

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ПРОСЛОЙКУ ПАКЕТА ОДЕЖДЫ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОАНАЛОГИИ

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

(Ивановская государственная текстильная академия)

Теплообмен в пакетах одежды в общем случае зависит от воздухопроницаемости материалов. Кроме этого существенное влияние на теплообмен оказывают прослойки воздуха, всегда имеющиеся в структуре пакетов.

Для прослоек правильных геометрических форм процесс переноса тепла движущимся воздухом выражается в общем случае на основе критериальных зависимостей вида $Nu = f(Re, Pr)$. При этом должен быть известен характер аэродинамического поля.

Целью данной работы является построение аэродинамического поля движения воздуха в незамкнутой прослойке одежды и определение скорости фильтрации воздуха из прослойки.

На поверхности одежды при ее обдуве динамический напор ветра переходит в статическое давление. Кроме статического давления возникает дополнительное давление, являющееся результатом внезапного торможения частиц воздуха на поверхности с наветренной стороны. Это давлени-

е называется скоростным или динамическим и определяется по общеизвестной формуле:

$$p = \rho \frac{v^2}{2}, \quad (1)$$

где p – динамическое давление, Па; ρ – плотность воздуха, $кг/м^3$; v – скорость набегающего потока, м/с.

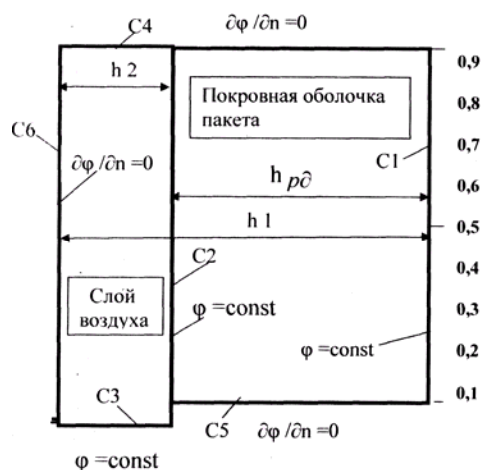


Рис. 1

На рис. 1 схематически показан характер движения воздушного потока при обтекании тела, рассмотренный в работах [1], [2]. Давление P в зоне CD становится равным давлению набегающего потока. Оно будет больше по сравнению с давлением в точках поверхности, удаленных от этой зоны.

Из-за повышенного давления воздух будет проникать в пакет одежды через поры тканей. На внутренней поверхности покровной оболочки в незамкнутой прослойке располагается зона с давлением, равным атмосферному ($P_{атм}$).

Внутренние слои одежды за прослойкой прилегают к телу и являются не проницаемыми для воздуха.

В качестве исходных условий при постановке эксперимента были приняты данные о воздухопроницаемости покровной оболочки пакета. Сама оболочка рассматривалась как капиллярно-пористое тело с постоянной структурой.

Толщина каждого слоя и пакета в целом значительно меньше радиуса полуобхватных измерений. На участках туловища средний радиус составляет величину 150 мм, а толщина пакета одежды второго слоя вместе с воздушными прослойками не превышает 40 мм [1]. Отношение этих величин значительно меньше единицы, поэтому толщину пакета можно представить

в виде плоского участка.

При прохождении фильтрующегося потока воздуха через оболочку внутрь пакета турбулентные пульсации будут сглажены и режим течения становится ламинарным. В этом случае между давлением воздушного потока на поверхности и скоростью фильтрации имеет место зависимость, описываемая законом Дарси:

$$v_{\phi} = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

где v_{ϕ} – скорость фильтрации, м/с; κ – коэффициент фильтрации, (м³·с)/кг; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, кг/м·с.

Критерием применимости закона Дарси служит критическое значение числа Рейнольдса, которое для фильтрации жидкости через волокнистые материалы составляет $Re \leq 15$ [2].

Для проведения исследования методом аналогий были определены физические и геометрические условия подобия натурной и электрической моделей [3], [4].

Аналоги, использованные при моделировании процесса фильтрации, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Стационарное электрическое поле в проводящей среде	Стационарное поле фильтрации жидкости
<p>Закон Ома плотность тока $\vec{j} = -\sigma \text{grad}\varphi$ φ – электрический потенциал J – плотность тока σ – удельная электропроводность I – сила тока</p>	<p>Закон Дарси скорость фильтрации $\vec{v} = -\chi \text{grad}p$ P – пьезометрический напор V – скорость фильтрации χ – коэффициент фильтрации Q – фильтрационный расход</p>
<p>Длина линии тока S Напряженность электрического поля $E = \frac{\partial \varphi}{\partial s}$ Поверхность, проницаемая для электрического тока Линии равных потенциалов $\varphi = \text{const}$ Линии электрического тока $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \text{const}$</p>	<p>Длина пути фильтрации L Градиент фильтрационного потока $L = \frac{\partial p}{\partial \ell}$ Воздухопроницаемая поверхность Линии равных напоров $P = \text{const}$ Линии тока воздуха $\frac{\partial p}{\partial n} = \text{const}$</p>

Уравнение скорости фильтрации, выраженное через технологические свойства

пакета, может быть представлено следующим образом:

$$v_{\phi} = \frac{\kappa_{\phi}(p_1 - p_2)}{\delta_{\text{тк}}}, \quad (3)$$

где $(p_1 - p_2)$ – перепад давления по обе стороны пакета, Па; δ – толщина пакета тканей, м.

При исследовании фильтрации линейные масштабы электрической модели m_{δ} могут быть выражены через отношение параметров электрической модели и модели фильтрации через пакет:

$$\frac{\delta_{\varepsilon(x,y)}}{\delta_{\phi(x,y)}} = m_{\delta}. \quad (4)$$

Масштабные коэффициенты градиента напора m_p , коэффициента фильтрации $m_{\chi\phi}$ и скорости фильтрации $m_{v\phi}$ выражены с помощью уравнений

$$\frac{\phi_1 - \phi_2}{p_1 - p_2} = m_p, \quad (5)$$

$$\frac{\delta_{\varepsilon}}{\chi_{\phi}} = m_{\chi\phi}, \quad (6)$$

$$\frac{i_{\phi}}{V_{\phi}} = m_{v\phi}, \quad (7)$$

а их комбинация подчинена определенному требованию [4]:

$$\frac{m_{v\phi} m_{\delta}}{m_{\chi\phi} m_p} = 1. \quad (8)$$

Геометрический образ электрической модели пакета одежды (области фильтрации) представлен на рис. 1 в виде плоской стенки, включающей покровную оболочку и незамкнутую прослойку воздуха. Глубина воздухопроницаемой зоны равна толщине покровной оболочки и незамкнутой прослойки, а высота модели по координате Y подобрана экспериментально из условий обеспечения требования $\partial\phi/\partial n = 0$.

Поверхности модели, обозначенные как $C1$, $C2$ и $C3$, соответствуют проницаемым участкам области фильтрации. На контуре $C1$ воздух фильтруется через оболочку пакета; $C2$ – поверхность, через которую

фильтрующийся воздух попадает в воздушную прослойку. Через контур $C3$ воздух выходит из прослойки наружу. Поверхности модели $C4$, $C5$ и $C6$ соответствуют непроницаемым участкам области фильтрации.

Требуется построить картину движения воздуха, а также определить скорость фильтрации в прослойке при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \text{на контуре } C1 \quad \phi_1 &= \text{const}, \\ \text{на контуре } C2 \quad \phi_2 &= \text{const}, \\ \text{на контуре } C3 \quad \phi_3 &= \text{const}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{на контуре } C4 \quad \frac{d\phi}{dn} = 0,$$

$$\text{на контуре } C5 \quad \frac{d\phi}{dn} = 0, \quad (10)$$

$$\text{на контуре } C6 \quad \frac{d\phi}{dn} = 0,$$

где n – представляет собой направление нормали к контурам модели.

Условия (9) соответствуют тому, что эти контуры являются линиями равных давлений и равных потенциалов. Поскольку при движении электрического тока аналогом напорной функции P является электрический потенциал ϕ , выполнение граничных условий на контурах $C1$, $C2$ и $C3$ сводится к обеспечению равенства потенциалов вдоль этих контуров.

Это достигается за счет того, что электропроводная бумага вдоль этих контуров зажимается в медные шины, к которым подводится постоянный электрический ток. Условия (10) на контурах $C4$, $C5$ и $C6$ выполняются автоматически ввиду того, что линии этих контуров являются силовыми, так как вдоль них течет электрический ток.

На рис. 1 обозначены также напоры, формирующиеся при давлении воздуха, движущегося через пакет. Напор $h1$ от поверхности пакета до внутреннего слоя, прилегающего к телу, принимали максимальным h_{max} . Напор в воздушной прослойке $h2$ принимали минимальным h_{min} .

Разность между ними представляет действующий напор:

$$h_{p\partial} = (h_{\max} - h_{\min}), \quad (11)$$

где $h_{\max} = P_{\text{атм}} + P_{\text{дин}}$, а $h_{\min} = P_{\text{атм}}$.

Значение динамического напора, рассчитанного исходя из средней скорости ветра 5 м/с, составило 16,1 Па, а коэффициент фильтрации для данного пакета был равен $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$.

Решение задачи фильтрации сводится к построению гидродинамической сетки потока, состоящей из эквипотенциальных линий и линий тока. Для выполнения этого условия на внешнем и внутреннем контурах покровной оболочки С1, С2 и на выходе из прослойки С3 закрепляли металлические шины. Контур модели С4, С5 и С6 сообщались с диэлектриком. На этих контурах выполнялось граничное условие $\partial\varphi/\partial n = 0$.

Модель подключали к интегратору ЭГДА-9/61 следующим образом. На шину С1 от гнезда прибора, обозначенного 100%, подавали рабочее напряжение 3,0 В, а шину С3 подключали к разъему, обозначенному 0%. Таким образом выполнялось условие перехода к безразмерным единицам, при котором $\varphi_{\max} = 1$, а $h_{\min} = 0$.

Разность напоров и потенциалов, подаваемых на модель, принимали за единицу независимо от их величины. Исходя из этого приведенные напоры и приведенные потенциалы были численно равны. Значения приведенных потенциалов в нужных точках модели рассчитывали по формуле [3]:

$$\varphi_{\text{прив}} = \frac{\varphi_i - \varphi_{\min}}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}, \quad (12)$$

где φ_i – значение потенциала, измеренное в заданной точке модели, В.

Разность напоров и потенциалов, подаваемую на модель, принимали за единицу независимо от ее величины. Таким образом, приведенный напор и приведенный потенциал численно были равны.

На модели контур С1 (рис. 1) разбивали на участки, каждый из которых составлял 10, 20, 30% и т.д. от высоты модели. Пол-

ная разность потенциалов так же была разделена на десять равных частей (10, 20, 30 и т.д.). Измерения потенциалов при построении изопотенциальных линий проводили компенсационным методом с использованием двойного зонда.

Предварительным экспериментом установлено, что наибольшее отклонение линий равных потенциалов происходит в нижней зоне воздушной прослойки, поэтому картина фильтрации через покровную оболочку не рассматривалась.

Согласно закону преломления изопотенциалей в плоском стационарном электрическом поле в зонально-неоднородной среде линию раздела можно принять за потенциальную линию [5]. Ввиду того, что отношение термических сопротивлений покровной оболочки и воздушной прослойки мало, в электрической модели с зонально неоднородной средой все изопотенциальные линии, пересекающие границу раздела (поверхность С2), сливаются и совпадают с линией раздела.

Эта линия и была принята за исходную при построении сетки поля воздушного потока. Последовательно устанавливая реохорд интегратора на нужные отсчеты (10, 20, 30% и т.д.) от полной разности потенциалов, при помощи зонда вдоль модели, находили положение точек, в которых потенциал от полной разности напряжений составлял величину (0,1; 0,2; 0,3 и т.д.). Приведенный потенциал в этих точках равен соответственно (0,1, 0,2, 0,3 и т.д.).

Точки с одинаковыми значениями потенциалов соединяли между собой и получали, таким образом, эквипотенциальные линии. Эти линии соответствуют линиям равного напора в натурной модели. Эквипотенциальные линии $\varphi = \text{const}$ являются одновременно изобарами $P = \text{const}$ и линиями быстрого изменения функции потока. Действующие напоры рассчитывались с учетом уравнения (12) по выражению:

$$h_{p\partial} = h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min})\varphi_{\text{прив}}. \quad (13)$$

Построение полной сетки поля выполняли по методу решения так называемой

обращенной задачи путем перестановки питающих шин на участки, где их не было. Путем выполнения действий, аналогичных построению линий равных потенциалов, строили линии напряженности. Пространство, образующее трубки равного потока напряженности, представляет собой трубки тока.

Линии напряженности образуют вместе с изопотенциальными линиями, отличающимися на постоянный интервал потенциала, полную сетку поля. Там, где ячейки этой сетки больше – напряженность электрического поля меньше, что соответствует меньшей плотности тока, а значит и меньшей скорости фильтрации воздуха из прослойки по трубкам тока.

На основании полученных данных о характере течения воздуха в прослойке можно судить о том, что у непроницаемой поверхности формируется зона торможения потока (заштрихованные участки между одинаковыми по значениям линиями равных напоров).

Для оценки влияния формы прослойки на строение поля воздушного потока была построена вторая модель, на которой проведено дополнительное исследование. Вы-

сота второй прослойки была одинаковой с первой, но внутренний контур второй прослойки имел криволинейную форму.

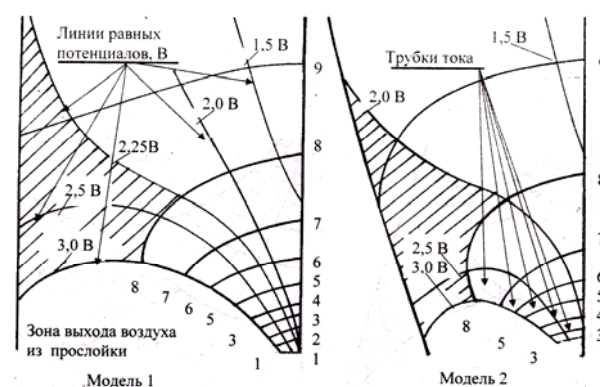


Рис. 2

На рис. 2 показана сетка полного воздушного потока открытой в нижней части воздушной прослойки простой геометрической формы (модель 1) и прослойки с криволинейным внутренним контуром (модель 2).

Результаты эксперимента по определению скорости фильтрации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Трубки тока	Ширина трубок тока, м		Фильтрация по трубкам тока, м/ч		Прирост фильтрации по трубкам тока, %	
	модель 1	модель 2	модель 1	модель 2	модель 1	модель 2
1-2	0,0004	-	124,30	-	48,3	-
2-3	0,0005	-	122,50	-	47,6	-
3-4	0,0007	0,0003	119,90	138,96	46,6	54,05
4-5	0,0009	0,0005	116,45	116,35	45,25	45,6
5-6	0,0011	0,0007	111,95	113,87	43,5	44,25
6-7	0,0013	0,0008	105,50	112,46	41,0	43,7
7-8	0,0017	0,0009	99,70	110,0	38,75	42,75

Во второй модели ширина прослойки в зоне выхода из-под одежды была в два раза меньше по сравнению с первой моделью. Из рис. 2 следует, что линии равного потенциала отклоняются от линии раздела ткань – воздушная среда (контур С2 рис. 1) в сторону открытого выхода из прослойки. Расположение линий равного приведенного потенциала с одинаковыми значениями напряжений для обеих моделей различно. Причем во второй модели, начиная с изопотенциала в 2,0 В, отклонение про-

является более значительно. Это в конечном итоге влияет на изменение размеров и формы трубок тока, а следовательно, и на скорость фильтрации.

ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что построенные модели можно использовать для исследований с целью оптимизации толщины воздушной прослойки в зависимости от фильтрационных свойств по-

кровных оболочек в пакетах одежды разного функционального назначения.

Установлено, что скорость воздуха на выходе из прослойки зависит как от размеров прослойки, так и от ее формы. Показано, что наибольшая интенсивность перемещения воздуха имеет место со стороны внутренней поверхности покровной оболочки.

Установлено, что при уменьшении ширины прослойки на выходе скорость истечения воздуха из-под одежды возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов Б.П. и др. // Изв. вузов, Технология легкой промышленности. – 1988, №1. С.69...72.

2. Кленов В.Б. Фильтрация жидкости через слой деформируемого текстильного материала. – М.: Легкая индустрия, 1972.

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

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

5. Рязанов Г.А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. – М.: Наука, 1966. С. 191.

Рекомендована кафедрой прикладной математики и вычислительной техники. Поступила 30.01.06.