

УДК 687.03:677.072.6 – 037.4

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ  
НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА  
ВЕРХА СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ  
ОТ ПОВЫШЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**В.П. ДОВЫДЕНКОВА, канд. техн. наук, проф. В.И. ОЛЬШАНСКИЙ**

*(Витебский государственный технологический университет);*

**канд. техн. наук Н.М. ДМИТРАКОВИЧ, Е.В. МАЦКЕВИЧ**

*(Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь)*

*Рассматривается аналитическое решение задачи по определению закономерности распределения температуры на внутренней поверхности материала верха специальной защитной одежды пожарных тяжёлого типа в радиальном направлении с течением времени. Огнетермостойкий материал с металлизированным покрытием рассматривается как неограниченная пластина, теплоизолированная с внутренней стороны за счёт полного теплового контакта между слоями материала. Получена формула для расчёта разности температур на внутренней поверхности материала верха специальной защитной одежды пожарных тяжёлого типа в местах его перфорации иглой швейной машины (в окошечной зоне).*

**Введение.** Проблема комплексной защиты пожарных от вредных и опасных факторов пожара, климатических воздействий, химических агрессивных сред и ионизирующих излучений относится к числу тех вопросов, актуальность решения которых сохраняется до настоящего времени.

Специальная защитная одежда пожарных от повышенных тепловых воздействий (далее – ОСЗ ПТВ) является одной из важнейших составляющих, обеспечивающих безопасные условия труда.

Согласно СТБ 1972 [1] наружная оболочка одежды должна изготавливаться из материалов с металлизированным покрытием с высокой степенью отражения инфракрасного излучения, способных обеспечить защиту от воздействия интенсивного теплового излучения, контакта с нагретыми поверхностями, тепловых потоков, открытого пламени, механических воздействий, агрессивных сред, а также от неблагоприятных климатических воздействий. В зависимости от степени защиты от тепловых воздействий современная ОСЗ ПТВ подразделяется на три типа исполнения:

- тяжёлый (Т);
- полутяжёлый (ПТ);
- лёгкий (Л).

Комплекты одежды *тяжёлого типа* должны позволить быстро и эффективно выполнить работы по открыванию-закрыванию задвижек, разборке строительных конструкций, удалению препятствий внутри воспламенённых зон на предприятиях газонефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, провести первоочередные аварийно-спасательные работы.

Появившись в 1970-х годах, первые теплоотражательные (ТОК) и теплозащитные (ТСК-75) костюмы обладали неудовлетворительным качеством и невысокой эффективностью при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ по причине отсутствия высококачественных материалов, несовершенства конструктивного исполнения спецодежды. Развитие текстильного производства, химической отрасли и дальнейшие исследования учёных позволили значительно улучшить эксплуатационные характеристики применяемых материалов, усовершенствовать конструкцию специальной защитной одежды [2].

Сегодня материалы для ОСЗ ПТВ тяжёлого типа вырабатываются преимущественно на основе стекло-, кремнезёмистой ткани или ткани из арамидных волокон с высоким коэффициентом отражения (ткани «Термит» (Россия), «Alpha-Maritex» (Великобритания)). При этом современные методы получения текстильных материалов с новыми свойствами позволяют образовывать гладкие поверхности с высокой степенью отражения, используя плоские гибкие плёнки с нанесённым металлизированным покрытием различной толщины. Металлизированные материалы на тканой основе обладают рядом преимуществ. Не теряя свойств, присущих текстилю (невысокая жёсткость, хорошая драпируемость, прочностные характеристики), они приобретают свойства, присущие металлам (обладают электрической проводимостью, отражают тепловое (ИК) и электромагнитное (ВЧ, СВЧ) излучение) [3].

В настоящее время соединение деталей специальной защитной одежды пожарных в швейном производстве выполняют ниточным, сварным и комбинированным способами. В зарубежной практике швы ОСЗ ПТВ часто полностью закрывают и запаивают, используя сварные, заклёпочные или комбинирован-

ные соединения. Однако перечисленные методы скрепления имеют ограниченное применение, вызванное в первую очередь термопластичными свойствами материалов.

Преобладание лесных и торфяных пожаров, ликвидация чрезвычайных ситуаций на территориях Беларуси, подвергшихся радиационному загрязнению (последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС) требуют критического подхода при использовании зарубежного опыта и внедрении передовых технологий в существующих условиях.

Учитывая планируемые объёмы выпуска такого рода одежды, частую сменяемость ассортимента спецодежды и материально-техническое оснащение предприятия-изготовителя данной экипировки в Республике Беларусь РПУП «Униформ» (г. Микашевичи Брестской области), наиболее приемлемым способом соединения деталей ОСЗ ПТВ тяжёлого типа является ниточное скрепление. Процесс соединения деталей швейных изделий ниточным способом сравнительно прост, в условиях белорусских швейных предприятий максимально обеспечен технологическим оборудованием, не требует значительных затрат при смене ассортимента. Из всех перечисленных ранее данный способ наиболее универсален, позволяет соединять все виды материалов, используемых в швейной промышленности.

Однако наличие плёночного покрытия, специфические свойства тканой основы диктуют необходимость тщательного исследования технологии сборки деталей ОСЗ ПТВ при использовании такого рода материалов.

Металлизированные материалы на основе стекло-, кремнезёмистой ткани являются дорогостоящими, поэтому ОСЗ ПТВ тяжёлого типа эксплуатируются подразделениями МЧС Республики Беларусь максимально долго до появления дефектов, не подлежащих устранению в условиях пожарной части.

В настоящее время для территории республики разработаны методы оценки физико-механических и теплофизических свойств материалов и пакетов ОСЗ ПТВ различного уровня защиты в процессе эксплуатации, которые реализованы в проекте СТБ «Защитная одежда пожарных. Экспресс-методы оценки». Стандарт позволяет осуществить неразрушающий промежуточный контроль свойств одежды и прогнозировать эффективный срок её эксплуатации. Однако разработка методов оценки качества ниточных соединений деталей ОСЗ ПТВ по-прежнему является актуальной научной и практически значимой задачей.

Ниточное скрепление деталей из металлизированных материалов с плёночным покрытием приводит к перфорации верхнего защитного слоя иглой швейной машины. Образующиеся в процессе стачивания поры вызывают смещение нитей в тканях под воздействием внешних сил. Повышенная раздвигаемость нитей в швах, возникающая из-за недостаточного тангенциального сопротивления взаимному перемещению нитей стекловолокна в ткани (низкого трения между нитями основы и утка), способствует не только прохождению тепла в местах соединения деталей ОСЗ ПТВ, но и его распространению (растеканию) по внутренней поверхности материала с течением времени (рис. 1).

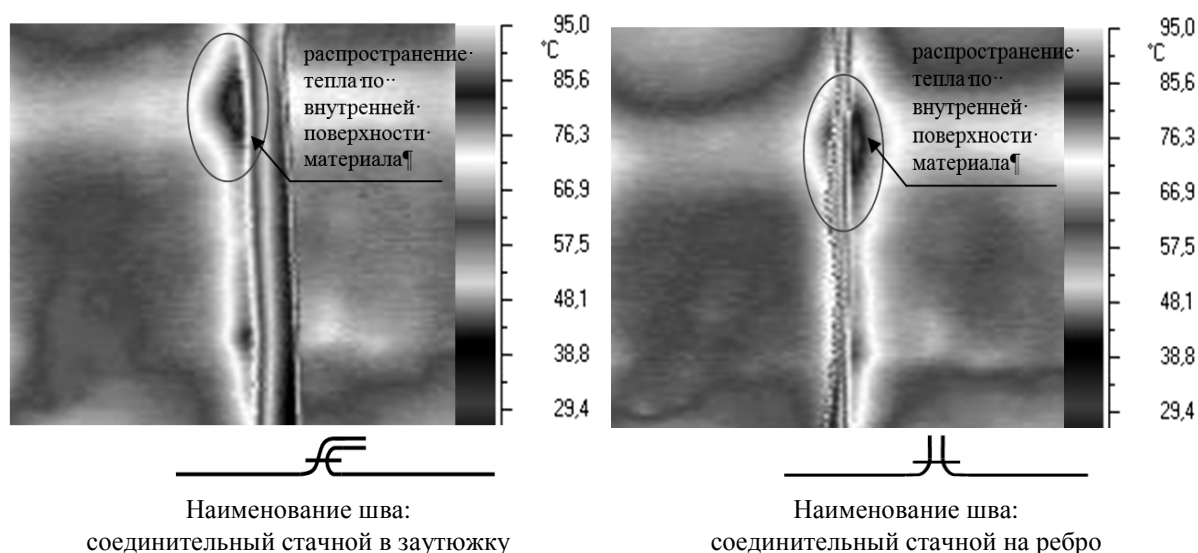


Рис. 1. Термографические снимки внутренней стороны материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в местах соединения деталей (в швах)

Качество узлов и соединений одежды пожарных, характер повреждений оценивается по окончании работ визуальным осмотром ОСЗ ПТВ, поэтому точность и достоверность значений показателей

свойств, определяющих целостность деталей в местах их соединения, зависят от квалификации, практического опыта, способностей специалистов, выполняющих контроль. Несущественное и незаметное при визуальном осмотре повреждение материала верха в околошовной зоне и последующая раздвижка нитей в швах не всегда являются индикатором очевидных повреждений, но могут привести к преждевременному отказу ОСЗ ПТВ во время его эксплуатации, а следовательно, к получению травм при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Поскольку вопросы изменения эксплуатационных показателей узлов и соединений ОСЗ ПТВ тяжелого типа после многоцикловых воздействий открытого пламени, высоких температур, тепловых потоков, промежуточного контроля качества и определения сроков безопасной эксплуатации до настоящего времени остаются актуальными, возникает необходимость всестороннего изучения динамики изменения теплозащитных свойств материала верха в местах соединения деталей ОСЗ ПТВ, т.е. в швах.

**Постановка задачи и её решение.** Целью данной работы являются теоретические исследования закономерности распределения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжелого типа в радиальном направлении с течением времени.

При решении поставленной задачи огнестермостойкий материал с металлизированным покрытием рассматривается как неограниченная пластина, имеющая толщину  $\delta$ , теплоизолированная с внутренней стороны за счёт полного теплового контакта между слоями материала. К наружной поверхности равномерно подводится тепловой поток  $Q$ . Задача состоит в нахождении при стационарном режиме разности температур между центром и периферией как функции теплового потока.

Согласно закону Фурье [4], тепловой поток, растекающийся по пластине в радиальном направлении, выражается зависимостью:

$$Q = -\lambda \frac{dT_r}{dr} 2\pi r \delta, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м °С;  $r$  – текущее значение радиуса, м;  $\delta$  – толщина пластины, м;  $T_r$  – температура в произвольной точке поверхности пластины на расстоянии  $r$  от центра.

Текущее значение радиуса определяется условием:

$$0 \leq r \leq R, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус, при котором  $T_r$  равна температуре окружающей среды.

При изменении линейной координаты на величину  $dr$  тепловой поток составляет:

$$Q_{r+dr} = -\lambda \frac{dT_{r+dr}}{dr} (r + dr) 2\pi \delta, \quad (3)$$

где  $dT_{r+dr} = T_r + \frac{dT_r}{dr} dr$  при нагревании элементарного участка  $Q_r > Q_{r+dr}$ .

Согласно закону сохранения энергии, скорость изменения количества теплоты в произвольной точке в момент времени  $t$  равна разности между входящими в точку и выходящими из нее количествами теплоты, тогда разница между потоками теплоты, полученными по уравнению (1) и (3), составит:

$$dQ = dQ_r - dQ_{r+dr}. \quad (4)$$

С учётом зависимостей (1) и (3) выражение (4) можно записать в виде:

$$dQ = 2\pi\lambda\delta \left( \frac{d^2T_r}{dr^2} r dr + \frac{dT_r}{dr} dr \right). \quad (5)$$

Поскольку по условию задания к наружной поверхности пластины подводится постоянный тепловой поток, удобно воспользоваться граничными условиями второго рода. При этом приращение теплового потока [4] находим из выражения:

$$dQ = q 2\pi r \lambda, \quad (6)$$

где  $q$  – плотность теплового потока (Вт/м<sup>2</sup>).

Подставляя выражение (6) в (5) и решая относительно  $T_r$ , получаем дифференциальное уравнение теплопроводности в виде:

$$\frac{d^2 T_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_r}{dr} = \frac{q}{\lambda \delta}. \quad (7)$$

Зависимость (7) выражает процесс распространения теплоты в пластине только теплопроводностью. Однако в реальных условиях необходимо учесть явление конвекции, заключающееся в переносе тепла путем перемещения самих частиц газа. Тепло передается конвекцией от газов к твердым телам, и наоборот. При решении поставленной задачи учитывается естественная конвекция, возникающая в веществе самопроизвольно при его неравномерном нагревании в поле тяготения.

Результирующее приращение теплового потока  $dQ_1$  при изменении линейной координаты  $dr$  складывается из приращений теплоты за счёт теплообмена с окружающей средой  $dQ_2$  при граничных условиях третьего рода и теплопроводностью по пластине  $dQ_3$ :

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3. \quad (8)$$

При использовании граничных условий третьего рода задаются температура окружающей среды и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Тогда приращение  $dQ_2$  в соответствии с законом Ньютона имеет вид:

$$dQ_2 = \alpha(T_0 - T_r)2\pi r dr, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $T_0$  – температура в центре, °С, определяемая экспериментально.

Приращение  $dQ_2$  описывается выражением:

$$dQ_1 = q2\pi r dr. \quad (10)$$

Приращение  $dQ_3$ , как показано в формуле (5), определяется следующим образом:

$$dQ_3 = 2\pi\lambda\delta \left( \frac{d^2 T_r}{dr^2} r dr + \frac{dT_r}{dr} dr \right). \quad (11)$$

Тогда выражение (8) примет вид:

$$q2\pi r dr = \alpha(T_0 - T_r)2\pi r dr + 2\pi\lambda\delta \left( \frac{d^2 T_r}{dr^2} r dr + \frac{dT_r}{dr} dr \right). \quad (12)$$

Разделив правую и левую части уравнения (12) на  $2\pi r dr$ , получим выражение для расчёта плотности результирующего теплового потока:

$$q = \alpha(T_0 - T_r) + \lambda\delta \left( \frac{d^2 T_r}{dr^2} + \frac{dT_r}{r dr} \right). \quad (13)$$

Деление правой и левой частей уравнения (13) на произведение  $\lambda\delta$  и последующее приравнение к нулю позволяет представить дифференциальное уравнение (13) в виде Бесселевой функции:

$$\frac{d^2 T_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_r}{dr} - \frac{\alpha}{\lambda\delta} T_0 - \frac{\alpha}{\lambda\delta} T_r - \frac{q}{\lambda\delta} = 0. \quad (14)$$

Решение дифференциального уравнения, как показано в [5; 6], имеет вид:

$$T_r = -\frac{\lambda\delta}{\alpha} B_1 J_0 \left( \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda\delta}} r \right) + T_0 - \frac{q}{\alpha}. \quad (15)$$

При  $r = R$   $T_r = T_c$ .

Соответственно, выражение для нахождения корня  $B_1$  уравнения (15) имеет вид:

$$B_1 = \frac{\alpha}{\lambda \delta} \frac{T_0 - T_c - \frac{q}{\alpha}}{J_0 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}} R}, \quad (16)$$

где  $T_c$  – температура окружающей среды, °С;  $T_0 = T_{\max}$  – температура в центре, °С;  $J_0 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}} R$  – функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

Решение дифференциального уравнения (15) в виде функций Бесселя первого рода возникает часто в задачах, описывающих различные процессы и уравнения в цилиндрической системе координат [7]. Для функции Бесселя  $j_0(x)$  составлены подробные таблицы. Эта функция чётная, имеет множество корней, разность между которыми равна  $\pi$ .

Подставив  $B_1$  из (16) в дифференциальное уравнение (15), получим расчётную зависимость:

$$T_r = -\left(T_{\max} - T_c - \frac{q}{\alpha}\right) \sqrt{\frac{r}{R}} + T_{\max} - \frac{q}{\alpha}. \quad (17)$$

Характерная зависимость изменения температуры на внутренней поверхности материала верха в радиальном направлении в области его перфорации иглой швейной машины (в шве) была определена с учётом исходных данных, представленных в таблице. В качестве исходных данных использованы результаты экспериментальных исследований, проведённых на базе учреждения «Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь».

Исходные данные для расчета изменения температуры на внутренней поверхности материала верха в радиальном направлении

Тип исполнения ОСЗ ПТВ	Вид материала верха, волокнистый состав, поверхностная плотность	Значение исходной плотности теплового потока, кВт/м <sup>2</sup>	Температура на внутренней поверхности материала верха в области его перфорации иглой швейной машины (в поре), °С	Температура на неповреждённом участке внутренней стороны материала верха, °С
Тяжёлый (Т)	«АльфаМаритекс», стекловолокно, 100 %, 460 г/м <sup>2</sup>	40	85,75	62,80

Для определения максимального значения температуры на внутренней поверхности материала верха в области поры ( $T_{\max}$ ) и на участках неповреждённого материала ( $T_c$ ) использовалось следующее оборудование:

- установка для определения устойчивости к воздействию теплового потока (аттестат аккредитации учреждения N ВУ/11202.1.0.0192, срок действия до 17.09.2015);
- приёмник теплового потока ПТПО № 192;
- измеритель-регулятор «Сосна-002»;
- термоэлектрический преобразователь ТХА-1199/53;
- секундомер Интеграл С-014;
- комплекс средств измерений для проведения исследований пакетов материалов по определению устойчивости к воздействию теплового потока с многоканальной регистрацией характеристик.

Схема установки приведена на рисунке 2.

Пробы материала верха размером 210×70 мм с фрагментами соединительного стачного шва в уткужку подвергались воздействию теплового потока плотностью 40 кВт/м<sup>2</sup>. В качестве источника излучения использовалась радиационная панель размером 200×150 мм с нагревательным элементом в виде спирали из нихромовой проволоки (согласно ГОСТ 14081). Продолжительность цикла тепловой нагрузки составляла не менее 120 с (согласно СТБ 1972-2009). Для измерения значения температуры на внутренней поверхности материала верха в области его перфорации иглой швейной машины и на неповреждённых участках использовались три термопары, прикреплённые под углом 120° друг к другу на расстоянии

$20 \pm 2$  мм от центра датчика. Одновременно с измерением температуры с помощью датчика типа Гордона (диапазон измерения от 1 до  $50 \text{ кВт/м}^2$ , погрешность измерений – не более 8 %) снимались данные плотности теплового потока.

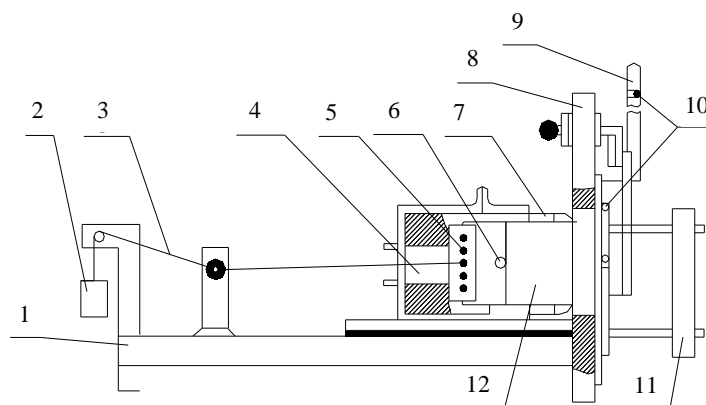


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – платформа; 2 – груз; 3 – нити; 4 – датчик измерения плотности теплового потока; 5 – зажим;  
6 – термопара; 7 – держатель пробы; 8 – экран; 9 – защитная заслонка;  
10 – система охлаждения; 11 – радиационная панель; 12 – проба

Так как экспериментальное значение  $T_{max}$ , учитывает влияние естественной конвекции, то расчётная формула (17) принимает вид:

$$T_r = T_0 - \sqrt{\frac{r}{R}}(T_0 - T_c), \quad (18)$$

где  $T_0 = T_{max} - \frac{q}{\alpha}$ .

Для расчёта и построения эпюры, отражающей закономерность изменения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в радиальном направлении от центра с максимальной температурой, была использована среда математического моделирования Maple 9. Полученная графическая зависимость представлена на рисунке 3.

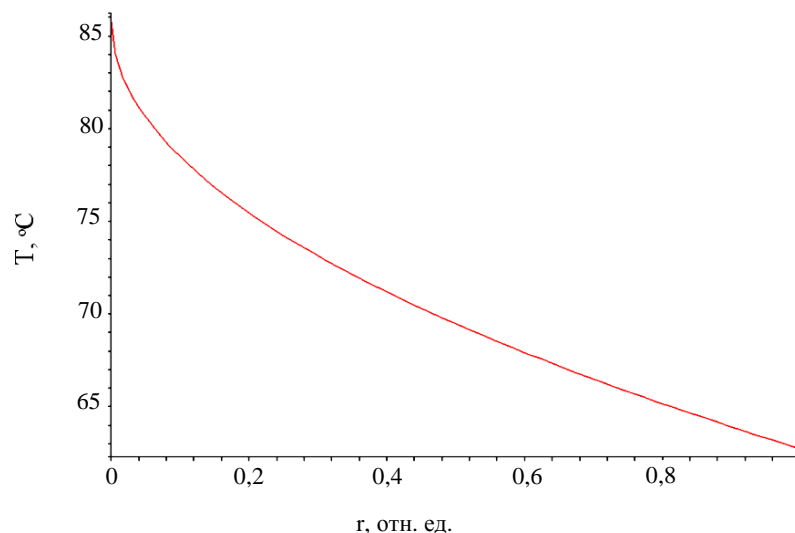


Рис. 3. Эпюра изменения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ тяжёлого типа в местах его перфорации иглой швейной машины (в околошовной зоне)

При равноценном воздействии раздирающих нагрузок по обе стороны шва эпюра, представленная на рисунке 3, будет симметрична относительно оси ординат, следовательно, область распространения (растекания) тепла по внутренней поверхности материала верха увеличится вдвое.

**Заключение.** В процессе теоретических исследований получена математическая модель изменения температуры на внутренней поверхности материала верха ОСЗ ПТВ в местах его перфорации иглой швейной машины (в швах) в радиальном направлении. Полученные результаты позволяют, используя современные компьютерные технологии, детально изучить и моделировать динамику изменения температуры на внутренней поверхности материала в околошовной зоне с течением времени при многоцикловых воздействиях раздирающих нагрузок.

Вопросы точного определения сроков эффективной и безопасной эксплуатации ОСЗ ПТВ тяжёлого типа являются актуальными и достаточно сложными, поэтому требуют дополнительных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Одежда пожарных специальная защитная от повышенных тепловых воздействий. Общие технические условия: СТБ 1972-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Госстандарт. – Витебск: НИЦ ВОУ МЧС, 2010. – 46 с.
2. Результаты исследований по разработке различных видов специальной защитной одежды пожарных // Все о пожарной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.0-1.ru/articles/showdoc.asp?dp=39&chr=2>. – Дата доступа: 21.02.2013.
3. Покрывтия на текстильные и полимерные материалы / Элком. Вакуумно-плазменные технологии [Электронный ресурс]. – Витебск, 2010. – Режим доступа: <http://www.elcom.biz/services/textile-polymer-cover/>. – Дата доступа: 21.02.2013.
4. Теплотехника: учебник для студ. вузов / А.М. Архаров [и др.]; под ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
5. Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик. – М.: Мир, 1974. – 615 с.
6. Карслоу, Г. Теплопроводность твёрдых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
7. Тулайкова, Т.В. Вводный курс по специальным функциям для аспирантов-физиков / Т.В. Тулайкова, С.Р. Амирова. – М.: ЗАО «Книга и бизнес», 2009. – 156 с.

*Поступила 04.04.2013*

#### **THEORETICAL STUDIES OF THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURE ON THE INSIDE SURFACE OF THE MATERIAL OF TOP OF PROTECTIVE CLOTHING FOR THE FIREMEN FROM HIGH EFFECTS OF HEAT**

**V. DOVYDENKOVA, V. OLSHANSKY, N. DMITRAKOVICH, E. MATSKEVICH**

*Analytical solution of the problem of determination of regularity of temperature change on the inside surface of the material of the top of special protective clothes of firemen of heavy type in the radial direction over time is studied. The fire resistant material with metallized covering is considered as the unlimited plate insulated from the inside due to the complete thermal contact between the layers of material. A formula for the calculation of the temperature difference on the inner surface of the material of the top of special protective clothes of firemen of heavy type in the places of puncture of needle sewing machine, has been obtained (in the seam zone).*