

УДК 677.017: 687.17

## Теплозащитные свойства комплексных мембранных материалов в условиях увлажнения

### Thermal protective properties of complex membrane materials under humidification conditions

Д. К. Панкевич<sup>1</sup>, Ю. С. Иванова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Витебский государственный технологический университет,  
Витебск, Республика Беларусь*

D. K. Pankevich<sup>1</sup>, J. S. Ivanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus*

**Аннотация.** В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к облегчению пакета одежды, в связи с чем для проектирования теплозащитной одежды применяют и комплексные материалы с мембраной, процессы поглощения и отдачи влаги в которых существенно зависят от их структуры и мало изучены. Целью данного исследования является изучение влияния увлажнения на тепловое сопротивление комплексных мембранных материалов (КММ) для одежды в сравнении с традиционными пакетами материалов. Установлено, что увлажнение существенно влияет на тепловое сопротивление КММ, а характер изменения зависит от структуры материала, во-многом – от типа мембраны, входящей в его состав. Показано, что тепловое сопротивление увлажненных образцов имеет корреляционную связь с толщиной мембраны и не зависит от общей толщины образца, как это можно было бы предположить по известным закономерностям, выявленным для других материалов легкой промышленности.

**Ключевые слова:** тепловое сопротивление, комплексные мембранные материалы, увлажнение, структурные характеристики, гидрофильные мембраны, гидрофобные мембраны, теплозащитная одежда.

#### I. ВВЕДЕНИЕ

Тепловое сопротивление материалов является ключевым показателем теплозащитных свойств одежды из них, характеризующим интенсивность прохождения теплового потока через плоский пакет материалов одежды в окружающую среду [1]. Текстильные материалы отличаются сложной пористой структурой, в которой перенос теплоты осуществляется теплопроводностью, конвекцией и теплоизлучением. Эти процессы определяют условность коэффициента тепло-

проводности и варьируются в зависимости от пористости материалов и конструктивных особенностей одежды. Теплозащитная способность материала находится в прямой зависимости от величины теплового сопротивления. Чем оно больше, тем выше теплоизоляционные свойства материала. Тепловое сопротивление текстильных материалов в условиях неподвижного воздуха существенно и линейно зависит от их толщины, что доказано экспериментально [2]. Известно, что взаимодействие влаги с материалом может изменять их тепловое сопротивление, существенно влияя на комфорт и функциональность одежды [1]. Теплозащитные свойства разных слоев пакета материала неодинаковы. Как правило, на материал верха возлагаются эстетическая и защитная функции, функция надежности, а обеспечение и повышение теплозащитных свойств пакета достигается использованием утепляющего прокладочного материала и наличием нескольких нижележащих слоев одежды, создающих воздушные теплоизоляционные прослойки.

Во время эксплуатации одежды происходит процесс увлажнения пакета материалов за счет внутренних физиологических и внешних факторов – потоотделение, дыхание, контакт с окружающей средой. При отсутствии внешнего увлажнения, связанного с атмосферными осадками, пакет материалов может увлажняться за счет потоотделения, которое активируется при физических нагрузках, температурных колебаниях и стрессовых состояниях. Влага из пота проникает сквозь структуру материалов, что приводит к изменению физических и теплоизоляционных свойств одежды. Например, при нагрузке средней интенсивности тело человека может выделять около 100 граммов пота в час, что составляет примерно 5% от веса пакета одежды. В источнике [3] представлено требуемое суммарное тепловое сопротивление при различном уровне физической активности и наружной температуре воздуха. Для температуры  $-5^{\circ}\text{C}$  (минимальная температура, рекомендованная для эксплуатации одежды из КММ) и двухчасового пребывания на воздухе оно составляет от 0.14 до 0.63  $\text{m}^2\text{C}/\text{Вт}$ .

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с целью поставлены следующие задачи: выбрать материалы для исследования, характеризующиеся различной структурой; определить характеристики структуры образцов материалов стандартными методами и средствами; провести испытание кондиционированных и увлажненных материалов по показателю теплового сопротивления; выполнить анализ результатов испытаний комплексных мембранных материалов в сравнении с традиционными пакетами материалов.

### III. ТЕОРИЯ

Методика исследования структуры по микрофотографии поверхности и поперечного среза материала, полученной методом сканирующей электронной микроскопии, разработана на основе [4], и изложена в источнике [5]. Использовали микроскоп VEGA II LSH.

Для исследования теплового сопротивления использовалась авторская методика, основанная на принципе нестационарного теплового режима [3]. Его сущность заключается в определении времени охлаждения нагретого тела, изолированного от окружающей среды исследуемым материалом. При проведении испытания применяли следующее оборудование: климатическая камера YTN-408-40-IP; источник питания GW Instek GPS-73030DD; цифровой регистратор температуры производства «EuroPribor»; датчик температуры; нагревательный элемент (вольфрамовый цилиндр длиной 12 см и диаметром 2 см с удельной теплоемкостью 134 Дж/кг·°С).

Для проведения испытания были подготовлены пробы из исследуемых материалов в виде прямоугольных конвертов размером (200×150) мм. Нагревательный элемент вместе с датчиком температуры помещали внутрь прямоугольных конвертов из исследуемых материалов или пакетов материалов. Температуру и время остывания нагретого до 60°С вольфрамового цилиндра в диапазоне температур 55°С – 45°С регистрировали цифровым регистратором «EuroPribor» и секундометром при контролируемых условиях (температура воздуха (20±2)°С, влажность (65±4)%). В этих же условиях кондиционировали образцы до испытания.

Для увлажнения образцов их выдерживали 24 ч. в эксикаторе (температура воздуха (20±2)°С, влажность 98±2%). Массу образцов определяли до и после увлажнения для расчета процента  $\Delta m$  увлажнения материала по формуле (1):

$$\Delta m = \frac{m_b - m_k}{m_k} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где  $m_b$  – масса увлажненного образца, г;  $m_k$  – масса кондиционированного образца, г.

Суммарное тепловое сопротивление  $R_{\text{сум}}$ , м<sup>2</sup>·°С/В, вычисляли по формуле (2):

$$R_{\text{сум}} = \frac{S_{\text{пр}} \cdot \tau}{c \cdot m} , \quad (2)$$

где  $S_{\text{пр}}$  – площадь поверхности пробы, через которую совершается теплообмен,  $S_{\text{пр}} = 0.0216$  м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время остывания нагревательного элемента в заданном ин-

тервале температур, с;  $c$  – удельная теплоемкость нагревательного элемента,  $c = 134$  Дж/кг·°С;  $m$  – масса нагревательного элемента,  $m = 0.1297$  кг [3].

Определение поверхностной плотности КММ выполняли по ГОСТ 3811-72.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

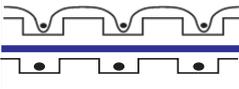
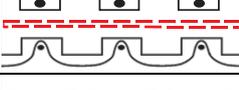
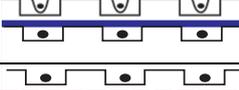
В качестве объектов исследования предложены десять образцов комплексных трехслойных мембранных материалов с разной структурой слоев (Табл. 1). Для визуализации типа структуры КММ авторами статьи ранее были разработаны графические примитивы для изображения информации о составе, важнейших особенностях и способе соединения слоев КММ [6]. В исследовании принимали участие образцы с мембранами двух структур – гидрофобной сетчатой пористой (образцы №1, №3, №6, №8, №10) и гидрофильной монолитной (образцы №2, №4, №5, №7, №9). Лицевая сторона образцов образована текстильными полотнами различных структур и толщины, изнаночная сторона образцов представляет собой трикотажное полотно с подворсовкой, кроме образца №5 (трикотаж платированного переплетения). В Табл. 2 отражен анализ результатов исследования.

Таблица 1

**Характеристика объектов исследования**

Номер образца	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Схема структуры	Характеристика			
			текстильных слоев	мембранного слоя		
				толщина (лицо / изнанка), мм	толщина полимерного слоя, мм	
					пористого	монолитного
1	328		0.30 / 0.72	0.02	нет	
2	305		0.31 / 0.72	нет	0.04*	
3	388		0.29 / 1.68	0.03	нет	
4	279		0.21 / 0.45	нет	0.04*	
5	270		0.41 / 0.38	нет	0.04*	

Окончание табл. 1

Номер образца	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Схема структуры	Характеристика		
			текстильных слоев	мембранного слоя	
				толщина (лицо / изнанка), мм	толщина полимерного слоя, мм
			пористого	монолитного	
6	344		0.30 / 0.74	0.03	нет
7	228		0.35 / 0.2	нет	0.03*
8	225		0.33 / 0.24	0.03	нет
9	148		0.12 / 0.12	нет	0.02*
10	274		0.24 / 0.38	0.03	нет

\*Примечание – мембрана из гидрофильного полимера

Таблица 2

### Изменение теплового сопротивления образцов после увлажнения

Номер образца	$\Delta t$ , %	$R_{\text{сух}}$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт	$R_{\text{вл}}$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт
1	1.2	0.57	0.54
2	2.0	0.57	0.55
3	0.8	0.51	0.53
4	1.1	0.57	0.56
5	1.8	0.57	0.58
6	1.9	0.54	0.51
7	3.6	0.47	0.49
8	0.9	0.55	0.51
9	2.2	0.58	0.50
10	2.1	0.47	0.51

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Не все КММ снижают тепловое сопротивление при увлажнении, как это происходит с традиционными материалами легкой промышленности. В большинстве случаев увлажнение материала сопровождалось снижением его теплового сопро-

тивления, однако имеются и исключения. Предполагаемым фактором, влияющими на изменение теплового сопротивления, является тип мембраны. Образцы, содержащие гидрофобные мембраны (образцы №1, №3, №6, №8, №10), в основном показывают снижение теплового сопротивления после увлажнения (кроме образцов №3 и №10). Пористые гидрофобные материалы не сорбируют водяные пары веществом мембраны, а проводят их через поры, на стенках которых пары воды могут конденсироваться. Объем воздуха в порах сокращается, следовательно, увеличение влажности чаще ведет к снижению теплоизоляционных свойств материала за счет повышения его общей теплопроводности.

Образцы, содержащие гидрофильные мембраны (образцы №2, №4, №5, №7, №9), показывают либо незначительное снижение, либо увеличение (№5, №7) теплового сопротивления. Они впитывают влагу веществом мембраны, связываясь с ней химически, с выделением теплоты. Увеличение теплового сопротивления материалов с гидрофильной мембраной может быть также связано с набуханием мембраны, приводящим к увеличению ее объёма, и снижению теплопроводности образца.

Корреляционный анализ показал, что средний процент увлажнения материалов не коррелирует ни с толщиной текстильных слоев, ни с толщиной мембраны, ни с общей толщиной. Была установлена умеренная положительная зависимость между толщиной мембраны и тепловым сопротивлением увлажнённых образцов материалов, коэффициент корреляции составил 0.63. Это означает, что по мере увеличения толщины мембраны, тепловое сопротивление, скорее всего, увеличивается. При анализе только КММ с гидрофильными мембранами был получен коэффициент корреляции 0.84 между тепловым сопротивлением увлажнённых образцов и толщиной мембраны, что свидетельствует о сильной положительной зависимости. Корреляционный анализ образцов КММ с гидрофобными мембранами показал, что присутствует сильная отрицательная связь между толщиной мембраны и тепловым сопротивлением увлажнённых образцов материалов, коэффициент корреляции составил -0.79. Между остальными факторами связь очень слабая или не установлена.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам корреляционного анализа можно сделать вывод, что существует высокая положительная зависимость между толщинами различных слоёв (особенно мембраны) и тепловым сопротивлением увлажнённых образцов. Связь сильнее выражена у КММ с гидрофильными мембранами, где коэффици-

ент корреляции значительно выше. У КММ с гидрофобными мембранами влияние толщин менее выражено, возможно, из-за различий в структуре или других факторов. Для эффективной теплозащиты важен подбор оптимальной толщины мембраны и слоев КММ. Структура материала оказывает существенное влияние на изменение теплоизоляционных свойств в условиях повышения влажности, что важно учитывать при проектировании одежды, предназначенной для эксплуатации во влажных условиях.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дарья Константиновна Панкевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технология одежды и обуви», Витебский государственный технологический университет.

Юлия Сергеевна Иванова. Магистрант, Витебский государственный технологический университет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бринк И. Ю., Богданов В. Ф., Колесник С. А. Основы проектирования тепловой защиты аутдор-снаряжения : моногр. Новочеркасск : Лик, 2016. 81 с. ISBN 978-5-907158-16-0.

2. Бессонова Н. Г., Жихарев А. П. Теплофизические свойства материалов для изделий легкой промышленности / Моск. гос. ун-т дизайна и технологии. М. : Изд-во МГУДТ, 2007. 119 с. ISBN 5-87055-087-4.

3. Петюль И. А., Сапёлко В. В. Исследование суммарного теплового сопротивления пакетов материалов альтернативными методами. DOI: 10.24411/2079-7958-2019-13608 // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2019. № 1 (36). С. 68–80. EDN FDZAKZ.

4. Складчиков В. П. Строение и качество тканей. М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1984. 176 с.

5. Панкевич Д. К., Кукушкин М. Л. Влияние многоциклового механического нагружения на структуру водозащитных материалов с полиэфируретановой мембраной // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2017. № 1 (32). С. 99–108. EDN ZEYXLR.

6. Панкевич Д. К., Иванова Ю. С. Классификация и свойства мембранных текстильных материалов // материалы докл. 57-й Междунар. науч.-техн. конф. (Витебск, 18–19 апр. 2024 г.) / Витеб. гос. технолог. ун-т. Витебск : Изд-во ВГТУ, 2024. С. 114–116. EDN ATYWCW.