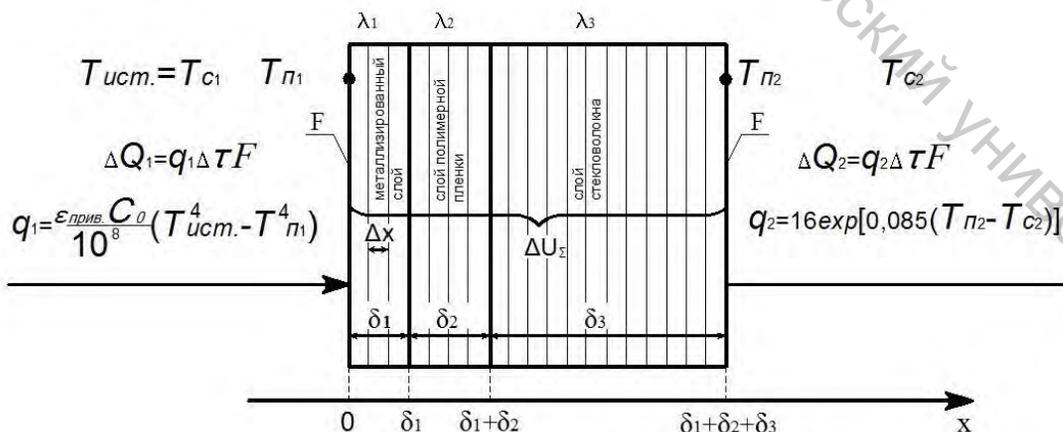


Рисунок 1 – К выводу уравнения для расчета температуры и плотности теплового потока в огнетермостойком металлизированном материале методом конечных разностей

термостойкого металлизированного материала, $\text{Вт/м} \cdot \text{°К}$; ΔU_{Σ} – суммарное изменение внутренней энергии огнетермостойкого металлизированного материала, Дж; Δx – элементарный шаг между узлами решетки, м; τ – время, с; F – площадь огнетермостойкого металлизированного многослойного материала, м^2 .

Максимально точное решение поставленной задачи возможно в случае, если величина элементарного шага стремиться к нулю, что позволяет базовую формулу для расчета теплового потока и дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье аппроксимировать разностными уравнениями [3]:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \Rightarrow q \approx -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}, \text{ если } \Delta x \rightarrow 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2}, \text{ если } \begin{cases} \Delta \tau \rightarrow 0 \\ \Delta x \rightarrow 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/м} \cdot \text{°К}$; q – плотность теплового потока, Вт/м^2 ; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для указанных элементарных объемов суммарное изменение внутренней энергии всей системы рассматривается как суммарное изменение внутренних энергий в каждом из перечисленных объемов:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\Sigma} = & \sum_{i=0}^{n_3} \Delta U(x_i, \tau) = \Delta U_1(0, \tau) + \sum_{i=1}^{n_1-1} \Delta U_2(x_i, \tau) + \\ & + \Delta U_3(\delta_1, \tau) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2-1} \Delta U_4(x_i, \tau) + \Delta U_5(\delta_1 + \delta_2, \tau) + \\ & + \sum_{i=n_2+1}^{n_3-1} \Delta U_6(x_i, \tau) + \Delta U_7(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \tau), \quad (7) \end{aligned}$$

где $\Delta U_1(0, \tau)$ – изменение внутренней энергии на границе «воздух – металлизированный слой» при наличии подводимого к наружной поверхности потока q_1 ; $\sum_{i=1}^{n_1-1} \Delta U_2(x_i, \tau)$ – изменение внутренней энергии внутри расчетной области «металлизированный слой»; $\Delta U_3(\delta_1, \tau)$ – изменение внутренней энергии на границе «металлизированный слой – слой полимерной пленки»;

$\sum_{i=n_1+1}^{n_2-1} \Delta U_4(x_i, \tau)$ – изменение внутренней энергии внутри расчетной области «слой полимерной пленки»; $\Delta U_5(\delta_1 + \delta_2, \tau)$ – изменение внутренней энергии на границе «слой металлизированной пленки – слой стекловолокна»; $\sum_{i=n_2+1}^{n_3-1} \Delta U_6(x_i, \tau)$ – изменение внутренней энергии внутри расчетной области «слой стекловолокна»; $\Delta U_7(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \tau)$ – изменение внутренней энергии на границе «слой стекловолокна – воздух» при наличии отведенного от внутренней поверхности потока q^2 ; $x_i = \Delta x \cdot i$ – координата i -ой узловой точки, м; n_1 – количество узловых точек в первом слое материала, определяемое по формуле:

$$n_1 = \frac{\delta_1}{\Delta x}, \quad (8)$$

где n_2 – количество узловых точек в первом и втором слоях материала, определяемое по выражению:

$$n_2 = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\Delta x}, \quad (9)$$

n_3 – суммарное количество узловых точек в материале, определяемое по формуле:

$$n_3 = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{\Delta x}. \quad (10)$$

Согласно закону сохранения энергии, с учетом уравнения (5), изменение внутренней энергии (ΔU_i) при наличии подводимого теплового потока (q_1) определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta U_1(0, \tau) = & \Delta Q_1 - \Delta Q(\Delta x, \tau) = q_1 F \Delta \tau - q(\Delta x, \tau) F \Delta \tau = \\ = & \left(q_1 - \left(-\lambda_1 \frac{\Delta T(0, \tau)}{\Delta x} \right) \right) F \Delta \tau = \lambda_1 \left(\frac{\Delta T(0, \tau)}{\Delta x} + \frac{q_1}{\lambda_1} \right) F \Delta \tau. \quad (11) \end{aligned}$$

Изменение внутренней энергии (ΔU) в любой точке огнетермостойкого металлизированного материала определяется выражением:

$$\Delta U = c p \Delta V \Delta T, \quad (12)$$

где c – массовая теплоемкость слоя огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{°К})$; ρ – плотность слоя огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; ΔV – элементарный объем, м^3 :

$$\Delta V = F \cdot \Delta x. \quad (13)$$

Алгебраические преобразования выражения (12), позволяют определить изменение температуры во времени по формуле:

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{\Delta U}{c\rho\Delta V\Delta \tau} = \frac{\Delta U}{c\rho\Delta x\Delta \tau}. \quad (14)$$

Изменение температуры наружной поверхности огнетермостойкого металлизированного материала во времени определяется с использованием закона теплопроводности Фурье [4] и зависимости (14), по формуле:

$$\frac{\Delta T(0, \tau)}{\Delta \tau} = \frac{\lambda_1}{c_1\rho_1\Delta x} \left(\frac{\Delta T(0, \tau)}{\Delta x} + \frac{q_1}{\lambda_1} \right), \quad (15)$$

где c_1 – удельная массовая теплоемкость металлизированного слоя огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{°К})$; ρ_1 – плотность металлизированного слоя огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Аналогично (11) выражение для определения изменения внутренней энергии для узловой точки, лежащей внутри расчетной области «металлизированный слой», имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta U_2(x, \tau) &= \Delta Q(x - \Delta x, \tau) - \Delta Q(x + \Delta x, \tau) = \\ &= (q(x - \Delta x, \tau) - q(x + \Delta x, \tau))F\Delta \tau = \\ &= \left(-\lambda_1 \frac{-(T(x - \Delta x, \tau) - T(x, \tau))}{\Delta x} - \right. \\ &\left. - \left(-\lambda_1 \left(\frac{-(T(x, \tau) - T(x + \Delta x, \tau))}{\Delta x} \right) \right) \right) F\Delta \tau = \\ &= \lambda_1 \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right) F\Delta \tau. \quad (16) \end{aligned}$$

Аналогично уравнению (15) неизвестная температура для узловой точки, лежащей внутри

расчетной области «металлизированный слой», определяется выражением:

$$\frac{\Delta T(x, \tau)}{\Delta \tau} = \frac{\lambda_1}{c_1\rho_1\Delta x} \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right). \quad (17)$$

В соответствии с выражением (16) изменение внутренней энергии для узловой точки, лежащей на границе расчетной области «металлизированный слой – слой полимерной пленки», будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Delta U_3(\delta_1, \tau) &= \Delta Q(\delta_1 - \Delta x, \tau) - \Delta Q(\delta_1 + \Delta x, \tau) = \\ &= (q(\delta_1 - \Delta x, \tau) - q(\delta_1 + \Delta x, \tau))F\Delta \tau = \\ &= \left(\lambda_1 \frac{T(\delta_1 - \Delta x, \tau) - T(\delta_1, \tau)}{\Delta x} - \lambda_2 \frac{T(\delta_1, \tau) - T(\delta_1 + \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right) F\Delta \tau. \quad (18) \end{aligned}$$

Для определения неизвестной температуры узловых точек, лежащих на границе (стыке слоев материала), необходимо рассчитать приведенные значения теплоемкости и плотности. Величина приведенной теплоемкости определяется по формуле:

$$c_{ij} = \frac{c_i\rho_i + c_j\rho_j}{\rho_i + \rho_j}, \quad (19)$$

где c_{ij} – приведенная массовая теплоемкость узловой точки, лежащей на стыке i -го и j -го слоев огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{°К})$; c_i – удельная массовая теплоемкость i -го слоя огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{°К})$; c_j – удельная массовая теплоемкость j -го слоя огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{°К})$; ρ_i – плотность i -го слоя огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_j – плотность j -го слоя огнетермостойкого металлизированного материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Приведенная плотность огнетермостойкого металлизированного материала (ρ_{ij}) рассчитывается по формуле:

$$\rho_{ij} = \frac{\rho_i + \rho_j}{2}. \quad (20)$$

Аналогично выражению (17) неизвестная температура для узловой точки, лежащей на границе «металлизированный слой – слой полимерной пленки» будет иметь вид:

$$\frac{\Delta T(\delta_1, \tau)}{\Delta \tau} = \frac{2}{(c_3 \rho_3 + c_2 \rho_2) \Delta x} \times \left(\lambda_1 \frac{T(\delta_1 - \Delta x, \tau) - T(\delta_1, \tau)}{\Delta x} - \lambda_2 \frac{T(\delta_1, \tau) - T(\delta_1 + \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right). \quad (21)$$

Расчет изменения внутренней энергии и температуры внутри расчетных областей «слой полимерной пленки», «слой стекловолокна» ($\Delta U_4(x, \tau)$, $\Delta U_6(x, \tau)$) аналогичен расчету изменения внутренней энергии и температуры для узловой точки, лежащей внутри расчетной области «металлизированный слой» ($\Delta U_2(x, \tau)$), поэтому далее подробно не рассматривается.

Расчет изменения внутренней энергии и температуры на границе «слой металлизированной пленки – слой стекловолокна» ($\Delta U_5(\delta_1 + \delta_2, \tau)$) аналогичен расчету изменения внутренней энергии и температуры для узловой точки, лежащей на границе расчетной области «металлизированный слой – слой полимерной пленки» ($\Delta U_3(\delta_1, \tau)$), поэтому далее подробно не рассматривается.

Согласно закону сохранения энергии количество теплоты, отведенное с внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала, определяется выражением:

$$\Delta Q(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \Delta x, \tau) - \Delta U(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \tau) = \Delta Q_2. \quad (22)$$

Тогда расчет изменения внутренней энергии на границе «слой стекловолокна – воздух» при наличии отведенного от внутренней поверхности потока (q_2) выполняется по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta U_7(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \tau) &= -\Delta Q_2 + \Delta Q(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \Delta x, \tau) = \\ &= -q_2 F \Delta \tau + q(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \Delta x, \tau) F \Delta \tau = \\ &= -\lambda_3 \left(\frac{q_2}{\lambda_3} + \frac{\Delta T(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right) F \Delta \tau. \end{aligned} \quad (23)$$

В соответствии с выражением (17) формула для определения неизвестной температуры для узловой точки, лежащей на границе «слой стекловолокна – воздух», будет иметь вид:

$$\frac{\Delta T(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \tau)}{\Delta \tau} = - \frac{\lambda_3}{c_3 \rho_3 \Delta x} \left(\frac{q_2}{\lambda_3} + \frac{\Delta T(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right). \quad (24)$$

После преобразования выражения (7) с учетом выражений (11), (16), (17), (23) получена расчетная формула (25) для определения внутренней энергии огнетермостойкого металлизированного материала в условиях нестационарной теплопроводности (при нагреве):

$$\begin{aligned} \Delta U_{\Sigma} &= \lambda_1 \left(\frac{\Delta T(0, \tau)}{\Delta x} + \frac{q_1}{\lambda_1} \right) F \Delta \tau + \\ &+ \sum_{i=1}^{n_1-1} \lambda_1 \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right) F \Delta \tau + \\ &+ \left(\lambda_1 \frac{T(\delta_1 - \Delta x, \tau) - T(\delta_1, \tau)}{\Delta x} - \lambda_2 \frac{T(\delta_1, \tau) - T(\delta_1 + \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right) F \Delta \tau + \\ &+ \sum_{i=n_1+1}^{n_2-1} \lambda_2 \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right) F \Delta \tau + \\ &+ \left(\lambda_2 \frac{T(\delta_1 + \delta_2 - \Delta x, \tau) - T(\delta_1 + \delta_2, \tau)}{\Delta x} - \right. \\ &\left. - \lambda_3 \frac{T(\delta_1 + \delta_2, \tau) - T(\delta_1 + \delta_2 + \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right) F \Delta \tau + \\ &+ \sum_{i=n_2+1}^{n_3-1} \lambda_3 \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right) F \Delta \tau - \\ &- \lambda_3 \left(\frac{q_2}{\lambda_3} + \frac{\Delta T(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right) F \Delta \tau. \end{aligned} \quad (25)$$

Согласно закону сохранения энергии, изменение внутренней энергии огнетермостойкого металлизированного материала определяется выражением:

$$q_1 F \Delta \tau - q_2 F \Delta \tau = \Delta U_{\Sigma}. \quad (26)$$

Тогда расчетную формулу (25) можно записать в виде выражения:

$$\begin{aligned}
 & \lambda_1 \left(\frac{\Delta T(0, \tau)}{\Delta x} \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \lambda_1 \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right) + \lambda_1 \frac{T(\delta_1 - \Delta x, \tau) - T(\delta_1, \tau)}{\Delta x} - \\
 & - \lambda_2 \frac{T(\delta_1, \tau) - T(\delta_1 + \Delta x, \tau)}{\Delta x} + \sum_{i=m+1}^{n_2-1} \lambda_2 \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right) + \\
 & + \lambda_2 \frac{T(\delta_1 + \delta_2 - \Delta x, \tau) - T(\delta_1 + \delta_2, \tau)}{\Delta x} - \lambda_3 \frac{T(\delta_1 + \delta_2, \tau) - T(\delta_1 + \delta_2 + \Delta x, \tau)}{\Delta x} + \\
 & + \sum_{i=m+1}^{n_3-1} \lambda_3 \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right) - \lambda_3 \frac{\Delta T(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \Delta x, \tau)}{\Delta x} = 0. \tag{27}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta T(x)}{\Delta \tau} = \begin{cases} \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1 \Delta x} \left(\frac{\Delta T(0, \tau)}{\Delta x} + \frac{q_1}{\lambda_1} \right), \text{ если } x = 0; \\ \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1 \Delta x} \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right), \text{ если } 0 < x < \delta_1; \\ \frac{2}{(c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2) \Delta x} \left(\lambda_1 \frac{T(\delta_1 - \Delta x, \tau) - T(\delta_1, \tau)}{\Delta x} - \lambda_2 \frac{T(\delta_1, \tau) - T(\delta_1 + \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right), \text{ если } x = \delta_1; \\ \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2 \Delta x} \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right), \text{ если } \delta_1 < x < \delta_1 + \delta_2; \\ \frac{2}{(c_2 \rho_2 + c_3 \rho_3) \Delta x} \left(\lambda_2 \frac{T(\delta_1 + \delta_2 - \Delta x, \tau) - T(\delta_1 + \delta_2, \tau)}{\Delta x} - \lambda_3 \frac{T(\delta_1 + \delta_2, \tau) - T(\delta_1 + \delta_2 + \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right), \text{ если } x = \delta_1 + \delta_2; \\ \frac{\lambda_3}{c_3 \rho_3 \Delta x} \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right), \text{ если } \delta_1 + \delta_2 < x < \delta_1 + \delta_2 + \delta_3; \\ - \frac{\lambda_3}{c_3 \rho_3 \Delta x} \left(\frac{q_2}{\lambda_3} + \frac{\Delta T(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right), \text{ если } x = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3; \\ q_1 = \frac{\varepsilon_{прив.} \cdot C_0}{10^8} (T_{уст.}^4 - T_{м1}^4); \\ q_2 = 16 \exp [0,085 (T_{n2} - T_{c2})]. \end{cases} \tag{28}$$

Таким образом, применение численного интегрирования, основанного на методе конечных разностей и методе тепловых балансов, позволяет представить расчет нагрева огнетермостойкого металлизированного материала в виде системы уравнений (28). Многократное повторение решений системы (28) с применением средств

автоматизированного вычисления позволяет моделировать и последовательно воспроизводить процесс нагрева огнетермостойкого металлизированного материала.

Система уравнений (28) описывает процесс переноса теплоты через огнетермостойкий металлизированный материал, состоящий из трех

слоев. Однако анализ зависимостей, составляющих данную систему, позволяет записать выражение для расчета температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности металлизированного многослойного материала (пакета материалов) в условиях нестационарной теплопроводности для любого количества слоев в виде системы уравнений:

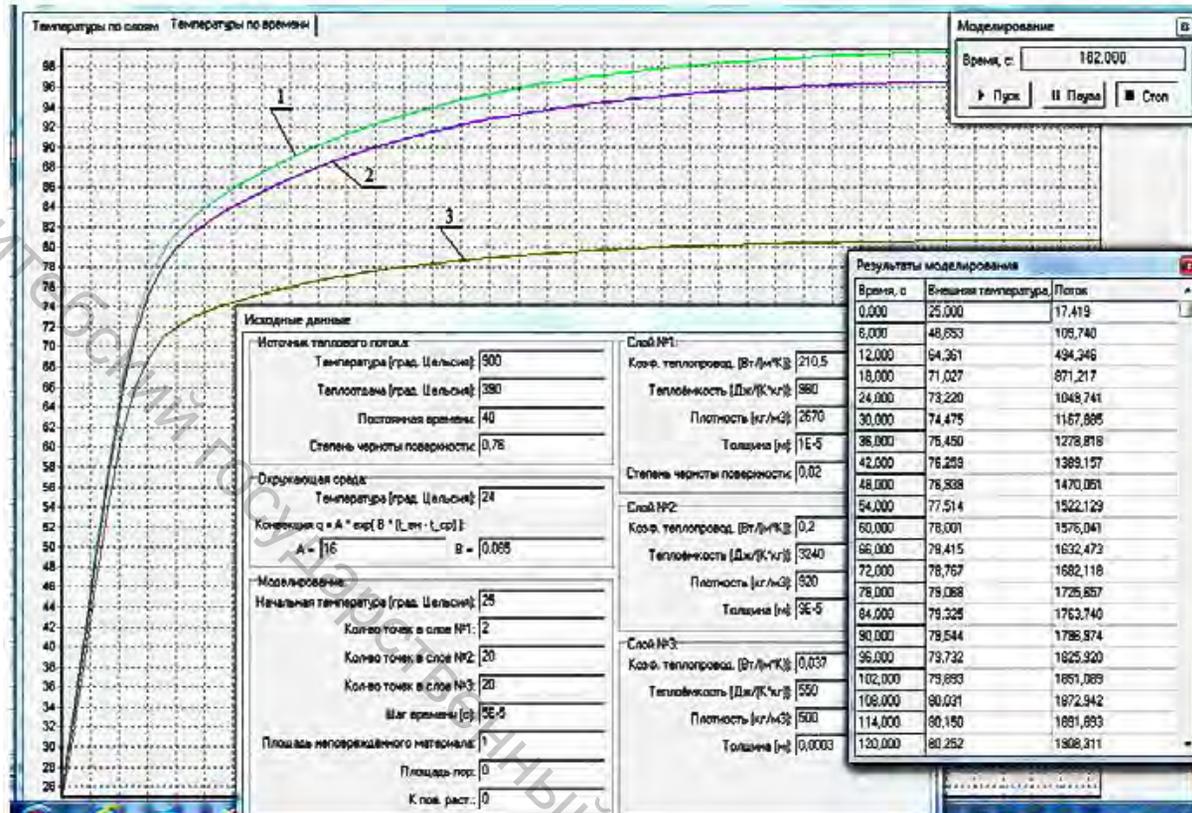
с возможностью визуализации процесса переноса теплоты через огнетермостойкий металлизированный материал. Исходные данные, результаты теоретических исследований, внешний вид интерфейса программы представлены на рисунке 2.

$$\frac{\Delta T_i(x)}{\Delta \tau} = \begin{cases} \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1 \Delta x} \left(\frac{\Delta T(0, \tau)}{\Delta x} + \frac{q_1}{\lambda_1} \right), & \text{если } x = 0; \\ \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i \Delta x} \left(\frac{T(x - \Delta x, \tau) + T(x + \Delta x, \tau) - 2T(x, \tau)}{\Delta x} \right), & \text{если } 0 < x < \delta_1; \delta_1 < x < \delta_2 \dots \delta_{i-1} < x < \delta_{i+1} \\ \frac{\lambda_i}{2} \frac{T(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_i - \Delta x, \tau) - T(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_i, \tau)}{\Delta x} - \\ \frac{\lambda_{i+1}}{2} \frac{T(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_i, \tau) - T(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_i + \Delta x, \tau)}{\Delta x} \Bigg) \cdot \frac{1}{(c_i \rho_i + c_j \rho_j) \Delta x}, & \text{если } x = \delta_1; \delta_1 + \delta_2; \dots; \delta_1 + \dots + \delta_2; \\ - \frac{\lambda_n}{c_n \rho_n \Delta x} \left(\frac{q_2}{\lambda_n} + \frac{\Delta T(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_{n-1} + \delta_n - \Delta x, \tau)}{\Delta x} \right), & \text{если } x = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n; \\ q_1 = \frac{\varepsilon_{\text{прив.}} \cdot C_0}{10^8} (T_{\text{ист.}}^4 - T_{n1}^4); \\ q_2 = 16 \exp [0,085 (T_{n2} - T_{c2})]. \end{cases} \quad (29)$$

где $\Delta T_i(x)$ – изменение температуры огнетермостойкого многослойного металлизированного материала за время (τ), **К**; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя огнетермостойкого металлизированного материала, **Вт/м · °К**; δ_i – толщина i -го слоя огнетермостойкого металлизированного материала, **м**; λ_n – коэффициент теплопроводности n -го (последнего) слоя огнетермостойкого металлизированного материала, **Вт/м · °К**; c_n – удельная массовая теплоемкость n -го (последнего) слоя огнетермостойкого металлизированного материала, **кДж/(кг · °К)**; ρ_n – плотность n -го (последнего) слоя огнетермостойкого металлизированного материала, **кг/м³**.

Полученные математические зависимости предполагают обработку большого массива данных. Поэтому для реализации расчетов разработан специализированный программный продукт

Для оценки результатов теоретических исследований в испытательной лаборатории учреждения «Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь» определены экспериментальные значения изменения температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала торговой марки «Alfa-Maritex» (стекловолокно, 100 %, поверхностная плотность $460 \pm 10 \text{ г/м}^2$) при плотности теплового потока, падающего на пробу 40 кВт/м^2 в течение 120 с. Испытания проводились согласно СТБ 1972-2009 (п. 9.26, стр. 11) при температуре окружающей среды $22 \pm 1^\circ\text{C}$ [5]. Сопоставление значений расчётных и экспериментально определённых температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала представлены в таблице 1.



1 – графическая зависимость изменения температуры от времени на границе «металлизированный слой - слой полимерной пленки» (δ_1); 2 – графическая зависимость изменения температуры от времени на границе «слой полимерной плёнки - слой стекловолокна» ($\delta_1 + \delta_2$); 3 – графическая зависимость изменения температуры от времени на внутренней поверхности слоя тканой основы из стекловолокна ($\delta_1 + \delta_2 + \delta_3$)

Рисунок 2 – Исходные данные, результаты теоретических исследований и внешний вид интерфейса программы для определения температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного многослойного материала

Анализ таблицы 1 показывает, что в диапазоне $24 < \tau \leq 120$ относительная погрешность результатов теоретических и экспериментальных исследований температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности неповрежденного участка огнетермостойкого металлизированного материала не превышает 7 %, что говорит о хорошей сходимости результатов и адекватности построенной математической зависимости. В диапазоне $0 < \tau \leq 24$ относительная погрешность результатов теоретических и экспериментальных исследований указанных параметров превышает 7 %, что объясняется не-

возможностью учета всех факторов, влияющих на процесс теплообмена в реальных условиях.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода конечных разностей получена математическая зависимость процесса переноса теплоты через неповреждённые участки огнетермостойкого металлизированного материала, используемого при изготовлении наружного защитного слоя ОСЗ ПТВ Т, в условиях нестационарной теплопроводности. Разработан программный продукт, позволяющий моделировать, последовательно воспроизводить процесс нагрева и определять температуру и плотность

Таблица 1 – Результаты экспериментальных и теоретических исследований температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала «Alfa-Maritex» (волокнистый состав – стекловолокно, 100 %, поверхностная плотность $460 \pm 10 \text{ г/м}^2$)

Время воздействия, $t, \text{ с}$	Температура на внутренней поверхности, $t, \text{ }^\circ\text{C}$		Плотность теплового потока на внутренней поверхности, $q_2, \text{ кВт/м}^2$	
	экспериментальная	расчетная (модель 28)	экспериментальная	расчетная (модель 28)
1	2	3	4	5
0	25	25	0,22	0,02
6	44	46,7	0,37	0,11
12	54	64,4	0,62	0,49
18	59	71,0	0,86	0,87
24	65	73,2	1,05	1,05
30	70	74,5	1,24	1,17
36	72	75,5	1,37	1,28
42	75	76,3	1,49	1,39
48	76	76,9	1,57	1,47
54	79	77,5	1,63	1,52
60	81	78,0	1,68	1,58
66	82	78,4	1,72	1,63
72	83	78,8	1,78	1,68
78	84	79,1	1,83	1,73
84	84	79,3	1,85	1,76
90	85	79,5	1,86	1,80
96	85	79,7	1,86	1,83
102	86	79,9	1,88	1,85
108	86	80,0	1,89	1,87
114	86	80,2	1,89	1,89
120	86	80,3	1,89	1,91

теплового потока на внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала в любой момент времени. Проведённые теоретические исследования показали хорошую сходимость результатов с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность полученной математической зависимости и возможность её дальнейшего использования в качестве базовой для исследования процесса переноса теплоты через перфорированные иглой швейной машины участки околосшовной зоны ОСЗ ПТВ Т в условиях нестационарной теплопроводности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Довыденкова, В.П., Ольшанский, В.И., Дмитрикович, Н.М., Прохоров, А.П. (2013), Расчет теплофизических параметров материала верха специальной защитной одежды пожарных с применением средств автоматизированного вычисления, *Чрезвычайные ситуации: Предупреждение и ликвидация*, 2013, № 1 (33), С. – 94-102.
2. Numerical methods in heat conduction [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kostic.niu.edu/555/_555-posted/cen-ch05-cond-num.pdf. – Дата доступа: 21.02.2017.
3. Рудобашта, С.П. *Теплотехника*, (2010), Колас, Москва, 599 с.
4. Михеев, М.А., Михеева, И.М. (1973), *Основы теплопередачи*, (1973), Энергия, Москва, 319 с.
5. СТБ 1972-2009 *Одежда пожарных специальная защитная от повышенных тепловых воздействий. Общие технические условия* – Введ. 2010 – 01 – 01.

REFERENCES

1. Davydenkova, V.P., Alshanski, V.I., Dmitrakovich, N.M., Prohorov, A.P. (2013), Calculation thermophysical parameters of the material of top of special protective clothing for firemen with the use means of automated calculation [Расчет теплофизических параметров материала верха специальной защитной одежды пожарных с применением средств автоматизированного вычисления], *Chrezvyichaynyie situatsii: Preduprezhdenie i likvidatsiya – Emergency situations: Prevention and elimination*, 2013, № 1 (33), pp. 94-102.
2. Numerical methods in heat conduction [Chislennyye metodyi v teploprovodnosti], [Elektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.kostic.niu.edu/555/_555-posted/cen-ch05-cond-num.pdf. – Data dostupa : 21.02.2017.
3. Rudobashta S.P. (2010), *Teplotehnika* [Thermotechnics], Kolas, Moscow, 599 p.
4. Miheev, M.A., Miheeva, I.M. (1973), *Osnovy teploperedachi* [Heat transfer bases], Energiya – Energy, 319 p.
5. Standard 1972-2009. *Odezhda pozharnykh special'naja zashhitnaja ot povyshennykh teplovykh vozdeystvij. Obshhie tehicheskie uslovija* [Clothing fireman special protective against high heat. General specifications], Vved. 2010 – 01 – 01.

Статья поступила в редакцию 03. 03. 2017 г.