

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ИЗ ОГНЕТЕРМОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ

В.П. Довыденкова, В.И. Ольшанский,
Н.М. Дмитракович

УДК 677.072.6 – 037.4

РЕФЕРАТ

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТНАЯ ОДЕЖДА ПОЖАРНЫХ, КАЧЕСТВО ОДЕЖДЫ, ПЕРФОРИРОВАННЫЙ МАТЕРИАЛ, МЕТОД СЕТОК, УСТАНОВКА, ТЕРМОГЕРМЕТИЗАЦИЯ

Объект исследований – узлы и соединения специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий тяжёлого типа, технология её изготовления.

Использованные методы – численные методы решения задач теплопроводности, методы математического планирования эксперимента и статистической обработки данных, стандартные методы определения разрывной нагрузки при растяжении перпендикулярно шву, теплофизических показателей материала верха специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий.

Результаты работы – на базе математического моделирования теплопередачи через перфорированные участки околосшовной зоны в условиях нестационарной теплопроводности разработано технологическое обеспечение процесса изготовления специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий.

Область применения результатов – одежда специального назначения.

Выводы – рассмотрена и формализована задача моделирования механизма теплопередачи через участки околосшовной зоны одежды специального назначения. Получена обобщённая модель, позволяющая моделировать, последовательно воспроизводить процесс нагрева и определять температуру и тепловой поток на внутренней поверхности перфорированного многослойного металлизированного материала в любой момент времени. Проведённые теоретические исследования показали хорошую сходимость ре-

ABSTRACT

SPECIAL PROTECTIVE CLOTHING FOR FIREMEN, QUALITY OF CLOTHES, PERFORATED MATERIAL, THE METHOD OF NETS, EQUIPMENT, THERMOSEALING

The work devoted to improvement of manufacturing techniques of special protective clothes from the metallized materials on the basis of fiber glass. On the basis of mathematical modeling of a heat transfer through the punched top material sites in the conditions of non-stationary heat conductivity technological support of process of production of heat-shielding suits of firefighters which allows to form qualitative, reliable knots and connections of details of clothes is developed. Pilot studies of the thermotight and strengthened connections of details of clothes proved efficiency of application of new technology and the equipment.

зультатов с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность полученной математической модели.

Разработано технологическое обеспечение процесса изготовления специальной защитной одежды из огнестойких материалов. Технология химического обмётывания припусков швов специальной защитной одежды, термогерметизирующая жидкофазная композиция, режимные параметры технологического процесса апробированы в условиях массового производства предприятия-изготовителя РПУП «Униформ» г. Микашевичи.

В комплексе мероприятий по обеспечению безопасных условий труда работающих важное место отводится проектированию и изготовлению специальной защитной одежды. Особое внимание уделяется отдельным видам защитной одежды, долговечность и безотказность работы которых в сложных и опасных условиях труда способствует сохранению здоровья и жизни человека, например, специальной защитной одежде пожарных от повышенных тепловых воздействий (далее – ОСЗ ПТВ).

Согласно действующим сегодня на территории Республики Беларусь нормативно-правовым документам, качество ОСЗ ПТВ рекомендовано оценивать преимущественно показателями качества материалов и конструкции. В стандартах не затрагивают вопросы, связанные с оценкой качества узлов и соединений такого рода одежды, поэтому предлагаемая сегодня на потребительском рынке ОСЗ ПТВ не всегда обеспечивает сохранение эксплуатационных показателей качества готовых изделий относительно входного уровня показателей используемых материалов.

Применение классического ниточного способа для скрепления огнестойких материалов на тканой основе из стекловолна с металлизированным плёночным покрытием, технологические свойства которых изучены не в полной мере, приводит к существенному снижению эксплуатационных показателей готовых образцов ОСЗ ПТВ. При перфорации таких материалов иглой швейной машины происходит образование пор различной формы, что способствует формированию слабых с точки зрения теплофизических и физико-механических пока-

зателей соединений (рисунок 1).

Актуальность данной работы обоснована также и тем, что до настоящего времени не существует теоретических исследований, досконально отражающих механизм внутреннего переноса теплоты и взаимодействия поверхности перфорированного материала с окружающей средой (внешний теплообмен), устанавливающих влияние размеров пор на изменение теплопроводности тканей. Не исследованы вопросы изменения теплозащитных свойств материалов в местах их соединения, то есть в швах.

Целью данной работы является разработка технологического обеспечения процесса изготовления ОСЗ ПТВ, основанного на полной термогерметизации и упрочнении мест ниточного скрепления деталей одежды на базе математического моделирования переноса теплоты через перфорированные участки околосшовной зоны в условиях нестационарной теплопроводности.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- формализация, поиск решения и создание такой математической модели, которая с применением средств автоматизированного вычисления позволила бы моделировать, последовательно воспроизводить в реальном времени процесс переноса тепла через перфорированные иглой швейной машины участки ОСЗ ПТВ в условиях нестационарной теплопроводности;
- технологическое обеспечение процесса изготовления ОСЗ ПТВ тяжёлого типа, включающее разработку и сопровождение технологического процесса термогерметизации и упрочнения узлов и соединений ОСЗ ПТВ, установку для

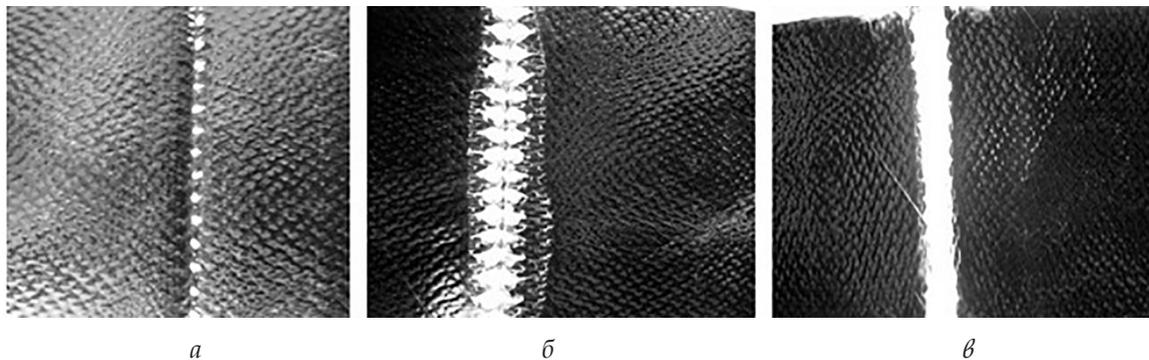


Рисунок 1 – Внешний вид узлов и соединений специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий: а – без воздействия многоцикловых растягивающих нагрузок, приложенных перпендикулярно к шву; б – после 250 циклов воздействия растягивающих нагрузок, приложенных перпендикулярно к шву (направление строчки соответствует направлению уточных нитей); в – после 40 циклов воздействия растягивающих нагрузок, приложенных перпендикулярно к шву (направление строчки соответствует направлению основных нитей)

его реализации, выбор и оптимизацию компонентов новой огнестойкой жидкофазной полимерной композиции;

- интеграция новой технологии в производственный процесс ведущего предприятия-изготовителя ОСЗ ПТВ тяжёлого типа РПУП «Униформ», оценка эффективности новой технологии и её апробация в условиях массового производства.

Для исследования динамики изменения теплозащитных свойств огнестойкого материала верха в местах соединения деталей, то есть в швах, рассмотрим процесс переноса тепла через узлы и соединения ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в реальных условиях воздействия высокоинтенсив-

ных тепловых потоков.

С целью упрощения и формализации задачи разобьем условно околошовную зону на участки, как показано на рисунке 2, а решение задачи представим в виде трех составляющих: 1 – разработка математической модели переноса тепла через неповрежденный участок огнестойкого материала верха при его нагревании (нестационарный режим); 2 – разработка математической модели переноса тепла через перфорированный иглой швейной машины участок околошовной зоны материала верха в условиях нестационарной теплопроводности; 3 – разработка математической модели распределения температуры по внутренней поверхно-

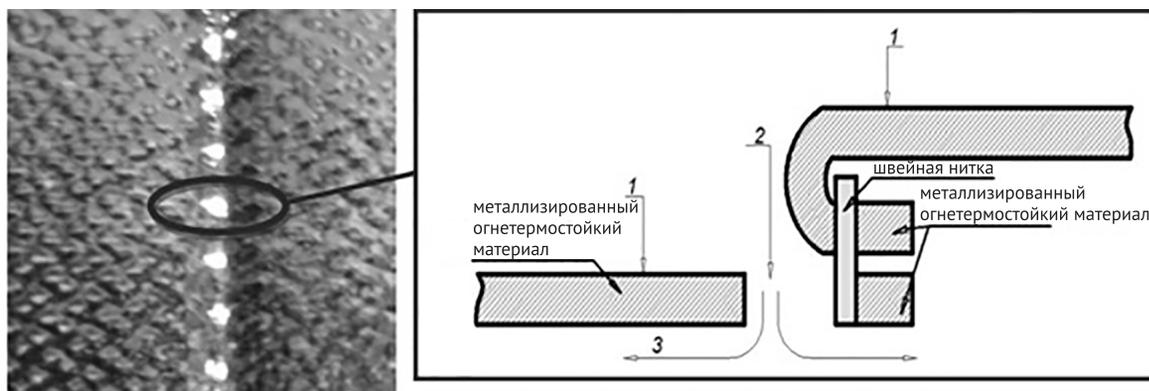


Рисунок 2 – Внешний вид и структурная схема соединительного стачного шва в заутюжку, используемого для скрепления деталей ОСЗ ПТВ тяжёлого типа

сти материала верха в околшовной зоне в стационарном режиме.

Для разработки математической модели процесса переноса тепла через неповреждённые участки околшовной зоны ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в условиях нестационарной теплопроводности используем метод конечных разностей (метод сеток). Сущность его заключается в замене производных их приближёнными значениями, выраженными через разности значений функций в отдельных узловых точках температурного поля. В результате такой замены формируется замкнутая система алгебраических уравнений, позволяющая используя возможности современной вычислительной техники, визуализировать процесс нагрева (охлаждения) [1].

В свою очередь, адекватно построенная математическая модель является базовой для исследования и визуализации процесса теплопереноса через перфорированные иглой швейной машины участки ОСЗ ПТВ в условиях нестационарной теплопроводности. Применение численного интегрирования, основанного на методе тепловых балансов, позволяет расчёт нагрева многослойного металлизированного материала представить в виде системы уравнений (1).

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – теплопроводность слоёв «металл», «полимерная плёнка», «стекловолокно», Вт/°С; q_1 – плотность входного теплового потока, Вт/м²; τ – время, с; c_1, c_2, c_3 – удельная массовая теплоёмкость слоёв «металл», «полимерная плёнка», «стекловолокно», Дж/кг·К; ρ_1, ρ_2, ρ_3 – плотность слоёв «металл», «полимерная плёнка», «стекловолокно», кг/м³; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – толщина слоёв «металл», «полимерная плёнка», «стекловолокно», м; c_{12}, c_{23} – приведённая удельная массовая теплоёмкость слоёв «металл – полимерная плёнка», «полимерная плёнка – стекловолокно», Дж/кг·К; ρ_{12}, ρ_{23} – приведённая плотность слоёв «металл – полимерная плёнка», «полимерная плёнка – стекловолокно», кг/м³; α_n – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием между металлизированной поверхностью и окружающей средой (принят в качестве основного с учётом воздействия высокоинтенсивного потока и расположения образца в непосредственной близости к источнику излучения); α_k – коэффициент теплоотдачи между внутренней поверхностью материала и окружающей средой, определяемый экспериментально; t_{n1} – температура внешней поверхности металлизированного огнестойкого материала, °С; t_{n2} – температура

$$\frac{dT(x, d\tau)}{d\tau} = \begin{cases} \frac{\lambda_1(dx, \tau)}{c_1 \rho_1} \frac{1}{dx} \left\{ \frac{dT(\theta, \tau)}{dx} - \frac{q_1}{\lambda_1(dx, \tau)} \right\} d\tau, \text{ если } x \rightarrow \theta; \\ \frac{\lambda_1(x, \tau)}{c_1 \rho_1} \cdot \frac{d^2T(x, \tau)}{dx^2}, \text{ если } \theta < x < \delta_1; \\ \frac{2}{c_{12} \rho_{12} dx} \left\{ \lambda_1(\delta_1 - dx, \tau) \frac{dT(\delta_1 - dx, \tau)}{dx} - \lambda_2(\delta_1 + dx, \tau) \frac{dT(\delta_1, \tau)}{dx} \right\}, \text{ если } x \rightarrow \delta_1; \\ \frac{\lambda_2(x, \tau)}{c_2 \rho_2} \cdot \frac{d^2T(x, \tau)}{dx^2}, \text{ если } \delta_1 < x < \delta_1 + \delta_2; \\ \frac{2}{c_{23} \rho_{23} dx} \left\{ \lambda_2(\delta_1 + \delta_2 - dx, \tau) \frac{dT(\delta_1 + \delta_2 - dx, \tau)}{dx} - \lambda_3(\delta_1 + \delta_2 + dx, \tau) \frac{dT(\delta_1 + \delta_2, \tau)}{dx} \right\}, \text{ если } x \rightarrow \delta_1 + \delta_2; \\ \frac{\lambda_3(x, \tau)}{c_3 \rho_3} \cdot \frac{d^2T(x, \tau)}{dx^2}, \text{ если } \delta_1 + \delta_2 < x < \delta_1 + \delta_2 + \delta_3; \\ \frac{\lambda_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - dx, \tau)}{c_3 \rho_3} \frac{1}{dx} \left\{ \frac{q_2}{\lambda_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - dx, \tau)} + \frac{dT(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - dx, \tau)}{dx} \right\}, \text{ если } x = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3; \\ q_1 = \alpha_n(t_{n1} - t_c) \Rightarrow q_1 = \alpha_n(T(\theta, \tau) - t_c); \\ q_2 = \alpha_k(t_{n2} - t_c) \Rightarrow q_2 = \alpha_k(T(\delta, \tau) - t_c), \end{cases} \quad (1)$$

внутренней поверхности металлизированного огнетермостойкого материала, °С; t_c – температура окружающей среды, °С; δ – толщина металлизированного огнетермостойкого материала, м.

При этом расчётная формула для определения внутренней энергии многослойного металлизированного материала при нагреве имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & -\lambda_1(dx, \tau) \frac{T(\theta, \tau)}{dx} + \int_{\theta+0}^{\delta_1-0} -\lambda_1(x, \tau) \frac{d^2T(x-dx, \tau)}{dx^2} dx + \lambda_{12}(\delta_1-dx, \tau) \frac{dT(\delta_1-dx, \tau)}{dx} - \\
 & -\lambda_{12}(\delta_1+dx, \tau) \frac{dT(\delta_1, \tau)}{dx} + \int_{\delta_1+0}^{\delta_1+\delta_2-0} -\lambda_2(x, \tau) \frac{d^2T(x-dx, \tau)}{dx^2} dx + \lambda_{23}(\delta_1+\delta_2-dx, \tau) \frac{dT(\delta_1+\delta_2-dx, \tau)}{dx} - \\
 & -\lambda_{23}(\delta_1+\delta_2+dx, \tau) \frac{dT(\delta_1+\delta_2, \tau)}{dx} + \int_{\delta_1+\delta_2+0}^{\delta_1+\delta_2+\delta_3-0} -\lambda_3(x, \tau) \frac{d^2T(x-dx, \tau)}{dx^2} dx - \\
 & -\lambda_3(\delta_1+\delta_2+\delta_3-dx, \tau) \frac{dT(\delta_1+\delta_2+\delta_3-dx, \tau)}{dx} = 0. \tag{2}
 \end{aligned}$$

Расчёт входящего теплового потока (q_1) и коэффициента теплообмена (α_n) подробно рассматривался нами ранее [2].

Многочисленное повторение решений системы (1) с применением средств автоматизированного вычисления позволяет смоделировать, последовательно воспроизвести процесс нагрева и определить температуру на внутренней поверхности многослойного металлизированного материала в режиме реального времени.

Для оценки результатов теоретических исследований на базе научно-исследовательской лаборатории учреждения «НИЦ Витебского областного управления МЧС» определены экспериментальные значения изменения температуры на внутренней поверхности огнетермостойкого металлизированного материала верха торговой марки «Alfa-Maritex» (стекловолокно, 100 %, поверхностная плотность 460 ± 10 г/м²) при плотности теплового потока, падающего на пробу 40 кВт/м² в течение 120 с. Испытания проводились при температуре окружающей среды 20 ± 1 °С.

Исходные данные для расчёта и результаты теоретических исследований представлены на рисунке 3. Сопоставление значений расчётных

экспериментально определённых температур на внутренней поверхности материала верха представлены в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показывает, что на всем диапазоне исследований относительная погрешность результатов теоретических исследований не превышает 7 %, что говорит о хорошей сходимости результатов и адекватно построен-

ной математической модели.

Разработка математической модели переноса тепла через перфорированный иглой швейной машины участок околошовной зоны материала верха в условиях нестационарной теплопроводности осуществляется в цилиндрической системе координат. При этом температура рассматривается как функция расстояния от центра поры до произвольной точки в материале (r), угла между осью x и отрезком r , координаты точки на оси z и времени (τ).

Аналогично предыдущей модели разобьём данную систему на соответствующее количество небольших объёмов с выделением узловых точек, как показано на рисунке 4.

Используя численное интегрирование, расчёт нагрева многослойного перфорированного металлизированного материала представим в виде системы уравнений аналогично (1).

Для исследования процесса распределения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в радиальном направлении с течением времени рассмотрим огнетермостойкий материал с металлизированным покрытием как неограниченную пластину, имеющую толщину δ , теплоизоли-

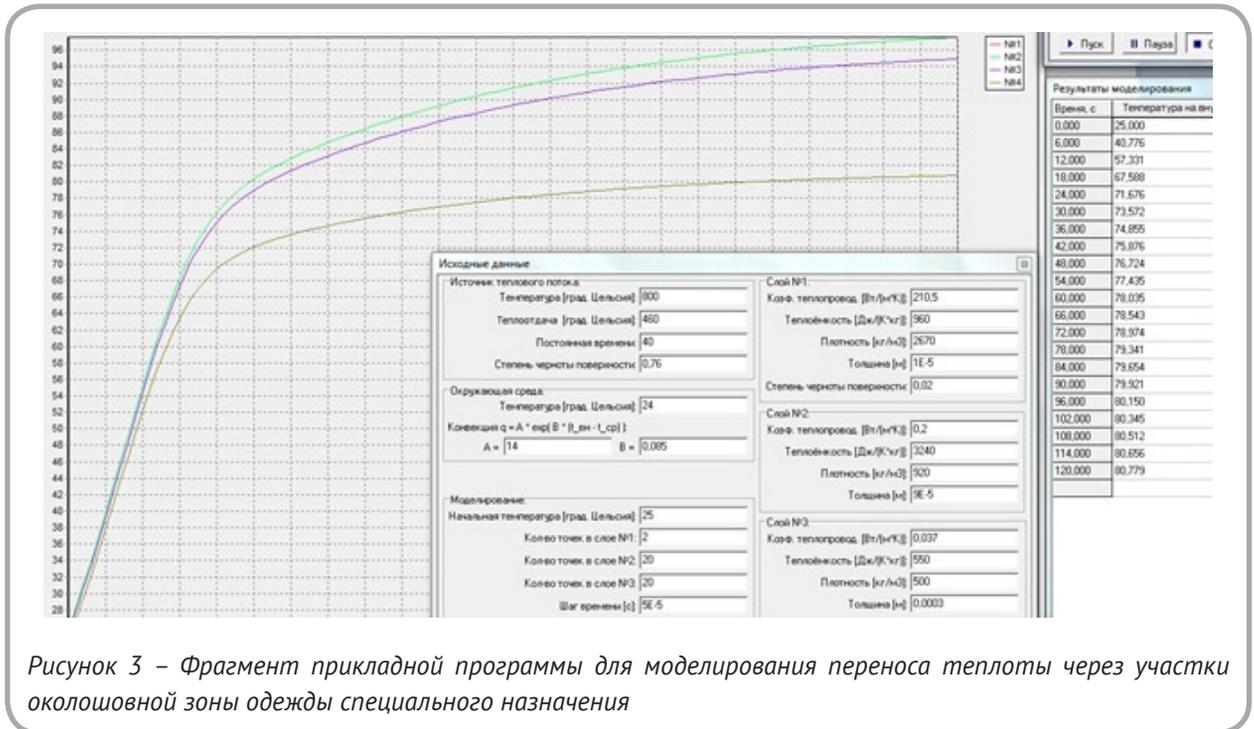


Рисунок 3 – Фрагмент прикладной программы для моделирования переноса теплоты через участки околошовной зоны одежды специального назначения

рованную с внутренней стороны за счёт полного теплового контакта между слоями материала. Задача состоит в нахождении при стационарном режиме разности температур между центром и периферией как функции теплового потока при условии, что к наружной поверхности равномерно подводится тепловой поток (Q).

Дифференциальное уравнение для расчёта плотности результирующего теплового потока получено в виде Бесселевой функции:

$$\frac{d^2 T_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_r}{dr} - \frac{\alpha}{\lambda \delta} T_0 - \frac{\alpha}{\lambda \delta} T_r - \frac{q}{\lambda \delta} = 0. \quad (3)$$

Решение дифференциального уравнения (3) позволяет получить расчётную зависимость из-

менения температуры на внутренней поверхности материала верха в радиальном направлении в области его перфорации иглой швейной машины:

$$T_r = -(T_{max} - T_c - \frac{q}{\alpha}) \sqrt{\frac{r}{R}} + T_{max} - \frac{q}{\alpha}. \quad (4)$$

Расчёт и построение эпюры, отражающей закономерность изменения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в радиальном направлении от центра с максимальной температурой, выполнен с использованием среды математического моделирования Maple 9. Полученная графическая зависимость представлена на рисунке 5.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных и теоретических исследований температуры на внутренней поверхности материала верха (плотность теплового потока 40 кВт/м²)

Время воздействия, с																			
6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120
Экспериментальное значение температуры на внутренней поверхности, °С																			
44	54	63	67	70	72	75	76	79	81	82	83	84	84	85	85	85	86	86	86
Расчётное значение температуры на внутренней поверхности, °С																			
41	57	68	72	74	75	76	77	77	78	79	79	79	80	80	80	80	81	81	81

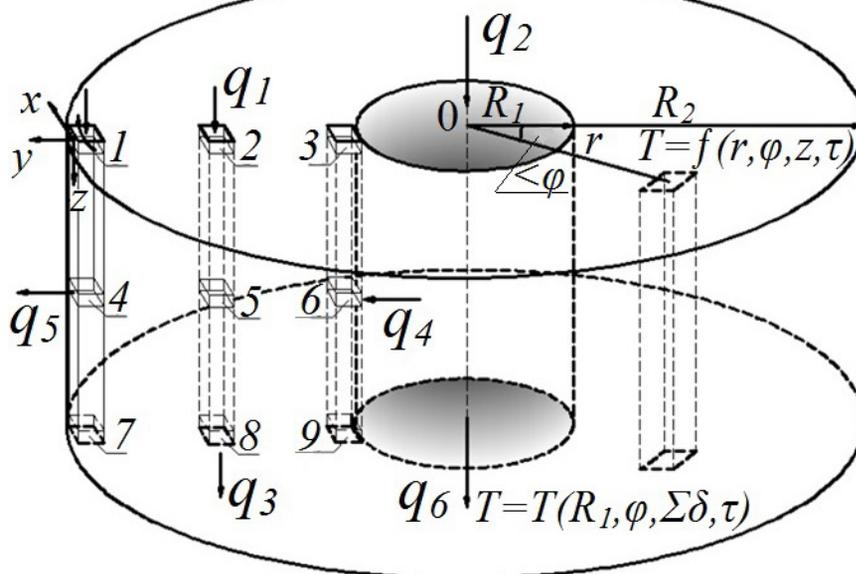


Рисунок 4 – К выводу уравнения для расчёта узловых точек при переносе тепла через перфорированный материал верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа

Анализ термографических снимков результатов экспериментальных исследований и диаграмм изменения температуры в радиальном направлении показывает, что в процессе нагрева материала верха в околошовной зоне с ростом температуры наблюдается постепенное увеличение области распространения (растекания) тепла по внутренней поверхности материала, что полностью соответствует результатам теоретических исследований (рисунок 6).

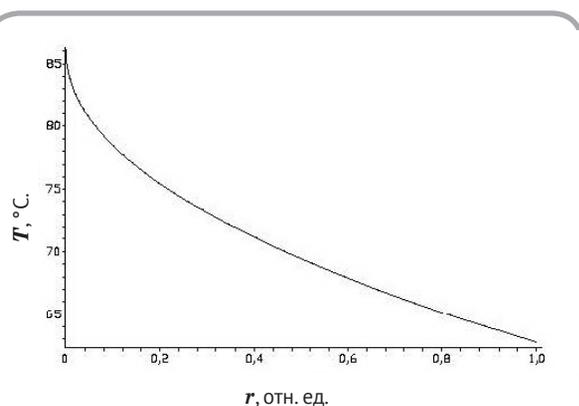
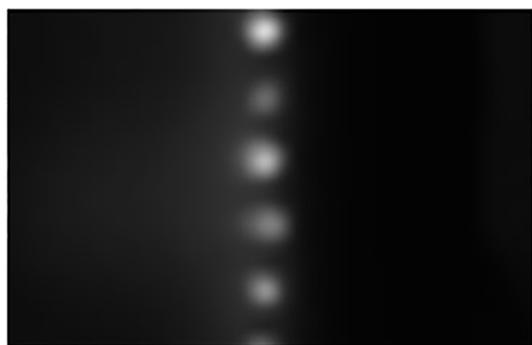


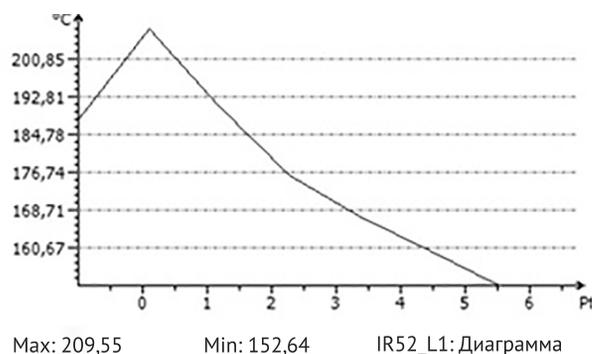
Рисунок 5 – Эюра изменения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в местах его перфорации иглой швейной машины (в околошовной зоне)

Для обеспечения защитной функции, увеличения срока службы ОСЗ ПТВ тяжёлого типа, её узлы и соединения должны подвергаться дополнительной термогерметизирующей обработке, которая позволит не только исключить проникновение тепла в местах перфорации материала верха иглой швейной машины, но и повысит прочность швов. Анализ литературных источников, патентной документации показал, что работ в области создания устройств и приспособлений для термогерметизации и одновременного упрочнения соединений деталей из металлизированных огнетермостойких материалов на тканой основе из химических волокон не существует.

Имеется достаточно много технологий, применяемых для герметизации швов в водозащитной одежде, стабилизации линейных и геометрических параметров срезов деталей. Самым распространенным в промышленности способом герметизации швов при производстве водозащитной одежды является проклеивание их специальной лентой. Данный способ дает наиболее высокое качество герметизации. Такие швы более устойчивы в эксплуатации. Однако данный способ не применим для огнетермостойких металлизированных материалов, изготовленных



а



б

Рисунок 6 – Изменение температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в радиальном направлении: а – термографический снимок внутренней поверхности околовшивной зоны, б – диаграмма изменения температуры в радиальном направлении

на основе стекло- или кремнезёмной ткани.

С целью получения качественных, выносливых в эксплуатации теплозащитных костюмов разработана специальная технология, основанная на полной термогерметизации и упрочнении мест ниточного скрепления деталей одежды, получившая впоследствии новое оригинальное название «технология химического обмётывания припусков швов». Данная технология позволяет заменить ленту жидкофазным полимером, который можно наносить на любую тканую основу. Для реализации этой уникальной технологии разработан пакет конструкторской документации, экспериментальный образец установки для термогерметизации и упрочнения узлов и соединений ОСЗ ПТВ, предложен оптимальный вариант жидкофазного огнестойкого термогерметизирующего полимера.

При использовании данной установки может осуществляться:

- одновременное двухстороннее нанесение термогерметизирующего полимера в зону припусков на швы и термогерметизация ниточной строчки;
- нанесение полимера только на верхнюю (нижнюю) сторону припуска на шов и термогерметизация ниточной строчки.

Аналогично синтетическим клеевым составам, используемым в швейном производстве, новый термогерметичный состав должен обладать:

- эластичностью и гибкостью;

- устойчивостью к воде и атмосферной влаге;
- простотой и эффективностью использования в массовом производстве;
- недефицитностью и невысокой стоимостью [3].

Учитывая условия эксплуатации ОСЗ ПТВ, особенности строения и волокнистый состав применяемых материалов, приведённые требования необходимо дополнить следующими:

- высокой адгезией к волокнам с низким коэффициентом тангенциального сопротивления и когезионной прочностью;
- устойчивостью к пониженным (до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) и повышенным температурам ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 960 с и $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 с);
- огнестойкостью.

На основе анализа свойств современных синтетических клеевых составов и их компонентов было установлено, что оптимальный вариант термогерметизирующего состава должен включать:

- полиуретан, как полимер, обладающий широким спектром физико-механических свойств;
- антипирен на базе фосфорорганических галогенсодержащих соединений для предотвращения воспламенения и увеличения термостойкости полиуретана;
- отвердитель для перевода полиуретана в неплавкое и нерастворимое состояние.

С учетом изложенного, ориентируясь на ассортимент полимеров, имеющийся на рынке Республики Беларусь, в качестве компонентов

термогерметизирующего состава выбраны полимеры следующих торговых марок:

- полиуретан – «Apretan №52281 fl» M1000;
- антипирен – смесь галогенов в фосфатном пластификаторе;
- отвердитель – «Printofix Verdicker CNfl» M1000.

Оптимальный состав нового жидкофазного полимера и режимные параметры технологического процесса определены методом математического планирования эксперимента. При этом в качестве входных характеристик выбраны:

- X_1 – массовый расход полимера на 1 м^2 , г/м²;
- X_2 – масса антипирена, г;
- X_3 – время контактной сушки, с;
- X_4 – температура контактной сушки, °С.

В качестве выходных параметров Y_1 и Y_2 соответственно рассмотрена величина разрывной нагрузки, приложенной перпендикулярно к шву, (Н) и показатель кислородного индекса, (об. %), регламентируемый СТБ 1972–2009.

В таблице 2 представлены входные (управляемые) факторы, уровни и интервалы варьирования (Δ) по каждому из них.

Время воздействия конвективного тепла определено эмпирически (соответствовало вре-

мени сушки образцов до исключения липкости) и в каждом из экспериментов составляло 10 ± 1 с при температуре 120 °С. Динамическая вязкость нового состава полиуретанового клея в каждом из опытов являлась постоянной величиной (22 ± 1 Па·с).

Так как использовалось локальное нанесение жидкофазного полимера в зону припуска на шов, его массовый расход пересчитан с учётом площади нанесения, определяемой произведением ширины образца (0,07 м) на ширину нанесения полимера (0,012 м).

В результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ получены математические модели. Коэффициенты полученных моделей представлены в таблице 3.

Анализ массива возможных математических моделей показал, что коэффициент при входном параметре X_4 (температура контактной сушки) не является значимым. Следовательно, данный варьируемый параметр в указанном диапазоне не оказывает влияния на выходные параметры (Y_1 и Y_2).

Поиск оптимального решения сводился к решению компромиссной задачи, в соответствии с которой необходимо решить систему из полученных в результате планирования эксперимен-

Таблица 2 – Входные факторы и уровни варьирования

Наименование фактора	Обозначение фактора	Уровни варьирования			Интервал варьирования, Δ
		-1	0	+1	
Массовый расход полимера, г/м ²	X_1	80	130	180	50
Масса антипирена, г	X_2	40	50	60	10
Время контактной сушки, с.	X_3	10	20	30	10
Температура контактной сушки, °С	X_4	130	150	170	20

Таблица 3 – Математические модели, их коэффициенты и оценка значимости

Разрывная нагрузка, приложенная перпендикулярно ко шву, Н				
Модель: $Y_1 = 254,78 + 2617,19 \cdot x_1 - 8,69 \cdot x_2 - 8187,0 \cdot x_1 \cdot x_2$ $P_D = 0,9566$				
Обозначение коэффициента	a_0	a_1	a_2	a_3
P-level	0,000	0,0011	0,0009	0,0160
Коэффициент ослабления инфракрасного излучения, об.%				
Модель: $Y_2 = -6,70 + 26,72 \cdot x_1 + 6,69 \cdot x_2 + 0,07 \cdot x_3$ $P_D = 0,9925$				
Обозначение коэффициента	a_0	a_1	a_2	a_3
P-level	0,0007	0,0008	0,0000	0,0183

та уравнений при ограничениях, наложенных на критерии оптимизации и независимые переменные:

$$\begin{cases} Y_1 \rightarrow \max; \\ Y_2 \geq 30,0; \\ 0,07 \leq X_1 \leq 0,15; \\ 4 \leq X_2 \leq 6; \\ 10 \leq X_3 \leq 30. \end{cases} \quad (5)$$

Для обеспечения безопасности и исключения горения образцов при воздействии открытого пламени предел ограничения по критерию оптимизации Y_2 выбран больше указанного в СТБ 1972–2009 значения. Дополнительно учитывалась адгезия полиуретанового клея к поверхности проутюжильника при контактной сушке.

Результаты перебора массива данных в среде Maple 9.5 позволили установить оптимальное пропорциональное соотношение компонентов жидкофазного полимера:

- полиуретан «Arpetan №52281 fl» M1000 – 100 частей;
- антипирен – смесь галогенов в фосфатном пластификаторе – 50 частей;
- отвердитель «Printofix Verdicker CNfl» M1000 – 2 части.

В диапазоне значений, установленных при планировании эксперимента, определены оптимальные параметры технологического процесса, которыми являются:

- массовый расход полимера – 130 г/м²;
- время контактной сушки – 20 с (на 20 – 25 см шва);
- температура контактной сушки 130 – 170 °С.

При указанных параметрах значение разрывной нагрузки, приложенной перпендикулярно ко шву (критерий оптимизации Y_1) составит 400 Н, значение кислородного индекса (критерий оптимизации Y_2) – не менее 30,0 об. %

Апробация технологии химического обметывания припусков швов с использованием новой установки для герметизации и упрочнения узлов и соединений ОСЗ ПТВ проведена в лабораторных условиях «НИЦ Витебского областного управления МЧС», а также в условиях массового

производства РПУП «Униформ» г. Микашевичи.

Разрывная нагрузка швов после термогерметизации и упрочнения возрастает до 46±2 % от величины разрывной нагрузки неповреждённого огнетермостойкого материала, что является достаточным для формирования прочных и качественных соединений.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена и формализована задача моделирования механизма теплопереноса через участки околошовной зоны одежды специального назначения. Показано, что решение данной задачи целесообразно выполнять в три этапа: 1 – разработка математической модели переноса тепла через неповрежденный участок огнетермостойкого материала верха при его нагревании (нестационарный режим); 2 – разработка математической модели переноса тепла через перфорированный иглой швейной машины участок околошовной зоны материала верха в условиях нестационарной теплопроводности; 3 – разработка математической модели распределения температуры по внутренней поверхности материала верха в околошовной зоне в стационарном режиме.

2. Разработана математическая модель переноса теплоты через неповреждённые участки околошовной зоны ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в условиях нестационарной теплопроводности на базе применения метода сеток. Получена обобщённая модель, позволяющая моделировать, последовательно воспроизводить процесс нагрева и определять температуру и тепловой поток на внутренней поверхности перфорированного многослойного металлизированного материала в любой момент времени.

3. Проведённые теоретические исследования показали хорошую сходимость результатов с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность полученной математической модели процесса теплопереноса через неповреждённые участки околошовной зоны одежды специального назначения в условиях нестационарной теплопроводности.

4. Разработано технологическое обеспечение процесса изготовления специальной защитной одежды из огнетермостойких материалов, кото-

рое включает:

- специальную технологию для термогерметизации и упрочнения мест ниточного скрепления деталей одежды (новое оригинальное название – «технология химического обмётывания припусков швов»);
- выбор, оптимизацию состава термогерметизирующего полимера и режимных параметров технологического процесса химического обмётывания припусков швов при соединении деталей ОСЗ ПТВ;
- проведение экспериментальных исследований теплофизических и физико-механических

показателей полученных термогерметичных и упрочнённых соединений ОСЗ ПТВ на соответствие требованиям СТБ 1972–2009, подтверждающих результаты теоретических исследований.

5. Технология химического обмётывания припусков швов и установка для термогерметизации и упрочнения узлов и соединений ОСЗ ПТВ, разработанная с учётом максимальной интеграции в производственный процесс, апробирована в условиях массового производства на предприятии-изготовителе РПУП «Униформ» г. Микашевичи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бондарев В.А., Процкий А.Е., Гринкевич Р.Н. (1976), *Теплотехника*, Минск, Вышэйшая школа, 384 с.
2. Довыденкова, В.П., Ольшанский, В.И., Дмитракович, 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.
3. Ивашкевич Е.М., Гарская Н.П., Филлимоненкова Р.Н. (2007), *Методы соединения деталей одежды и влажно-тепловая обработка*, Витебск, УО «ВГТУ», 114 с.
4. СТБ 1972–2009, *Одежда пожарных специальная защитная от повышенных тепловых воздействий. Общие технические условия*. Введ. 2010–01–01.

REFERENCES

1. Bondarev V. A., Prockij A. E., Grinkevich R.N. (1976), *Teplotehnika* [Thermotechnics], Moscow, Graduate School, 384 p.
2. Davydenkava, V.P., Olchanski, V.I., Dmitrakovich, N.M., Prohorov, A.P. (2013), Calculation of thermophysical parameters of the material of top of special protective clothing for firemen with the use means of automated calculation [Raschet teplofizicheskikh parametrov materiala verha special'noj zashhitnoj odezhdy pozharnyh s primeneniem sredstv avtomatizirovannogo vychislenija], *Chrezvychajnye situacii: Preduprezhdenie i likvidacija - Emergency situations: Prevention and elimination*, 2013, № 1(33), pp. 94-102.
3. Ivashkevich, E.M., Garskaja, N.P., Fillimonenkova R.N. (2007), *Metody soedinenija detalej odezhdy i vlazhno-teplovaja obrabotka* [Methods of connection details of clothing and wet-heat treatment], Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 114 p.
4. Standard 1972–2009. *Odezhda pozharnyh special'naja zashhitnaja ot povyshennyh teplovyh vozdejstvij. Obshhie tehicheskie uslovija* [Clothing fireman special protective against high heat. General specifications]. Vved. 2010–01–01.

Статья поступила в редакцию 13. 02. 2015 г.