

УДК 687.536.21.631.317

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕПЛООБМЕНА В ПАКЕТАХ ОДЕЖДЫ
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ**

Б.П. КУЛИКОВ, Н.А. КОРОБОВ, Н.А. РУМЯНЦЕВ

(Ивановская государственная текстильная академия)

Пакеты одежды представляют собой капиллярно-пористые тела, через которые постоянно происходит теплообмен человека с окружающей средой. Исследование теплообмена проводят с использованием различных методов и экспериментальных установок, в которых применяют нагреватели различных конструкций. В [1] приведена общая методика исследования теплообмена через однослойную одежду из изотропного материала на основе метода электротепловой аналогии (ЭТА).

В предлагаемой работе на основе этого метода проведено исследование теплообмена через многослойный пакет с зонально-неоднородными слоями, имеющими разные свойства. Метод ЭТА используют, когда исследуемые физические явления не могут быть точно воспроизведены при их экспериментальной постановке. Модели-

руемый процесс качественно не должен ничем отличаться от действительного процесса. Единственно, что должно быть одинаково в натуре и модели – это качественное протекание обоих процессов, по возможности абсолютно совпадающие. В этом случае оба процесса должны быть подобны между собой.

Принцип подобия требует, чтобы параметры, определяющие этот процесс, находились в строго определенных соотношениях. Различие во второстепенных деталях процесса может быть несущественно [2].

В качестве аналога исследуемого пакета из текстильных материалов был подобран многослойный пакет из электропроводной бумаги с разной проводимостью. Аналоги для потоков тепла и электричества представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Стационарное поле температур	Стационарное электрическое поле в проводящей среде
Уравнение теплопроводности $\bar{q} = -\lambda \text{grad}t$	Закон Ома $\bar{J} = -\sigma \text{grad}\varphi$
t – температура	φ – электрический потенциал
q – тепловой поток	J – плотность тока
λ – коэффициент теплопроводности	σ – удельная электропроводность
Q – расход тепла	I – сила тока

Для явлений теплопроводности и электропроводности можно записать

$$\text{grad}t = \frac{dt}{d\vec{n}}, \quad (1)$$

$$\text{grad}\varphi = \frac{d\varphi}{d\vec{n}}. \quad (2)$$

Согласно теореме Кирпичева-Гухмана [2] явления, относящиеся к одному классу, описываемые одинаковой системой дифференциальных уравнений с учетом условий однозначности, являются подобными.

Поток тепла через пакет тканей в натурной модели выражается уравнением

$$q_{\text{пак}} = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2), \quad (3)$$

где $q_{\text{пак}}$ – тепловой поток через пакет, Вт; δ – толщина ткани, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град); t_1 и t_2 – температура на поверхности соответственно внутреннего и внешнего слоя, град.

Уравнение потока электричества через пакет электропроводящей бумаги имеет вид:

$$I_{\text{эл}} = \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_{\text{эл}}}{\delta_{\text{элбум}}} (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (4)$$

где $I_{\text{эл}}$ – поток электричества через модель пакета, А; $\sigma_{\text{эл}}$ – удельная проводимость модели, 1/(Ом×м); φ_1 и φ_2 – электрические потенциалы на границах пакета, В; $\delta_{\text{элбум}}$ – толщина слоя (длина на электрической модели), м.

Уравнения (3), (4) имеют одинаковую структуру и формально также являются подобными.

В условия однозначности включено требование определения геометрических свойств системы, к которой относятся конкретные значения входящих в нее величин.

Масштабы температуры m_t , плотности теплового потока m_q и коэффициента теплопроводности m_λ выражены соответственно уравнениями:

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{t_1 - t_2} = m_t, \quad (5)$$

$$\frac{i_{y'}}{q_t} = m_q, \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_{y'}}{\lambda_t} = m_\lambda. \quad (7)$$

Выбор масштабных коэффициентов подчинен специальным ограничениям. Каждая их комбинация, построенная по типу безразмерных комплексов, должна равняться единице [2].

Для исследования теплопроводности методом электротепловой аналогии принята натурная модель многослойного пакета, ткани в котором имели разные теплозащитные свойства. На внутренней поверхности пакета заданы граничные условия второго рода в виде $q_c = \text{const}$ (при $x=0$), а на внешней поверхности заданы коэффициент теплоотдачи α_2 и температура окружающей среды $t_{ж2}$, то есть граничные условия третьего рода. При этом внутренние источники тепла отсутствуют ($q_v=0$).

Решение такой задачи сводится к нахождению распределения температуры по толщине пакета и на его поверхности. Для заданных граничных условий теплообмена аналитическое решение имеет вид:

$$\begin{cases} q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) \\ q = \alpha (t_{c1} - t_{ж2}) \end{cases}. \quad (8)$$

В качестве аналога при построении электрической модели был выбран трехслойный пакет текстильных материалов. Он состоял из покровной ткани, утеплителя и подкладочного материала. Их термические сопротивления были различны. Для каждого слоя текстильного материала толщиной $\delta=L$ был подобран многослойный пакет, состоящий из блоков электропроводной бумаги с разной проводимостью.

Количество слоев подбиралось таким образом, чтобы омическое сопротивление

бумаги в каждом блоке по отношению к термическому сопротивлению каждого отдельно взятого слоя ткани было одинаковым и кратным $1 \cdot 10^3$ Ом на квадрат. Размер стороны квадрата L соответствовал толщине слоя ткани δ с увеличением, кратным 50. Измерения электрических сопротивлений проводились на цифровом омметре типа В 7-23.

Учитывая, что прямого аналога коэффициенту теплообмена α среди электрических характеристик нет, граничное условие третьего рода воспроизводилось за счет подбора и добавления к длине электрической модели дополнительного четвертого блока из электропроводной бумаги:

$$L_4 = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{\alpha}, \quad (9)$$

где L_4 – длина электрического блока (модели), эквивалентная толщине с учетом коэффициента увеличения, м; $\lambda_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности пакета из тканей, Вт/(м·°С); α – коэффициент теплообмена на поверхности, Вт/(м²·°С).

Для проводящей неоднородной пластины в стационарном электрическом поле закон Ома имеет вид [3]:

$$I_{1,2} = \frac{h(\varphi_2 - \varphi_1)}{\rho}, \quad (10)$$

где h – толщина листа, м; ρ – удельное электрическое сопротивление, (Ом·м).

Отношение удельного электрического сопротивления к толщине пластины можно выразить уравнением вида:

$$\frac{\rho}{h} = \frac{\ell}{\ell h} = R_{\square}, \quad (11)$$

где ℓ – длина стороны квадрата, м; R_{\square} – поверхностное электрическое сопротивление на квадрат, Ом.

Электрическая проводимость бумаги вдоль расположения волокон и в поперечном направлении неодинакова. С целью

уменьшения влияния анизотропии электропроводящие листы укладывались один на другой с поворотом на 90° относительно направления волокон. Коэффициент анизотропной проводимости $\lambda_{\text{аниз}}$ определялся по формуле [3]:

$$\lambda_{\text{аниз}} = R_{\square\text{cp}}(X) / R_{\square\text{cp}}(Y), \quad (12)$$

где $R_{\square\text{cp}} = 0,5(\rho X + \rho Y)$.

Рассчитанные таким образом коэффициенты анизотропной проводимости составили для первого блока пакета электрической модели 0,976; для второго 0,980; для третьего 0,952; для четвертого 0,970.

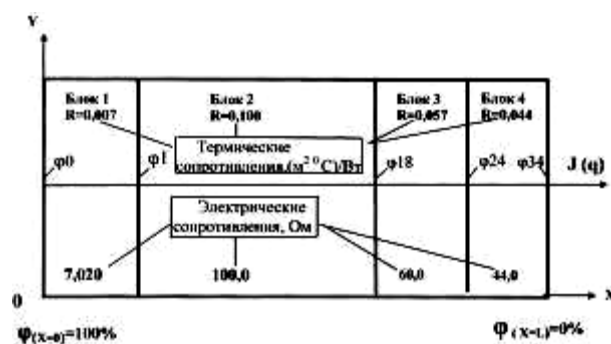


Рис. 1

Из подготовленных блоков была собрана электрическая модель пакета одежды, которая показана на рис. 1.

На модель накладывались граничные условия, которые требуют, чтобы на свободных краях модели выполнялось условие параллельности линий тока, то есть $\partial\varphi/\partial n=0$ и $\varphi=\text{const}$. Реализация граничного условия $\varphi=\text{const}$ выполнялась за счет того, что блоки модели скреплялись между собой специальными шинами-зажимами, выполненными из электролитической меди. На торцевые края модели также устанавливали шины, через которые модель подключали к измерительному устройству.

При моделировании для удобства проведения расчетов от именованных величин измерения обычно переходят к безразмерным или приведенным величинам. В качестве приведенной единицы потенциала принимали разность потенциалов на входе и выходе питающего устройства измери-

тельного прибора. Значение потенциала на входе, равное 39В, принимали за 100% ($\varphi=1$), а на выходе 1В принимали за 0% ($\varphi=0$).

Вдоль модели по середине, начиная от входной шины, параллельно свободным краям с постоянным шагом, размечали положение точек, в которых измеряли величины электрических потенциалов. Для каждой точки φ_i модели рассчитывали значения приведенных электрических потенциалов [4]:

$$\varphi_{\text{прив}} = \frac{\varphi_i - \varphi_{\text{min}}}{\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}}}, \quad (13)$$

где $\varphi_{\text{прив}}$ – приведенный электрический потенциал; φ_i – электрический потенциал, измеренный в точке модели, В.

Полученные данные использовали для расчета температуры в пограничных точках на основе уравнения:

$$t_i = t_{\text{min}} + (t_{\text{max}} - t_{\text{min}})\varphi_{\text{прив}}. \quad (14)$$

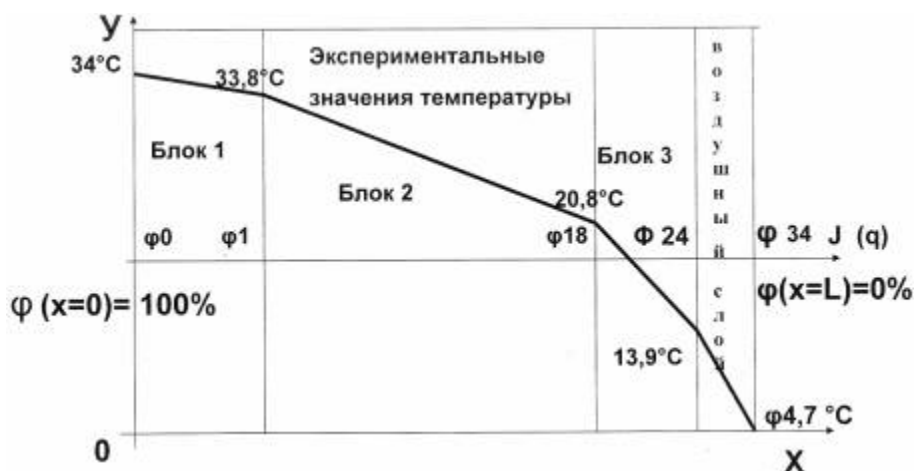


Рис. 2

Как видно из приведенных данных, наибольшее расхождение между расчетными и экспериментально полученными данными составляет на границе первого и второго слоя 0,7°C, а на границе третьего и четвертого слоя (ткань воздух) 0,6°C. Эти расхождения явились следствием того, что при подборе пакета электропроводной бумаги в этих блоках имели место отклоне-

Температура на внутренней поверхности пакета принята равной 34°C и обозначена как t_{max} , а температура у поверхности пакета, равная температуре прилегающего слоя воздуха, принята равной 5°C и обозначена как t_{min} .

Таблица 2

φ_i , В	φ_i привел	t_i эксперим., °C	t_i расчет., °C
φ_0 шина	1,0	34,0	34,0
φ_1	0,9960	33,864	33,090
φ_3	0,9568	32,590	-
φ_4	0,9321	31,690	-
φ_{18}	0,6131	20,840	20,700
φ_{19}	0,6618	20,00	-
φ_{24}	0,4092	13,913	14,500
φ_{34} ВОЗД	0,1402	4,7668	5,0

В табл. 2 приведены результаты эксперимента и расчетные данные по оценке распределения температуры в точках, лежащих на границах слоев пакета.

Распределение температуры по толщине пакета, эквивалентное распределению электрического потенциала по длине модели пакета, показано на рис. 2.

ния в 0,02 и 0,003 Ом против требуемых значений.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали, что метод (ЭТА) может быть использован при экспериментальном изучении распределения температуры по толщине много-

слойных пакетов, состоящих из разных по теплопроводности и толщине тканей.

2. Построенная электрическая модель может быть многократно использована для заявленных целей применительно к разным температурным условиям внешней среды, а также при разной тепловой нагрузке, связанной со степенью тяжести выполняемой работы. На модели можно также измерять значения контактных термических сопротивлений внутри пакетов на границах тканей.

ЛИТЕРАТУРА

1 Куликов Б.П., Щадрова С.Н., Щадров В.С. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1982, №2. С.118...122.

2. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. – Минск, АН БССР, 1963. С.509...513.

3. Рязанов Г.А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. – М.: Наука, 1966.

4. Фильчаков П.Ф., Панчишин В.И. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге. – Киев, АН УССР, 1961. С. 157...165.

Рекомендована кафедрой конструирования швейных изделий. Поступила 03.09.07.
