

ПОСТАНОВКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ РАЗРАБОТКИ АНТИСТАТИЧЕСКОЙ ОДЕЖДЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

¹С.У. ПУЛАТОВА, ¹С.Х. КОДИРОВА,
²С.Ш. ТАШПУЛАТОВ*, ³И.А. САФАРОВ, ²Р.Д. АКБАРОВ², ⁴И.В. ЧЕРУНОВА

¹Бухарский инженерно-технологический университет,
Республика Узбекистан, 205017, г. Бухара, ул. К. Муртазаева, 15
²Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,
Республика Узбекистан, 100100, г.Ташкент, ул.Шохжахон, 5
³Ташкентский химико-технологический институт, Республика Узбекистан,
100011, г. Ташкент, ул.Навоий, дом 32
⁴Донской государственный технический университет, Российская Федерация,
346500, Ростовская обл., г.Шахты, ул.Шевченко, 147.
Электронная почта автора-корреспондента: ssht61@mail.ru*

Статья посвящена исследованию и разработке математической модели процесса электризации текстильных материалов в системе «человек - одежда - среда» в жарких климатических условиях. Разработанная математическая модель описывает процессы электризации в поперечных сечениях пакета одежды и на поверхностном слое кожи человека и позволяет рассчитать параметры антистатической одежды для защиты от повышенных температур. Установлено, что в области распределения температуры по длине одежды в четырех различных вариантах было обнаружено, что в I - варианте $\Delta l_T = 0,0249(\text{см})$, во II - варианте $\Delta l_T = 0,0337(\text{см})$, в III - варианте $\Delta l_T = 0,0413(\text{см})$, в IV - варианте $\Delta l_T = 0,0512(\text{см})$, в V - варианте $\Delta l_T = 0,0600(\text{см})$, в VI - варианте длина одежды в этой области увеличилась на 10% по сравнению с длиной одежды во II - варианте.

Ключевые слова: математическая модель, электростатическая безопасность, цилиндр, система, деформация одежды, теплообмен.

ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАДАН ҚОРҒАУ ҮШІН АНТИСТАТИКАЛЫҚ КИІМДІ ӘЗІРЛЕУДІ ШЕШУДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ЕСЕПТЕРІН ЖӘНЕ ӘДІСТЕРІН БЕЛГІЛЕУ

¹С.У. ПУЛАТОВА, ¹С.Х. КОДИРОВА,
²С.Ш. ТАШПУЛАТОВ*, ³И.А. САФАРОВ, ²Р.Д. АКБАРОВ², ⁴И.В. ЧЕРУНОВА

¹Бұхара инженерлік-технологиялық институты,
Өзбекстан Республикасы, 205017, Бұхара қ., к. Мұртазаев к-сі, 15
²Ташкент тоқыма және жеңіл өнеркәсіп институты,
Өзбекстан Республикасы, 100100, Ташкент қаласы, Шохжахон көшесі, 5
³Ташкент химия-технологиялық институты, Өзбекстан Республикасы, 100011, Ташкент қаласы,
Навоий көшесі, 32 үй
⁴Дон мемлекеттік техникалық университеті, Ресей Федерациясы,
346500, Ростов облысы, Шахты қаласы, Шевченко көшесі, 147.
Автор-корреспонденттің электрондық поштасы: e-mail: ssht61@mail.ru*

Мақала ыстық климаттық жағдайларда "адам - киім - орта" жүйесінде тоқыма материалдарын электрлендіру процесінің математикалық моделін зерттеуге және дамытуға арналған. Әзірленген математикалық модель киім пакетінің көлденең қималарында және адам терісінің беткі қабатында электрлену процесінің сипаттайды және жоғары температурадан қорғау үшін антистатикалық киімнің параметрлерін есептеуге мүмкіндік береді. Киімнің ұзындығы бойынша температураның таралу аймағында төрт түрлі нұсқада I-нұсқада $\Delta l_T = 0,0249(\text{см})$, II-нұсқада

$\Delta L_T = 0,0337$ (см), III-нұсқада $\Delta L_T = 0,0413$ (см), IV-нұсқада $\Delta L_T = 0,0512$ (см), V-нұсқада $\Delta L_T = 0,0600$ (см), VI-нұсқада, осы аймақтағы киімнің ұзындығы 10% - га артқаны анықталды.

FORMULATION OF A MATHEMATICAL PROBLEM AND METHODS FOR SOLVING THE DEVELOPMENT OF ANTISTATIC CLOTHING FOR PROTECTION FROM ELEVATED TEMPERATURES

¹S.U. PULATOVA, ¹S.H. KODIROVA,
²S.Sh. TASHPULATOV*, ³I.A. SAFAROV, ²R.D.AKBAROV, ⁴I.V.CHERUNOVA

Bukhara Engineering Technological Institute,
¹Republic of Uzbekistan, 205017, Bukhara, st. K.Murtazaeva, 15
Tashkent Institute of Textile and Light Industry,
Republic of Uzbekistan, 100100 Tashkent, Shokhjakhon st., 5
Tashkent Institute of Chemical Technology,
Republic of Uzbekistan, 100011, Tashkent, st. Navoiy, house 32
Don State Technical University, Russian Federation,
346500, Rostov region, Shakhty, st. Shevchenko, 147.
Corresponding author e-mail: ssht61@mail.ru*,

The article is devoted to the study and development of a mathematical model of the process of electrification of textile materials in the system "man - clothing - environment" in hot climatic conditions. The phenomenon of static electrification, which occurs in the processes of manufacturing textile materials and products from them, as well as during the operation of finished products, leads to a decrease in the quality of products, causes inconvenience in work, and when an electric discharge occurs, it poses a threat to human life. Such interactions of elements in the "person - clothing - environment" system such as friction, compression, tension, shear increase the contact area of two media, and depending on the rate of these processes, they enhance or weaken metabolic processes, which contributes to an increase in the maximum static charge generated on contacting surfaces. temperature values for special clothing of limited length at the nodal points. At the same time, the number of nodal points is 1601, the number of connected elements is 800. In the area of temperature distribution along the length of the garment, in four different versions, it was found that in the I – version, $\Delta L_T = 0,0249$ (см) in the II – version $\Delta L_T = 0,0337$ (см), in the III – version $\Delta L_T = 0,0413$ (см), in the IV – version $\Delta L_T = 0,0512$ (см), in the V – version $\Delta L_T = 0,0600$ (см), in the VI - version, the length of the clothes in this area increased by 10% compared to the length of the clothes in the II – version.

Keywords: mathematical model, electrostatic safety, cylinder, system, clothing deformation, heat transfer.

Введение

Вопросы обеспечения электростатической безопасности определяются вариантом состава и параметрами материалов. Совокупность этих взаимозависимых характеристик является входной информацией для выполнения инженерных расчетов в области конструирования одежды.

Основы математического моделирования определяются первоначально представлениями процесса электризации текстильных материалов в рамках системы «Человек - Одежда - Среда». Явление статической электризации, возникающее в процессах изготовления текстильных материалов и изделий из них, а также при эксплуатации готовых изделий, ведет к снижению качества

продукции, доставляет неудобства в работе, нарушает технологические процессы производства, а при возникновении электрического разряда представляет угрозу человеку и может приводить к несчастным случаям.

Модели, описывающие процесс возникновения электрического заряда, его влияние на производственный процесс и на организм человека, рассматривались в работах исследователей [1-10]. Автор [1] отмечает трудность интерпретации и сопоставления получаемых результатов при исследовании электризации вследствие большого разнообразия процессов взаимодействия между контактирующими материальными средами. Такие взаимодействия как трение, сжатие, растяжение, сдвиг и т.д., увеличивают площадь

контакта двух сред. А в зависимости от скорости протекания этих процессов усиливают или ослабляют обменные процессы, что способствует увеличению максимальной величины статического заряда, образующегося на контактирующих поверхностях. Поэтому, механические воздействия играют большую роль в процессах электризации, что отмечают все исследователи.

Модель процесса электризации при контакте двух диэлектриков с переходом электронов, где рассмотрены условия перехода заряда при контакте двух диэлектриков с различными энергиями уровня Ферми, рассмотрена в работе [2]. Модель процесса электризации, основанная преимущественно на диффузном переходе ионов с одной поверхности на другую, предложена в работах [3,4].

Автором [5, 6] разработана математическая модель системы «Человек-Специальная защитная одежда от низких температур и статического электричества-Среда», позволяющая рассчитывать параметры пакета одежды с антиэлектростатическим эффектом.

Работа [7] посвящена расчету оптимальных параметров толщины теплозащитных слоев одежды на основе оптимизационной математической модели «Человек-Одежда-Среда» и обосновано, что для оптимизационного моделирования целесообразно использовать модель с «овальным» сечением туловища, так как это сводит последующие решения к осе симметричным.

В работе [8] разработана математическая модель распределения температурного поля в слоях «Человек-Одежда-Среда», учитывающая зависимости деформации теплофизических и геометрических характеристик системы в процессе проникновения сырой нефти в пакет материалов одежды.

В работе [9] разработана математическая модель системы «локальная зона человека теплозащитная одежда окружающая среда», дающая возможность прогнозировать тепловое состояние коленного сус-

тава человека в положениях стоя и сидя. Прогнозирование тепло и влагопотерь осуществляется при помощи моделирования процесса теплопередачи с поверхности сложных стенок коленного сустава, при сгибании ноги, геометрически представленной в виде цилиндра и сферы.

Работа [10] посвящена разработке математической модели воздействия ветра на пакет одежды с объемными несвязными утеплителями. Для решения этой задачи использована цилиндрическая модель туловища человека, покрытого равномерным слоем одежды с объемным утеплителем.

Из анализа рассмотренных моделей можно сделать вывод, что большинство моделей явления электризации, предложенных исследователями, касаются теплозащитной одежды для пониженных температур. При математическом моделировании изменения электростатического заряда во времени рассматривался только процесс стекания заряда посредством электропроводности, а эмиссия электрического заряда с поверхности материала в воздушную прослойку и зависимость электрической проводимости материала от его влажности не учитывались.

Материалы и методы исследований

Исходя из вышеизложенного, основной целью данной работы является разработка математической модели антистатической одежды для работы в жарких климатических условиях. В этой связи тело человека рассматривается как деформируемое цилиндрическое тело конечного размера, а одежда как мягкая оболочка (рис 1) Исследуемая задача сводится к моделированию деформаций цилиндра с мягкой оболочкой. Данная постановка задачи позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние цилиндра при тепловом воздействии с учетом влияния электростатического поля. Уравнения динамики цилиндра с тонкой скрепленной оболочкой принимает следующий вид

$$\begin{aligned} (k + \frac{4}{3}G) \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{w} - \operatorname{Grad} \operatorname{rot} \bar{w} &= \gamma \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2}, \\ \nabla^2 \theta - (1/\chi) \dot{\theta} - \eta \operatorname{div} \bar{w} &= -Q/\chi \end{aligned} \quad (1)$$

где: k -объемный модуль; G -модуль сдвига; θ -температура; $\eta = (3\lambda + 2\mu)\alpha$

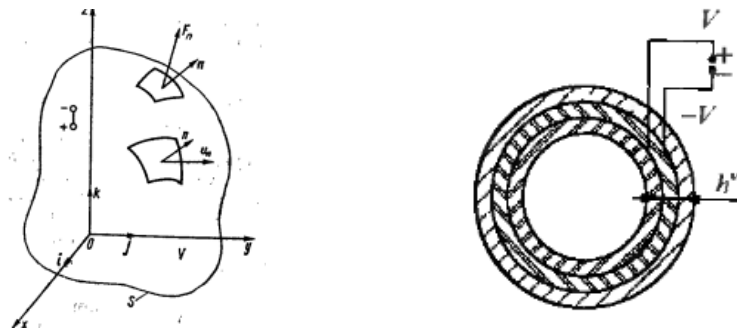


Рисунок. 1. Расчетная схема для разработки математической модели антистатической одежды:

λ и μ - коэффициенты Ламе; α_i - коэффициент линейного термического расширения; $\chi = \lambda_0 / c_e$; c_e - удельная теплоемкость при постоянной деформации; λ_0 - постоянная величина; Q - величина, которая зависит от количества тепла; γ - плотность на единицу объема материала цилиндрического

тела; $\vec{W}(W_r, W_\phi, W_z)$ - вектор перемещений цилиндра.

Если одежда рассматривается как многослойная цилиндрическая оболочка, тогда дифференциальные уравнения оболочки записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1-v'}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha^2} + \frac{1+v'}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{m'b'^2}{B'} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + \frac{1-v'}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+v'}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha \partial \theta} + v' \frac{\partial w}{\partial \alpha} - \frac{m'b'^2}{B'} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ v' \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{\partial v}{\partial \theta} + k \nabla^2 \nabla^2 w + w - \frac{m'b'^2}{B'} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $k' = \frac{D}{H^2 B'}$; $\alpha = \frac{x}{H}$; m' - масса многослойной оболочки, отнесенная к единице площади нейтральной поверхности (A); b' - радиус нейтральной поверхности. Система уравнений (2) отличается от

соответствующих уравнений оболочки только жесткостями на растяжение и изгиб. Полные уравнения движения оболочки цилиндра в цилиндрической системе координат имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \tilde{\lambda} \theta \delta_{ij} + 2\tilde{\mu} \epsilon_{ij}, \\ \theta &= \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \epsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \left(u_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right); \quad \epsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ \epsilon_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right]; \quad \epsilon_{\theta z} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right]. \end{aligned}$$

Вынужденные уравнения электростатики имеют следующий вид (рис. 2)

$$\vec{E} = -\text{grad} \psi = -\vec{e}_r \frac{\partial \psi}{\partial r} - \vec{e}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \vec{e}_z \frac{\partial \psi}{\partial z},$$

$$\text{div} \vec{D} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r D_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial D_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

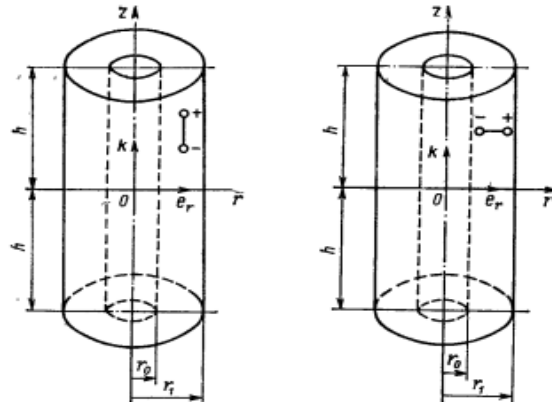


Рисунок.2. Цилиндр в электростатическом поле

Электростатическое поле учитывается через граничные условия при $z = \pm h$, которое имеет следующий вид :

$$\psi|_{z \pm h} = \pm V_0(t),$$

$$D_r|_{r \begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \end{pmatrix}} = \left[-\varepsilon_{11}^{\delta} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + e_{15} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right]_{r \begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \end{pmatrix}} = 0. \quad (5)$$

Таким образом, математическая постановка модели системы «человек-одежда-среда» дает возможность оптимального выбора определения состояния одежды при внешних воздействиях.

Методика и алгоритм решения задачи деформации одежды ограниченной длины при наличии теплового потока.

Дана одежда ограниченной длины ℓ (см). Площадь поперечного сечения F предполагается постоянной по длине. Модуль упругости материала одежды - E , коэффициент теплового расширения материала стержня - α . Одежда с внутренней стороны свободно держится, или оболочечный цилиндр и внутренняя полость тела имеют скользящий контакт. Вместе с этим на поверхности поперечного сечения приложен тепловой поток q ($Вт / см^2$). Через площадь поперечного сечения происходит теплообмен с окружающей средой. (рис. 1). Требуется определить поле распределения температуры

по длине тела с заполнителем от поля температуры и электромагнитное поле.

Естественно, возникающие при этом поля температур, перемещений, деформаций и напряжений будут распределены по длине конструкции нелинейным образом. В связи с этим, в малой части длины конструкции, поле распределения физических величин примем в виде кривой второго порядка. Например, рассмотрим поле распределения температуры в интервале $0 \leq x \leq \ell$, где $\ell \ll L$ - конечная длина рассматриваемого частично теплоизолированного стержня; ℓ - длина части одежды, $\ell \leq (0,1 \text{ см})$

Предположим, что поперечное сечение постоянно по длине стержня, тогда в интервале $0 \leq x \leq \ell$ поле распределения температуры $T = T(x)$ представим в виде кривой второго порядка,

$$T(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2, \text{ при } 0 \leq x \leq \ell, \quad (6)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - некоторые константы, значения которых пока неизвестны. Для нахождения значения этих констант, рассматриваемую часть стержня делим пополам. И в

этой части фиксируем три узла (i, j, k) (рис. 3). Глобальные координаты этих узлов соответственно x_i, x_j, x_k , при этом $x_j = \frac{x_i + x_k}{2}$.

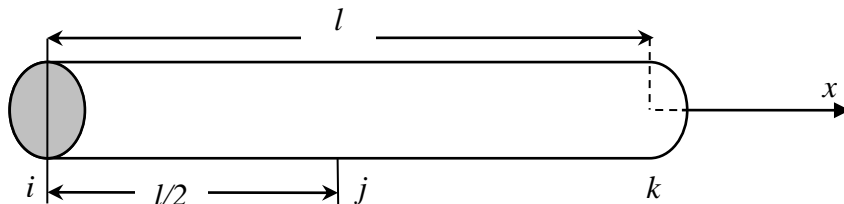


Рисунок 3. Квадратичный конечный элемент с тремя узлами

При этом в местной системе координат координаты трёх узлов определяются следующим образом: $x_i = 0$; $x_j = \frac{\ell}{2}$; $x_k = \ell$.

Далее введём следующие обозначения, характеризующие значение температуры в узлах i, j, k .

$$T_i = T(x = x_i); \quad T_j = T(x = x_j); \quad T_k = T(x = x_k) \quad (7)$$

Таким образом, для первой и второй половины стержня находим значения истинного термоупругого напряжения

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{(i,j)} &= \sigma_{x(i,j)} + \sigma_{T(i,j)} = -\frac{45\alpha E}{4} - \frac{55\alpha E}{4} = -\frac{100\alpha E}{4} = -25\alpha E; \\ \sigma_{(j,k)} &= \sigma_{x(j,k)} + \sigma_{T(j,k)} = \frac{45\alpha E}{4} - \frac{145\alpha E}{4} = -\frac{100\alpha E}{4} = -25\alpha E. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Полученные численные результаты (на 100% точно) совпадают с аналитическими решениями, приведенными в работах [1,2]. Эти сравнения показывают, что точность результата метода приведенного универ-

сального вычислительного алгоритма является самой высокой.

В пределах этого элемента аппроксимируя температуру $T=T(x)$ квадратным полиномом, получим следующее выражение

$$T = T(x) = \varphi_i(x)T_i + \varphi_j(x)T_j + \varphi_k(x)T_k, \quad (9)$$

где $\varphi_i(x), \varphi_j(x), \varphi_k(x)$ - функции формы для одномерного квадратичного конечного элемента с тремя узлами, и они выражаются

через формулу (8). Тогда в пределах этого элемента градиент температуры определяется следующим образом

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x} T_i + \frac{\partial \varphi_j(x)}{\partial x} T_j + \frac{\partial \varphi_k(x)}{\partial x} T_k. \quad (10)$$

Как видно, здесь надо учитывать удлинение и расширение одежды за счет температуры.

Дана одежда ограниченной длины ℓ (см). Площадь поперечного сечения F постоянна по длине. Коэффициент теплообмена с окружающей средой через площадь

поперечного сечения правого конца S_k , температура окружающей среды T_{ock} . Требуется определить поле распределения температуры по одежде. Расчетная схема задачи приведена ниже (рис. 4).

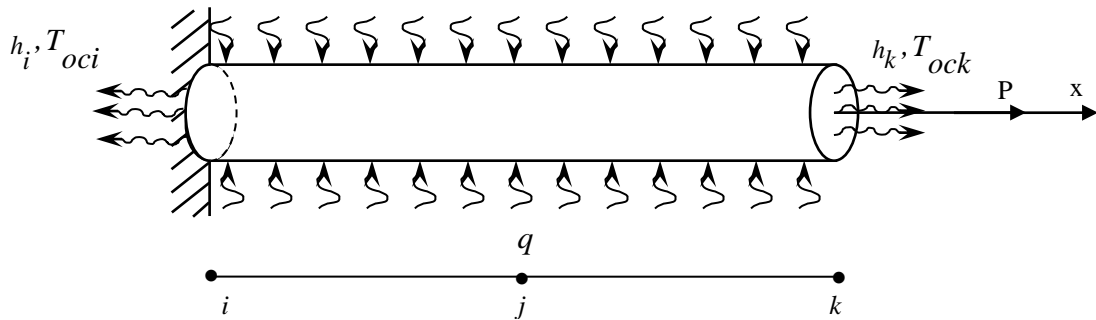


Рисунок. 4. Одежда под влиянием теплового потока и растягивающей силы

Рассмотрим данный стержень как квадратичный конечный элемент с тремя узлами (i, j, k) .

Дифференциальное уравнение распределения температуры данного случая будет таким

$$K_{xx} \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (11)$$

Отсюда определим T_k

$$T_k = \frac{6K_{xx} F \ell (h_i T_{oci} - h_k T_{ock}) - \pi q r \ell^2 (13K_{xx} + 7h_i \ell) + 6F h_i h_k \ell^2 T_{ock}}{(K_{xx} h_k \ell + K_{xx} h_i \ell + h_i h_k \ell^2) 6F} \quad (12)$$

Из последней формулы видно, что на правом конце стержня в точке $x = x_k$ значение температуры T_k прямо пропорционально значению коэффициента теплопроводности материала одежды, тепловому потоку подведенному к боковой поверхности

одежды. Теперь, подставляя найденное значение T_k в выражение (12), найдем значение температуры T_j в точке $x = x_j$ стержня

$$T_j = \frac{6K_{xx} F \ell (2K_{xx} [h_i T_{oci} - h_k T_{ock}] + h_i h_k \ell (T_{oci} + T_{ock}) - 2h_k^2 \ell T_{ock}) - \pi q r \ell^2 (26K_{xx}^2 + 10K_{xx} h_i \ell + 9K_{xx} h_k \ell + 3h_i h_k \ell^2)}{12K_{xx} F (K_{xx} h_k \ell + K_{xx} h_i \ell + h_i h_k \ell^2)} \quad (13)$$

Далее построен вычислительный алгоритм определения деформационного состояния одежды ограниченной длины при наличии теплового потока и теплообмена. Выявлен соответствующий функционал, выражающий полную тепловую энергию рассматриваемой одежды с учетом заданного теплового потока, теплообмена и растягивающей силы. Минимизируя последние по узловым значениям температур, построена разрешающая система линейных алгебраических уравнений.

Результаты и их обсуждение

Дана одежда ограниченной длины. $L, (см)$ Площадь поперечного сечения

$F, (см^2)$ постоянна по длине. Верхний конец одежды жестко заземлен, а на нижнем конце приложена осевая растягивающая сила $P, (кГ)$. Модуль упругости материала стержня $E, (кГ/см^2)$, коэффициент теплопроводности материала стержня $K_{xx}, (Вт/(см^2 \cdot C))$, коэффициент теплового расширения $\alpha, (1/°C)$. В верхнем конце стержня задана температура $T = T(x=0) = T_1$. Через участки $x_1 \leq x \leq x_2, x_3 \leq x \leq x_4, x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4$ боковой поверхности и площади поперечного сечения нижнего конца стержня проис-

ходит теплообмен с окружающими их средами. Здесь температуры окружающей среды обозначим через $T_{oc1}, T_{oc2}, T_{oc3}$, а коэффициенты теплообмена с окружающей сре-

дой соответственно h_1, h_2, h_3 . Боковая поверхность участков $0 \leq x \leq x_1, x_2 \leq x \leq x_3, x_4 \leq x \leq L$ теплоизолирована (рис.5)

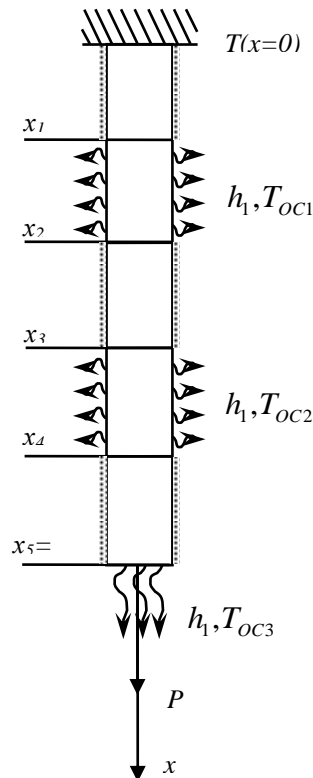


Рисунок. 5. Расчетная схема задачи

Требуется определить величину удлинения одежды от воздействия осевой растягивающей силы $P, T = T(x = 0) = T_0$ и температуры окружающей среды $T_{oc1}, T_{oc2}, T_{oc3}$. Здесь надо учитывать, что некоторые участки одежды теплоизолированы по боковой поверхности. Для этого рассматриваемый стержень длиной L будем дискретизировать квадратичными конечными элементами с тремя узлами.

Теплоизолированную по боковой поверхности участки $0 \leq x \leq x_1, x_2 \leq x \leq x_3, x_4 \leq x \leq L$ одежды дискретизируем на равные элементы. Пусть длина каждого элемента

$$\Delta l_1 = \frac{x_1 - x_0}{N_1} = \frac{x_3 - x_2}{N_2} = \frac{L - x_4}{N_3}$$

будет Δl_1 . А участки, где происходит теплообмен с окружающей

средой, дискретизируем квадратичными элементами с длиной $\Delta l_2 = \frac{x_2 - x_1}{N_4} = \frac{x_4 - x_3}{N_5}$.

Теперь будем исследовать следующие положения, где длина рассматриваемой одежды равна $L = 80 (см)$, площадь поперечного сечения стержня $F = 20 (см^2)$, модуль упругости материала одежды $E = 2 \cdot 10^6 (кг/см^2)$, коэффициент теплопроводности $K_{xx} = 72 (Вт/см^{\circ}C)$, коэффициент теплового расширения материала одежда $\alpha = 125 \cdot 10^{-7} (1/^{\circ}C)$, $T_1 = 30 (^{\circ}C)$ и, $x_1 = 16 (см), x_2 = 32 (см), x_3 = 48 (см), x_4 = 64 (см), x_5 = L$.

I-вариант $h_1 = h_2 = h_3 = 10 (Вт/см^2 \cdot ^\circ C), T_{oc1} = T_{oc2} = T_{oc3} = 20 (^\circ C)$

Число конечных элементов 800. Число узловых точек 1601. Длина конечных элементов

одинакова: $\Delta l = 80(см) / 800 = 0,1(см)$.

В таком положении значения температуры в 1601 узловых точках одежды приведены в табл. 1. А поле распределения температуры по длине одежды приведено на ри-

сунке 6. В этом рисунке по оси абсцисс расположены номера узловых точек одежды, а по оси ординат - значения температуры.

Из рис. 6 и табл. 1 видно, что в этом варианте поле распределения температуры по длине одежды выражается через равномерную непрерывную кривую.

Таблица 1 - Закон распределения поля температур в фиксированных точках стержня при

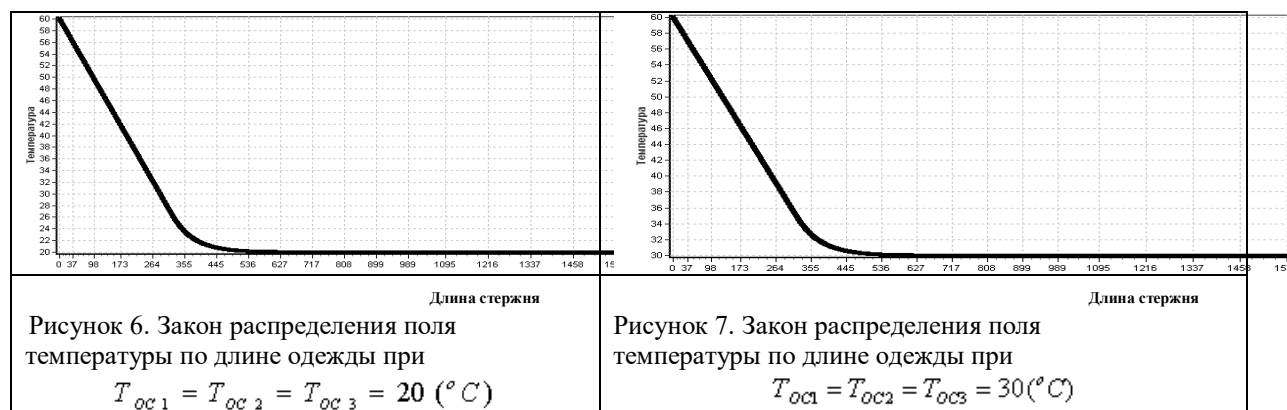
$$T_{oc1} = T_{oc2} = T_{oc3} = 20 (^\circ C)$$

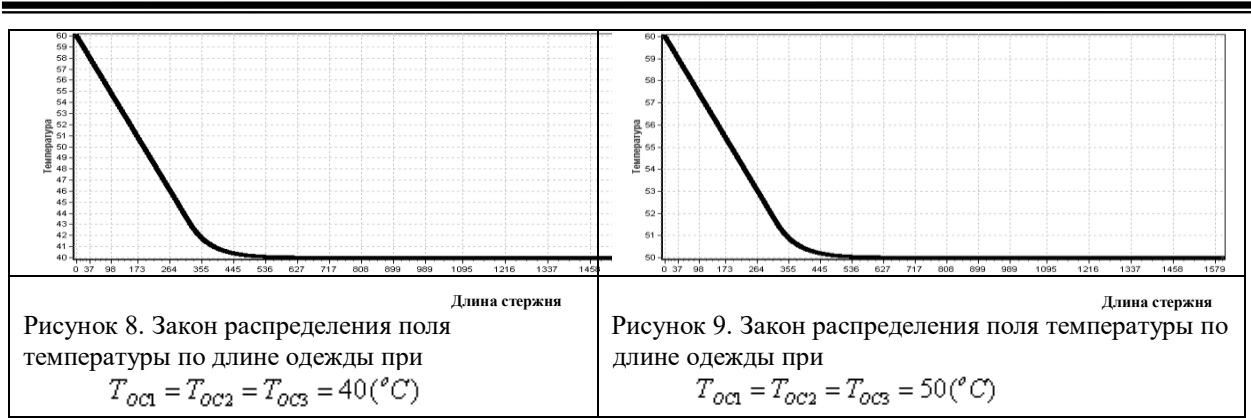
T1=	T350=	T700=	T1050=	T1400=
60,0000000	23,9191529	20,0457544	20,0019617	20,0000559
T50=	T400=	T750=	T1100=	T1450=
54,8458907	21,7101294	20,0386337	20,0008571	20,0000478
T100=	T450=	T800=	T1150=	T1500=
49,5865956	20,7468463	20,0315131	20,0003769	20,0000397
T150=	T500=	T850=	T1200=	T1550=
44,3273004	20,3276018	20,0243924	20,0001714	20,0000316
T200=	T550=	T900=	T1250=	T1600=
39,0680053	20,1469982	20,0172718	20,0000906	20,0000235
T250=	T600=	T950=	T1300=	T1601=
33,8087101	20,0734752	20,0101511	20,0000721	20,0000233
T300=	T650=	T1000=	T1350=	
28,5494150	20,0528751	20,0044952	20,0000640	

Здесь удлинение одежды от поля распределения температуры по длине одежды

$$\Delta l_T = \alpha \int_0^L T(x) dx = 0,0248791929(см)$$

соответственно [2] будет равно





II-вариант. Пусть $h_1 = h_2 = h_3 = 10 (Вт/см^2 \cdot ^{\circ}C)$, $T_{oc1} = T_{oc2} = T_{oc3} = 30(^{\circ}C)$.

Для этого варианта полученные числовые результаты показаны в таблице 2. Поле распределения температуры по длине одежды выражается через равномерную непрерывную кривую. Оно приведено на рисунках 6,7. А также в этом варианте удлинение стержня от поля температуры

будет равно $\Delta l_T = 0,0336593947(см)$. Сравнивая результаты, полученные в I-II вариантах видим, когда температура окружающей среды увеличивается на 50% (от $T_{oc} = 20(^{\circ}C)$ до $T_{oc} = 30(^{\circ}C)$), то удлинение одежды увеличивается на 132,84%.

Таблица 2 - Закон распределения поля температур в фиксированных точках стержня при $T_{oc1} = T_{oc2} = T_{oc3} = 30(^{\circ}C)$

T1= 60,0000000	T350= 32,9393647	T700= 30,0343158	T1050= 30,0014712	T1400= 30,0000419
T50= 56,1344181	T400= 31,2825971	T750= 30,0289753	T1100= 30,0006428	T1450= 30,0000358
T100= 52,1899467	T450= 30,5601347	T800= 30,0236348	T1150= 30,0002827	T1500= 30,0000298
T150= 48,2454753	T500= 30,2457014	T850= 30,0182943	T1200= 30,0001285	T1550= 30,0000237
T200= 44,3010040	T550= 30,1102487	T900= 30,0129538	T1250= 30,0000679	T1600= 30,0000176
T250= 40,3565326	T600= 30,0551064	T950= 30,0076133	T1300= 30,0000541	T1601= 30,0000175
T300= 36,4120612	T650= 30,0396563	T1000= 30,0033714	T1350= 30,0000480	

III-вариант. Пусть $h_1 = h_2 = h_3 = 10 (Вт/см^2 \cdot ^{\circ}C)$, $T_{oc1} = T_{oc2} = T_{oc3} = 40(^{\circ}C)$.

Тогда, сравнивая с I вариантом, видим, что при увеличении температуры окружающей среды в два раза (от $T_{oc} = 20(^{\circ}C)$ до $T_{oc} = 40(^{\circ}C)$), удлинение одежды увеличивается на 177,99%.

Численные результаты, полученные в этом варианте, приведены в табл. 3. Здесь поле распределения температуры по длине стержня показано в виде рис. 8.

IV-вариант. Пусть $h_1 = h_2 = h_3 = 10 (Вт/см^2 \cdot ^{\circ}C)$, $T_{oc1} = T_{oc2} = T_{oc3} = 50(^{\circ}C)$.

Здесь по сравнению с I-вариантом температура окружающей среды меняется (от $T_{oc} = 20(^{\circ}C)$ до $T_{oc} = 50(^{\circ}C)$). В результате удлинение одежды будет $\Delta l_T = 0,0512197982 (см)$. По

сравнению с I-вариантом удлинение одежды увеличивается на 198,51%. Закон распределения поля температуры по длине одежды приводится в виде табл. 4 и рис. 9.

Таблица 3 - Закон распределения поля температур в фиксированных точках одежды при

$$T_{oc1} = T_{oc2} = T_{oc3} = 40(^{\circ}C)$$

T1= 60,0000000	T350= 41,9595765	T700= 40,0228772	T1050= 40,0009808	T1400= 40,0000279
T50= 57,4229454	T400= 40,8550647	T750= 40,0193169	T1100= 40,0004286	T1460= 40,0000231
T100= 54,7932978	T450= 40,3734231	T800= 40,0157565	T1150= 40,0001885	T1500= 40,0000198
T150= 52,1636502	T500= 40,1638009	T850= 40,0121962	T1200= 40,0000857	T1550= 40,0000158
T200= 49,5340026	T550= 40,0734991	T900= 40,0086359	T1250= 40,0000453	T1600= 40,0000117
T250= 46,9043551	T600= 40,0367376	T950= 40,0050756	T1300= 40,0000361	T1601= 40,0000117
T300= 44,2747075	T650= 40,0264375	T1000= 40,0022476	T1350= 40,0000320	

Таблица 4 - Закон распределения поля температур в фиксированных точках одежды при

$$T_{oc1} = T_{oc2} = T_{oc3} = 50(^{\circ}C)$$

T1= 60,0000000	T350= 50,9797882	T700= 50,0114386	T1050= 50,0004904	T1400= 50,0000140
T50= 58,7114727	T400= 50,4275324	T750= 50,0096584	T1100= 50,0002143	T1450= 50,0000119
T100= 57,3966489	T450= 50,1867116	T800= 50,0078783	T1150= 50,0000942	T1500= 50,0000099
T150= 56,0818251	T500= 50,0819005	T850= 50,0060981	T1200= 50,0000428	T1550= 50,0000079
T200= 54,7670013	T550= 50,0367496	T900= 50,0043179	T1250= 50,0000226	T1600= 50,0000059
T250= 53,4521775	T600= 50,0183688	T950= 50,0025378	T1300= 50,0000180	T1601= 50,0000058
T300= 52,1373537	T650= 50,0132188	T1000= 50,0011238	T1350= 50,0000160	

Заклучение, выводы

Таким образом, на основе анализа существующих математических моделей электризации защитной одежды определены критерии для разработки новой математической модели системы «Человек - Одежда – Среда», позволяющие описать процессы электризации в одежде в жарких климатических условиях.

На основе полученных дифференциальных уравнений были найдены значения температуры для специальной одежды ограниченной длины в узловых точках. При этом, количество узловых точек равно 1601, количество связанных элементов равно 800. В области распределения температуры по длине одежды в четырех различных вариантах было обнаружено, что в I варианте

$\Delta l_T = 0,0249(см)$, во II варианте
 $\Delta l_T = 0,0337(см)$, в III варианте
 $\Delta l_T = 0,0413(см)$, в IV варианте
 $\Delta l_T = 0,0512(см)$, в V варианте
 $\Delta l_T = 0,0600(см)$, в VI варианте длина одежды в этой области увеличилась на 10% по сравнению с длиной одежды во II – варианте. Разработанная математическая модель описывает процессы электризации в поперечных сечениях пакета одежды и на поверхностном слое кожи человека и позволяет рассчитать параметры антистатической одежды для защиты от повышенных температур.

Предложенная математическая модель позволяет определить условия проведения

экспериментов, оптимизировать основные параметры, а также оценить эффективность подбора материалов и конструктивных параметров одежды на этапе проектирования.

На основе разработанной математической модели была изготовлена экспериментально-опытная партия специальной антистатической одежды на предприятиях ООО "Al-Nakim Plus" и ООО "Ocean-Luixe"(Бухарская область). Разработанная новая антистатическая спецодежда была положительно оценена потребителями данной спецодежды - сотрудниками ООО "Региональные электрические сети» Бухарской области и специалистами швейных предприятий. Годовой экономический эффект от внедрения в производство новой спецодежды составил 309 060 000 рублей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лёб, Л. Статическая электризация - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.-408 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М Механика. Электростатика. Краткий курс теоретической физики - М.: Наука, 1969.-272 с.
3. Меркулова А.В., Исследование и разработка специальной антиэлектростатической одежды для защиты от пониженных температур. Дисс...канд. техн. наук по спец. 05.19.04. Шахты, Юж.-Рос. гос. ун-т экон. и сервиса 2007. -184 с.
4. Незгода, В.Ю. Изменение влажности, температуры и образование электростатических зарядов на хлопчатобумажной ленте при ее вытягивании // Текстильная промышленность, №2.-1988. - С.42-43
5. Черунова, И.В. Совершенствование методов проектирования специальной одежды для горноспасателей : дис....канд. техн. наук: 05.19.04 / И.В. Черунова. - М., 2001 - 193 с. библиогр.: с. 183-193
6. Черунова, И.В. Теоретические основы комплексного проектирования специальной теплозащитной одежды: дис.... докт. техн. наук: 05.19.04 . – Шахты: Юж.-Рос. гос. ун-т экон. и сервиса., 2008. – 394 с.
7. Кудрявцев, В. И. Усовершенствованная технология проектирования теплозащитной одежды на основе уточненных моделей теплообмена. Автореферат дис....канд. техн. наук: 05.19.04 / Новочеркасск -2004.- 24с.
8. Куренова, И. В. Разработка и исследование специальной нефтезащитной одежды с модифицированным пакетом материалов. автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.19.04 / Юж.-Рос. гос. ун-т экон. и сервиса. - Шахты, 2013 год,- 18 с.
9. Герасименко, М.С Разработка методики оптимизации параметров специальной теплозащитной одежды для астрономов, работающих в условиях гиподинамии: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.19.04 / Юж.-Рос. гос. ун-т экон. и сервиса. - Шахты, 2005. - 16 с.
10. Лебедева, Е. О. Исследование и разработка пакета специальной теплозащитной одежды с повышенной устойчивостью к ветру: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.19.04 / Юж.-Рос. гос. ун-т экон. и сервиса. - Шахты, 2006. - 24 с.

REFERENCES

1. Leb, L. Statischeкая ehlektrizatsiya - M.-L.: Gosehnergoizdat, 1963.-408 s. (in Russian)
2. Landau L.D., Lifshits E.M Mekhanika. Ehlektrostatika. Kratkii kurs teoreticheskoi fiziki - M.: Nauka, 1969.-272 s. (in Russian)
3. Merkulova A.V., Issledovanie i razrabotka spetsial'noi antiehlektrostaticheskoi odezhdyy dlya zashchity ot ponizhennykh temperatur. Diss...kand. tekhn. nauk po spets. 05.19.04. Shakhty, Yuzh.-Ros. gos. un-t ehkon. i servisa 2007. -184 s. (in Russian)
4. Nezgodaa, V.YU. Izmenenie vlazhnosti, temperatury i obrazovanie ehlektrostaticheskikh zaryadov na khlopchatobumazhnoi lente pri ee vytyagivanii // Tekstil'naya promyshlennost', №2 1988. - S.42-43. (in Russian)
5. Cherunova, I.V. Sovershenstvovanie metodov proektirovaniya spetsial'noi odezhdyy dlya gornospasatelei: dis....kand. tekhn. nauk: 05.19.04 / I.V. Cherunova. - M., 2001 - 193 s. bibliogr.: s. 183-193. (in Russian)
6. Cherunova, I.V. Teoreticheskie osnovy kompleksnogo proektirovaniya spetsial'noi teplozashchitnoi odezhdyy: dis.... dokt. tekhn. nauk: 05.19.04 . – Shakhty: Yuzh.-Ros. gos. un-t ehkon. i servisa., 2008. – 394 s. (in Russian)
7. Kudryavtsev, V. I. Usovershenstvovannaya tekhnologiya proektirovaniya teplozashchitnoi odezhdyy na osnove utochnennykh modelei teploobmena. Avtoreferat dis....kand. tekhn. nauk: 05.19.04 / NovoCherkassk -2004 god, 24s. (in Russian)
8. Kurenova, I. V. Razrabotka i issledovanie spetsial'noi neftezashchitnoi odezhdyy s modifitsirovannym paketom materialov. avtoreferat dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.19.04 / Yuzh.-Ros. gos. un-t ehkon. i servisa. - Shakhty, 2013 god, 18 s. (in Russian)
9. Gerasimenko, M.S Razrabotka metodiki optimizatsii parametrov spetsial'noi teplo-zashchitnoi odezhdyy dlya astronomov, rabotayushchikh v usloviyakh gipodinamii: avtoreferat dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.19.04 / Yuzh.-Ros. gos. un-t ehkon. i servisa. - Shakhty, 2005. - 16 s. (in Russian)
10. Lebedeva, E. O. Issledovanie i razrabotka paketa spetsial'noi teplozashchitnoi odezhdyy s povyshennoi ustoichivost'yu k vetru: avto-referat dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.19.04 / Yuzh.-Ros. gos. un-t ehkon. i servisa. - Shakhty, 2006. - 24 s. (in Russian)