

Теплозащитные свойства комплексных мембранных материалов в условиях увлажнения

Д. К. Панкевич,
Ю. С. Иванова

*Витебский государственный технологический университет,
Республика Беларусь*

Аннотация. В настоящее время при проектировании теплозащитной одежды применяют комплексные мембранные материалы, процессы переноса тепла, поглощения и отдачи влаги в которых мало изучены. Для производства комфортной одежды вопрос рационального подбора материалов определенных структур на основании изучения их свойств является актуальным.

Одной из научных проблем является определение факторов, влияющих на изменение теплового сопротивления материалов одежды, а также оценка значимости и вектора воздействия этого влияния на ощущение комфорта человека в одежде.

Цель работы – определение факторов, наиболее существенно влияющих на тепловое сопротивление комплексных мембранных материалов для одежды в условиях увлажнения, и оценка значимости этого влияния для рационального подбора материалов в пакет демисезонной одежды.

В работе использованы авторские и стандартные методы и средства исследования структуры, гигроскопичности и теплового сопротивления материалов. Объектами исследования являются трехслойные комплексные материалы, состоящие из тканых и трикотажных полотен, соединенных клеевым способом с мембраной, расположенной между ними.

Установлено, что на тепловое сопротивление материалов существенно влияет их гигроскопичность, тип мембраны и время увлажнения. Влияние толщины материала обнаруживается до определенного значения увлажнения образцов.

Результаты исследования обобщены в виде рекомендаций по применению материалов определенной структуры для изготовления демисезонной одежды. Показано, что материалы с гидрофильной мембраной нецелесообразно применять для демисезонной одежды, поскольку в условиях увлажнения их тепловое сопротивление изменяется по сложному закону, снижаясь и повышаясь в пределах (± 10) %, поэтому более вероятен дискомфорт пользователя.

У материалов с пористой гидрофобной мембраной тепловое сопротивление при увлажнении снижается равномерно в пределах 5 % от начального значения, что делает их материалами выбора при проектировании демисезонной одежды различного назначения.

Ключевые слова: одежда, тепловое сопротивление, комплексные мембранные материалы, увлажнение, гигроскопичность, структура.

Информация о статье: поступила 22 сентября 2025 года.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2025)», которая состоялась 18–19 ноября 2025 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

Thermal protection properties of complex membrane materials under humidification

Darya K. Pankevich,
Yulia S. Ivanova

*Vitebsk State Technological University,
Republic of Belarus*

Abstract. Currently, when designing thermal protective clothing, complex membrane materials are used. However, the processes of heat transfer, absorption and release of moisture within these materials remain poorly understood.

One of the scientific problems is the identification of factors influencing changes in the thermal resistance of clothing materials, as well as the assessment of the significance and vector of impact of this influence on a person's feeling of comfort in clothing.

The aim of the work is to determine the factors that most significantly influence the thermal resistance of complex membrane materials for clothing under humid conditions, and to assess the significance of this influence for the rational selection of materials for a package of demi-season clothing.

The study applied author's and standard methods and tools to study the structure, hygroscopicity, and thermal resistance of materials. The subjects of the study were three-layer composite materials consisting of woven and knitted fabrics bonded with an adhesive membrane sandwiched between them.

It has been established that the thermal resistance of materials is significantly affected by their hygroscopicity, membrane type, and wetting time. The effect of material thickness is detectable up to a certain wetting value of the samples.

The study's results are summarized in the form of recommendations for the use of materials with specific structures in the production of demi-season clothing. It is shown that materials with a hydrophilic membrane are not suitable for use in demi-season clothing. Under humid conditions, their thermal resistance changes according to a complex law, decreasing and increasing within the range of (± 10) %, therefore it more likely results in wearer discomfort.

The thermal resistance of materials with a porous hydrophobic membrane decreases uniformly when moistened within 5 % of the initial value, which makes these materials suitable for designing demi-season multi-purpose clothing.

Keywords: clothing, thermal resistance, complex membrane materials, humidification, hygroscopicity, structure.

Article info: received September 22, 2025.

The article summarizes the research materials presented at the International Scientific and Technical Conference "International Conference on Textile and Apparel Innovation" (ICTAI-2025), held on November 18-19, 2025 at Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus).

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 (Бринк И. Ю., Богданов В. Ф. и др., 2016). Наибольшее значение оценка показателей теплозащитных свойств имеет при проектировании демисезонной и зимней одежды (Соколова А. С., Кузнецов А. А. и Надежная Н. Л., 2016). Анализ требований, установленных российскими и зарубежными стандартами к теплозащитной одежде, показал, что тепловое сопротивление пакета материалов также является и основным контролируемым параметром при оценке соответствия (Лукьянова Е. Б., Черунова И. В. и Ташпулатов С. Ш., 2022).

Теплозащитная способность материала находится в прямой зависимости от величины теплового сопротивления, которая в условиях неподвижного воздуха существенно и линейно зависит от его толщины, что доказано экспериментально (Бессонова Н. Г. и Жихарев А. П., 2007). Требуемую величину теплового сопротивления пакета одежды определяют следующие факторы: температура, скорость движения и относительная влажность воздуха окружающей среды; воздухопроницаемость, влажность, теплопроводность пакета одежды; статическое или динамическое состояние человека (Усенбеков Ж.,

Нурбай С. К. и Сеитов Б. Х., 2022).

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к облегчению пакета одежды, в связи с чем для проектирования теплозащитной одежды применяют и комплексные материалы с мембраной (КММ), процессы переноса тепла, поглощения и отдачи влаги в которых существенно зависят от их структуры и мало изучены. Ассортимент КММ, применяющихся при производстве изделий легкой промышленности, постоянно расширяется, особенно это касается материалов верха демисезонной одежды. Популярны трехслойные материалы, в которых мембранный слой расположен между текстильными слоями. Появление и широкое распространение материалов новых структур требует создания рекомендаций по оптимальному их подбору в соответствии с назначением.

Известно, что взаимодействие влаги с материалом может изменять их тепловое сопротивление, существенно влияя на комфорт и функциональность одежды (Бринк И. Ю., Богданов В. Ф. и др., 2016). Во время эксплуатации одежды 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 теплоизоляционных свойств одежды. Эффективность

тепловой защиты обеспечивается не только пассивной теплоизоляцией, но и комбинированными свойствами одежды, в том числе функцией аккумуляции тепла материалами с последующей его отдачей (Черунова И. В. и Лесникова Т. Ю., 2017), а также их сорбционными свойствами (Бесшапошникова В. И., Климова Н. А. и др., 2020). Под воздействием градиента температуры в пористых телах наблюдается термовлагопроводность, т. е. происходит передвижение влаги, что может снижать тепловое сопротивление материалов на 18 % (Ефимов С. С., Старостин Е. Г. и Таппырова Н. И., 2011). Свойство текстиля переносить влагу оказывает глубокое влияние как на эксплуатационные характеристики одежды, так и на тепловой комфорт человека (Ганиева М. Х. и Ташпулатов С. Ш., 2023, с.36). Содержание воды, адсорбированной материалом из паровоздушной среды с относительной влажностью около 100 %, называется гигроскопической влажностью и характеризуется показателем гигроскопичности.

Влияние влажности и сорбционных свойств КММ на их тепловое сопротивление изучено мало. В работе (Иванова Н. Е. и Шустов Ю. С., 2025) показано, что наличие гидрофильной мембраны значительно снижает теплоизоляцию пакета материалов для одежды. Авторами исследования (Бесшапошникова В. И., Климова Н. А. и др., 2020b) экспериментально установлено, что процесс десорбции влаги из пододежного пространства в мембранных материалах начинается через 25–70 минут после начала роста влажности. Это время сопоставимо с продолжительностью носки одежды. Поэтому, как показано в работах (Besshaposhnikova V. I., Klimova N. A. and Kovaleva N. E., 2018; Бессонова Н.Г., 2018) в пододежном пространстве одежды из КММ влажность чаще всего повышена. Для атмосферных условий эксплуатации демисезонной одежды также характерна высокая влажность воздуха, поэтому исследование теплового сопротивления КММ при увлажнении целесообразно.

Требуемое суммарное тепловое сопротивление материалов одежды при среднем уровне физической активности для двухчасового пребывания на открытом воздухе при наружной температуре, характерной для межсезонья, составляет от 0,16 м²·°С/Вт до 0,38 м²·°С/Вт, при этом считается, что «...увлажнение текстильных материалов одежды приводит к резкому падению их теплового сопротивления и сопровождается набуханием, объемной контракцией и выделением тепла» (Колесников П. А., 1971).

Особенности строения КММ, которые могут повлиять на изменение теплозащитных свойств при увлажнении, обусловлены структурой и сорбционными свойствами материала и слоев, входящих в его состав. На основании анализа литературных источников к таким особенностям можно отнести: толщину слоев, их пористость, паропроницаемость и гигроскопичность. Выявление фактора, оказывающего наибольшее влияние на стабильность теплозащитных свойств КММ, позволит разработать рекомендации по области применения материалов различных структур для изготовления демисезонной одежды.

Целью данного исследования является определение факторов, наиболее существенно влияющих на тепловое сопротивление комплексных мембранных материалов для одежды в условиях увлажнения, и оценка значимости этого влияния для рационального подбора материалов в пакет демисезонной одежды.

Методы и средства исследований

Структуру КММ исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, электронный микроскоп VEGA II LSH с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 250 ADD с программным обеспечением). Методика исследования структуры по микрофотографии поверхности и поперечного среза материала, полученной методом СЭМ, разработана на основе изложенной в источнике (Склянников В. П., 1984) с дополнениями, учитывающими структурные особенности материалов с мембраной и возможности компьютерной обработки изображений, и изложена в источнике (Панкевич Д. К. и Кукушкин М. Л., 2017). Параметры структуры поперечного среза образцов исследовали с помощью программного обеспечения сканирующего электронного микроскопа. Анализировали следующие характеристики: общая толщина образца, толщина текстильной основы, толщина и структура мембраны.

Состав КММ исследовали методом ИК-спектроскопии с использованием ИК-спектрофотометра с Фурье-преобразованием Nexus 5700 с программным обеспечением OMNIC 71. Испытания проводили в Белорусском республиканском центре зондовой микроскопии Института механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель.

Для исследования теплового сопротивления использовалась методика, основанная на принципе нестационарного теплового режима. Его сущность заключается в определении времени остывания нагретого тела, изо-

лированного от окружающей среды исследуемым материалом, в заданном интервале температур (Петюль И. А. и Сапелко В. В., 2019). Испытания проводили для кондиционированных и увлажненных образцов КММ, применяя 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·°C); секундомер.

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. Температуру и время остывания нагретого до 60 °C вольфрамового цилиндра в диапазоне температур 55 °C – 45 °C регистрировали цифровым регистратором «EuroPribor» и секундомером при контролируемых условиях (температура воздуха (20±2) °C, влажность (80±4)%). Параметры воздуха климатической камеры устанавливали с учетом повышенной влажности климата РБ в межсезонье и с целью моделирования необходимого перепада температур воздуха, соответствующего исследуемому диапазону метеопараметров и комфортному теплоощущению человека (Кириллов В. Ф. и Федорович Г. В., 2011).

Образцы кондиционировали до испытания при температуре воздуха (20±2) °C, влажности (65±4) %.

Для увлажнения образцов их выдерживали 0,5, 2, 3, 4 и 6 часов в эксикаторе (температура воздуха (20±2) °C, влажность (98±2) %). Массу образцов определяли до и после увлажнения для расчета процента Δ_m увлажнения материала по формуле (1):

$$\Delta_m = \frac{m_g - m_k}{m_k} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_g – масса увлажненного образца, г; m_k – масса кондиционированного образца, г.

Суммарное тепловое сопротивление $R_{\text{сум}}$ м²·°C/Вт, 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, $S_{\text{пр}} = 0,0216$ м²; τ – время

остывания нагревательного элемента в заданном интервале температур, с; c – удельная теплоемкость нагревательного элемента, $c = 134$ Дж/кг·°C; m – масса нагревательного элемента, $m = 0,1297$ кг (Петюль И. А. и Сапелко В. В., 2019).

Определение паропроницаемости КММ выполняли по ГОСТ Р 57514-2017 с помощью прибора W-30 гравиметрическим методом.

Определение поверхностной плотности КММ выполняли по ГОСТ 3811-72. Плотность нитей по основе и по утку для тканых текстильных слоев КММ определяли по ГОСТ 3812-72. Число петельных рядов и число петельных столбиков для трикотажных текстильных слоев КММ – по ГОСТ 8846-87. Гигроскопичность КММ – по ГОСТ 3816-81, гигроскопичность слоев КММ – по ГОСТ 3816-81 без соблюдения формы и размеров образца, по результатам испытания навесок, содержащих 0,50 г фрагментов разделенных у кромки КММ (несклеенных) слоев.

Результаты исследований

В качестве объектов исследования предложены три образца комплексных трехслойных мембранных материалов с разной структурой слоев (таблицы 1, 2), текстильные слои которых выполнены из полиэфира (ПЭ), мембранные – из полиуретана (ПУ).

Таким образом, в исследовании принимали участие образцы с мембранами двух структур – гидрофобной сетчатой пористой (образец № 2) и гидрофильной монолитной (образцы № 1 и № 3). Лицевая и изнаночная сторона образцов образована текстильными полотнами различных структур и толщины. Структурные характеристики исследуемых образцов материалов, определенные по стандартным методикам и по результатам микроскопии, представлены в таблице 2. СЭМ-изображение поверхности мембраны и поперечного среза образца № 2 представлено на рисунке 1.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что образцы № 1 и № 2 существенно отличаются типом (пористостью) и толщиной мембраны, имеют одинаковые изнаночные слои и незначительно отличающиеся лицевые слои. Ожидается, что сравнение теплового сопротивления этих образцов покажет влияние пористости и толщины мембраны на изучаемый показатель. Образцы № 1 и № 3 имеют одинаковые мембраны, незначительно отличающиеся лицевые слои, но существенно разные по толщине и плотности изнаночные слои. Сравнение теплового сопротивления этих образцов покажет влияние структуры текстиля на тепловое сопротивление

Таблица 1 – Характеристика объектов исследования

Table 1 – Characteristics of research objects

Номер образца	Характеристика лицевой стороны материала	Характеристика изнаночной стороны материала	Характеристика мембраны
1	ПЭ ткань полотняного переплетения	ПЭ трикотажное полотно одинарного комбинированного переплетения, полученного сочетанием поперечносоединенного и плюшевого переплетений	ПУ гидрофильная монолитная
2	ПЭ трикотажное полотно переплетения кулирная гладь	ПЭ трикотажное полотно одинарного комбинированного переплетения, полученного сочетанием поперечносоединенного и плюшевого переплетений	ПУ гидрофобная пористая сетчатая
3	ПЭ ткань полотняного переплетения	ПЭ трикотажное полотно двуластичного переплетения с подворсовкой	ПУ гидрофильная монолитная

Таблица 2 – Результаты исследования структуры материалов

Table 2 – Results of the study of the structure of materials

Номер образца	Поверхностная плотность, г/м ²	Структура						
		текстильного тканого / трикотажного (тр) слоя				мембранного слоя		
		толщина (лицо / изнанка), мм	плотность (количество нитей / петель на 10 см)			толщина слоев, мм		
			по основе / столбиков	по утку / рядов		пористого	монолитного	
1	305	0,31 / 0,72	лицо	520	440		нет	0,04
			изнанка (тр)	130	160			
2	328	0,30 / 0,72	лицо (тр)	530	320		0,02	нет
			изнанка (тр)	130	160			
3	335	0,30 / 1,20	лицо	510	410		нет	0,04
			изнанка (тр)	140	180			

увлажненного КММ.

В таблице 3 отражен анализ результатов исследования сорбционных свойств КММ в комплексе и послойно.

Образцы № 1 и № 2 близки по гидрофильности комплексного материала, образец № 3 существенно отличается. Паропроницаемость материалов различна: для КММ с гидрофильной монолитной мембраной (№ 1 и № 3) коэффициент паропроницаемости не превышает 2000 г/(м²·24 ч), для образца № 2 – в два раза выше. Ожидается, что сравнение теплового сопротивления образцов покажет влияние сорбционных свойств КММ и составляющих их слоев на изучаемый показатель.

На рисунках 2–4 представлены диаграммы рассеяния значений теплового сопротивления образцов КММ в зависимости от процента увлажнения (слева) и графики изменения процента увлажнения образцов от времени экспозиции в эксикаторе (справа). Для удобства анализа результатов исследования диаграммы и графики показаны попарно в соответствии с номером образца.

Анализ результатов

Анализ результатов испытаний образца № 1 показывает, что значение его теплового сопротивления изменяется при увлажнении. Кондиционированный образец при исследовании во влажном воздухе обладает

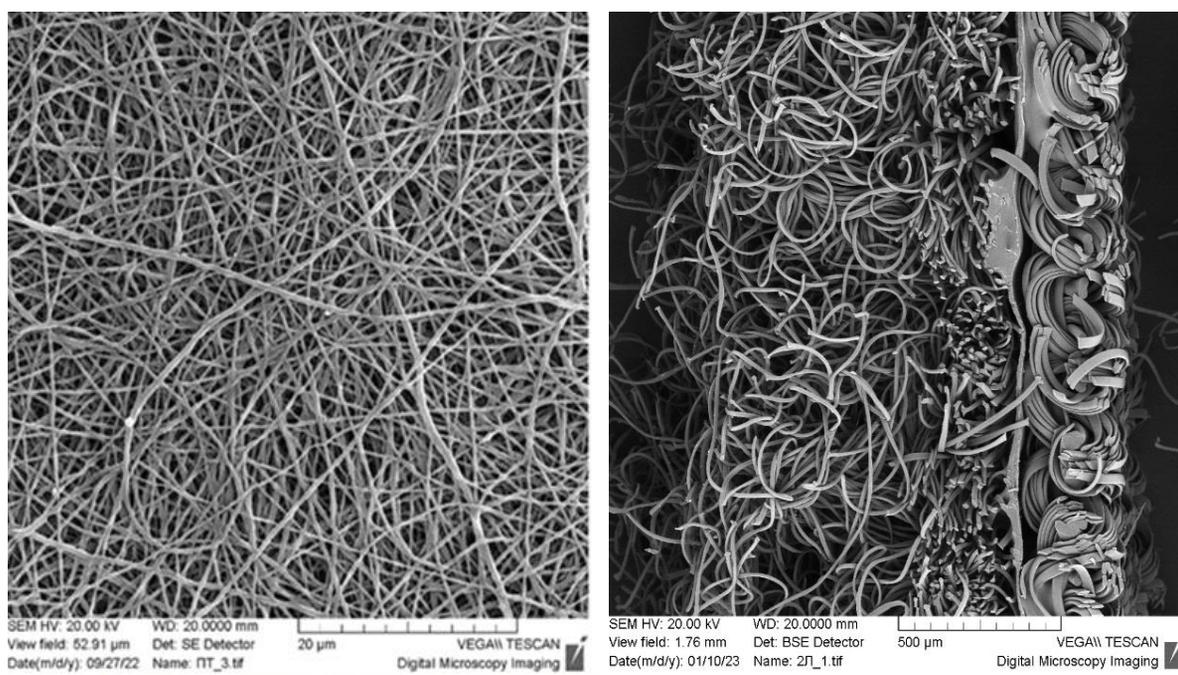


Рисунок 1 – Поверхность мембраны ($\times 4500$) и поперечный срез ($\times 450$) образца № 2
Figure 1 – Membrane surface ($\times 4500$) and cross-section ($\times 450$) of Sample 2

Таблица 3 – Результаты исследования сорбционных свойств материалов
Table 3 – Results of the study of sorption properties of materials

Номер образца	1	2	3
Гигроскопичность комплексного материала, %	1,23	1,98	3,76
Гигроскопичность лицевого слоя, %	0,65	2,40	3,55
Гигроскопичность изнаночного слоя, %	0,97	0,97	4,63
Гигроскопичность мембраны, %	2,54	1,53	2,54
Коэффициент паропроницаемости, г/(м ² ·24 ч)	1995	4230	1090

тепловым сопротивлением 0,40 м²·°С/Вт, что несколько выше рекомендуемых значений для демисезонной одежды при средней активности человека. Снижение показателя на 8 % происходит при его увлажнении на 0,5 %, затем при росте процента увлажнения тепловое сопротивление образца повышается и составляет после 6 часов выдержки в эксикаторе 0,40 м²·°С/Вт. Вероятно, при увлажнении гидрофильной монолитной мембраны происходит экзотермическая химическая реакция с выделением теплоты, что компенсирует первоначаль-

ное снижение теплового сопротивления. При увлажнении 1,22 % значение теплового сопротивления образца № 1 соответствует начальному уровню. За время опыта (6 часов) образец практически достиг гигроскопической влажности (1,23 %). При этом за первые полчаса выдержки в эксикаторе образец сорбировал 30 % влаги от этой величины. Рост процента увлажнения во времени описывается моделью, представленной на рисунке 2, – интенсивный вначале (около 0,5 % в час) и замедляющийся через час.

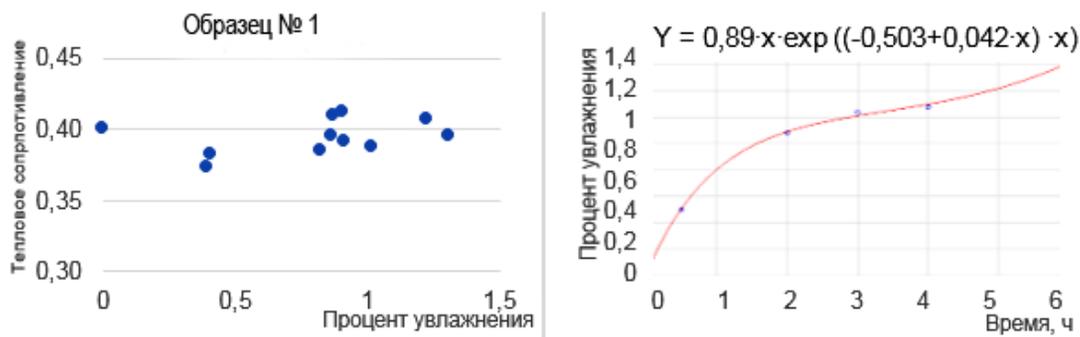


Рисунок 2 – Графическое представление результатов испытаний образца № 1
Figure 2 – Graphical representation of the test results for Sample 1

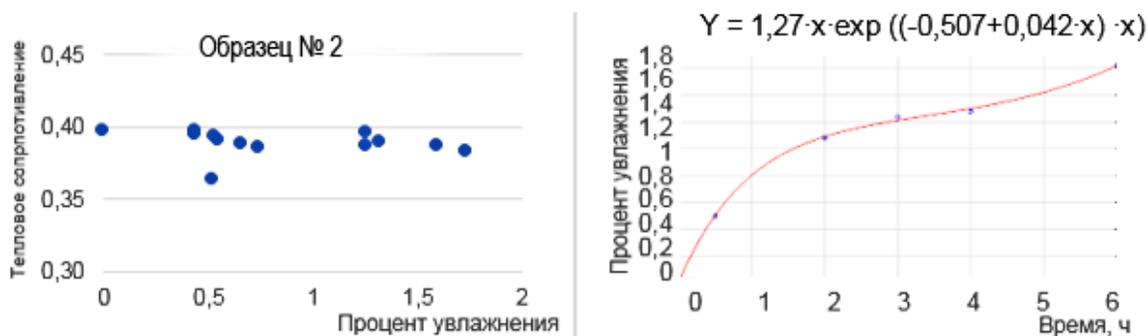


Рисунок 3 – Графическое представление результатов испытаний образца № 2
Figure 3 – Graphical representation of the test results for Sample 2

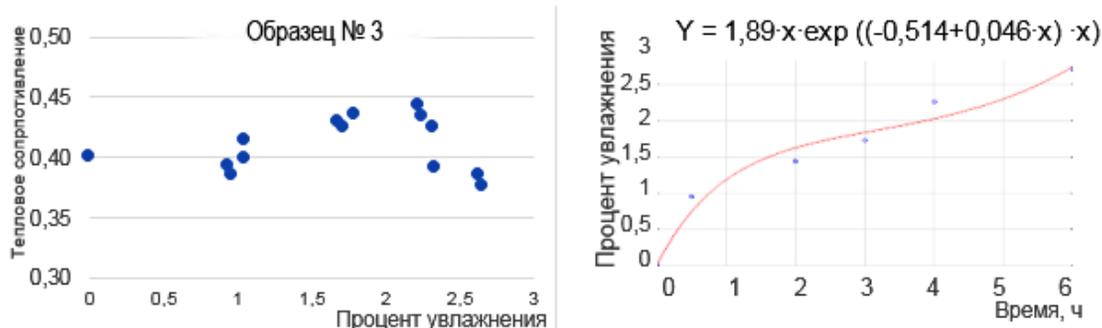


Рисунок 4 – Графическое представление результатов испытаний образца № 3
Figure 4 – Graphical representation of the test results for Sample 3

Диаграмма рассеяния значений теплового сопротивления образца № 2 показывает несколько другую картину: показатель закономерно снижается с ростом процента увлажнения. Кондиционированный образец

при исследовании во влажном воздухе обладает тепловым сопротивлением 0,40 м²·°С/Вт, которое затем снижается в течение опыта на 5% и составляет после 6 часов увлажнения 0,38 м²·°С/Вт.

За время опыта образец не достиг гигроскопической влажности (1,98 %). За первые полчаса процент увлажнения составил 25 % этой величины, через 6 часов – 82 %. Рост процента увлажнения в зависимости от времени выдержки в эксикаторе также описывается моделью, представленной на рисунке 3. Повышение уровня теплового сопротивления для образца № 2, содержащего гидрофобную сетчатую пористую мембрану, не выявлено.

Анализ результатов испытаний образца № 3 показывает, что кондиционированный образец при исследовании во влажном воздухе обладает тепловым сопротивлением $0,40 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, с ростом процента увлажнения эта величина сначала повышается на 10 %, а затем при достижении увлажнения 2,2 % быстро снижается и составляет после 6 часов опыта $0,38 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. В отличие от образца № 1, содержащего такую же мембрану, но менее гигроскопичные текстильные слои, образец № 3, увлажняясь, теряет теплозащитные свойства интенсивнее, хотя обладает большей толщиной. В течение опыта он не достигает гигроскопической влажности (3,76 %): в первые полчаса увлажнение составляет 25 % этой величины, за 6 часов – 72 %. Рост теплового сопротивления наблюдается только в течение первых 3 часов увлажнения.

Результаты показали, что увлажнение влияет на тепловое сопротивление материалов, однако характер изменения различен для образцов КММ с различными сорбционными свойствами. Выявлено, что гигроскопичность оказывает более значимое влияние на тепловое сопротивление КММ в условиях увлажнения, чем толщина. Так, образцы № 1 и № 2 обладают меньшей толщиной по сравнению с образцом № 3 и при увлажнении на 1 % их тепловое сопротивление ниже, что соответствует данным анализа литературных источников о прямой пропорциональности этих величин. Однако, образцы № 1 и № 2 не способны сорбировать более 2 % влаги из паровоздушной среды, в то время как при длительном увлажнении более гигроскопичный образец № 3 впитал больше влаги и его тепловое сопротивление снизилось по сравнению с тепловым сопротивлением образца № 1 и сравнялось с тепловым сопротивлением образца № 2. Вероятно, велико влияние гигроскопичности текстиля: у образцов № 1 и № 3, имеющих одинаковые мембраны, существенно разные по гигроскопичности текстильные слои (таблица 4). Поэтому при увлажнении КММ зависимость теплового сопротивления от толщины материала

сохраняется только при малом проценте сорбированной образцом влаги (в данном случае – менее 2 %).

Паропроницаемость КММ определяет, как быстро материал будет увлажняться изнутри при активном отделении пользователя одежды и какими будут теплоощущения человека. Для трех исследованных образцов паропроницаемость убывает в ряду № 2 – № 1 – № 3. В этом же ряду убывает и процент изменения теплового сопротивления (включая как возрастание, так и снижение) – 5 % для образца № 2; 8 % для образца № 1 и 15 % для образца № 3.

Выводы

Структура и сорбционные свойства КММ оказывают существенное влияние на изменение теплоизоляционных свойств в условиях повышения влажности, что важно учитывать при проектировании одежды. При незначительном увлажнении не более 2 % тезис о большем тепловом сопротивлении материалов большей толщины справедлив. Тепловое сопротивление материалов, обладающих большей гигроскопичностью, при длительном увлажнении снижается более интенсивно. Поэтому существенно важным становится время нахождения материала во влажных условиях.

У материала с гидрофобной пористой сетчатой мембраной снижение теплового сопротивления равномерное, а у материалов с гидрофильной мембраной наблюдается колебание значений показателя в зависимости от времени увлажнения, вероятно, из-за происходящей в структуре монолитной гидрофильной мембраны химической реакции с выделением теплоты, вызывающей временное повышение теплового сопротивления. Такое изменение также значимо для проектирования одежды, особенно если разрабатывается изделие для длительного пребывания на холодном и влажном воздухе.

В плане рекомендаций по использованию трехслойных КММ в одежде стоит отметить, что тепловое сопротивление исследуемых образцов выше значений, рекомендованных для демисезонной одежды и двухчасового пребывания на открытом воздухе человека, проявляющего средний уровень активности. Поэтому КММ с гидрофильной мембраной нецелесообразно применять для демисезонной одежды, поскольку их тепловое сопротивление может увеличиваться при увлажнении, а паропроницаемость низка, что приведет к дискомфорту пользователя, ощущаемому как «припарок». Такие материалы возможны для применения в одежде, предназначенной для низкого уровня активности человека

и невысокой влажности атмосферного воздуха, когда процент их увлажнения при эксплуатации не превышает 2 %.

У КММ с пористой гидрофобной мембраной более высокий уровень паропроницаемости, а тепловое сопротивление при увлажнении снижается плавно, равномерно и всего на 5 % от начального значения, что делает их материалами выбора при проектировании демисезонной одежды различного назначения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Бессонова, Н.Г. и Жихарев, А.П. (2007). *Теплофизические свойства материалов для изделий легкой промышленности*. Москва: ИИЦ МГУДТ, Российская Федерация.

Бессонова, Н.Г. (2018). Оценка комфортности одежды с различными утеплителями. *Дизайн и технологии*, № 64 (106), С. 66–70.

Бесшапошникова, В.И., Климова, Н.А., Бесшапошникова, Н.В. и Ковалева, Н.Е. (2020). Влияние низких температур на эксплуатационные свойства мембранных тканей для одежды. *Химические волокна*, № 1, С. 55–58.

Бесшапошникова, В.И., Климова, Н.А., Бесшапошникова, Н.В. и Ковалева, Н.Е. (2020). Влияние эксплуатационных факторов на паропроницаемость мембранных тканей и пакетов одежды. *Ивестия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 6 (390), С. 51–54.

Бринк, И.Ю., Богданов, В.Ф. и Колесник, С.А. (2016). *Основы проектирования тепловой защиты аутдор-снаряжения*: Новочеркасск: ИСОИП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, Российская Федерация.

Ганиева, М.Х. и Ташпулатов, С.Ш. (2023). Особенности швейных изделий из влагопоглощающих материалов. *Universum: технические науки*, № 9-3 (114), С. 35–38.

Ефимов, С.С., Старостин, Е.Г. и Таппырова, Н.И. (2011). Влияние термовлагопроводности на термическое сопротивление пористых материалов. *Теплофизика и аэромеханика*, Т 18, № 1, С. 139–144.

Иванова, Н.Е. и Шустов, Ю.С. (2025). Анализ суммарного теплового сопротивления пакетов материалов для демисезонной специальной одежды. *Сборник научных трудов кафедры сервисных технологий и бизнес-процессов «Использование когнитивных технологий и сервисов в экономике, коммерции и маркетинге»*: Москва: Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), С. 113–118.

Кириллов, В.Ф. и Федорович, Г.В. (2011). Расчет теплоизолирующих параметров одежды для комфортных условий работы. *Медицина труда и промышленная экология*, № 4, С. 25–31.

Колесников, П.А. (1971). *Основы проектирования теплозащитной одежды*: Москва: Легкая индустрия, Российская Федерация.

Лукьянова, Е.Б., Черунова, И.В. и Ташпулатов, С.Ш. (2022). *Особенности проектирования женской теплозащитной одежды для условий криосферы*: Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», Российская Федерация.

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

Петюль, И.А. и Сапелко, В.В. (2019). Исследование суммарного теплового сопротивления пакетов материалов альтернативными методами. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 1 (36), С. 68–80.

Склянкин, В.П. (1984). *Строение и качество тканей*: Москва: Легкая и пищевая промышленность, Российская Федерация.

Соколова, А.С., Кузнецов, А.А. и Надежная, Н.Л. (2016). Метод оценки теплозащитных свойств материалов одежды и их пакетов. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 2 (31), С. 24–31.

Усенбеков, Ж., Нурбай, С.К. и Сеитов, Б.Х. (2024). Расчет теплозащитных параметров пакетов одежды методом имитационного моделирования [методом Монте-Карло]. *Вестник Алматинского технологического университета*, № 2, С. 197–206.

Черунова, И.В. и Лесникова, Т.Ю. (2017). Физико-биологические условия для проектирования защитной одежды от охлаждения человека на воздухе и воде. *Инженерный вестник Дона*, №3 (46), С. 78–91.

Besshaposhnikova, V.I., Klimova, N.A. and Kovaleva, N.E. (2018). Research of the effect of low temperatures on the structure and properties of membrane fabrics for clothing. *ISJ Theoretical & Applied Science*, no. 11 (67), pp. 54–61.

REFERENCES

Bessonova, N.G. and Zhikharev, A.P. (2007). *Teplofizicheskie svoystva materialov dlya izdelij legkoj promyshlennosti* [Thermophysical properties of materials for light industry products]. Moscow: IITs MGUDT, Russian Federation (In Russian).

Bessonova, N.G. (2018). Evaluation of the comfort of clothing with different insulation materials [Ocenka komfortnosti odezhdy s razlichnymi uteplitel'yami]. *Dizajn i tekhnologii = Design and Technology*, no. 64 (106), pp. 66–70 (In Russian).

Besshaposhnikova, V.I., Klimova, N.A., Besshaposhnikova, N.V. and Kovaleva, N.E. (2020). The influence of low temperatures on the performance properties of membrane fabrics for clothing [Vliyaniye nizkih temperatur na ekspluatatsionnyye svoystva membrannykh tkanej dlya odezhdy]. *Himicheskie volokna = Chemical fibers*, no. 1, pp. 55–58 (In Russian).

Besshaposhnikova, V.I., Klimova, N.A., Besshaposhnikova, N.V. and Kovaleva, N.E. (2020). Influence of operational factors on the vapor permeability of membrane fabrics and clothing bags [Vliyaniye ekspluatatsionnykh faktorov na paropronicaemost' membrannykh tkanej i paketov odezhdy]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, no. 6 (390), pp. 51–54 (In Russian).

Brink, I.Yu., Bogdanov, V.F. and Kolesnik, S.A. (2016). *Osnovy proektirovaniya teplovoj zashchity audor-snaryazheniya* [Fundamentals of designing thermal protection for outdoor equipment]. Novocherkassk: ISOiP (branch) of DSTU in Shakhty, Russian Federation (In Russian).

Ganieva, M.Kh. and Tashpulatov, S.Sh. (2023). Features of garments made of moisture-absorbing materials [Osobennosti shvejnykh izdelij iz vlagopogloshchayushchih materialov]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: technical sciences*, no. 9-3 (114), pp. 35–38 (In Russian).

Efimov, S.S., Starostin, E.G. and Tappyrova, N.I. (2011). Influence of thermal and moisture conductivity on the thermal resistance of porous materials [Vliyaniye termovlagoprovodnosti na termicheskoe soprotivleniye poristykh materialov]. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 18, no. 1, pp. 139–144 (In Russian).

Ivanova, N.E. and Shustov, Yu.S. (2025). Analysis of the Total Thermal Resistance of Fabric Packages for Demi-Season Special Clothing [Analiz summarnogo teplovogo soprotivleniya paketov materialov dlya demisezonnoj special'noj odezhdy]. *Sbornik nauchnykh trudov kafedry servisnykh tekhnologij i biznes-processov «Ispol'zovanie kognitivnykh tekhnologij i servisov v ekonomike, kommercii i marketinge» = Collection of Scientific Papers of the Department of Service Technologies and Business Processes "Use of Cognitive Technologies and Services in Economics, Commerce, and Marketing"*. Moscow: A.N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art), pp. 113–118 (In Russian).

Kirillov, V.F. and Fedorovich, G.V. (2011). Calculation of thermal insulation parameters of clothing for comfortable working conditions [Расчет теплоизоляционных параметров одежды для комфортных условий работы]. *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational Medicine and Industrial Ecology*, no. 4, pp. 25–31 (In Russian).

Kolesnikov, P.A. (1971). *Osnovy proektirovaniya teplozashchitnoj odezhdy* [Fundamentals of designing thermal protective clothing]. Moscow: Light industry, Russian Federation (In Russian).

Lukyaynova, E.B., Cherunova, I.V. and Tashpulatov, S.Sh. (2022). *Osobennosti proektirovaniya zhenskoy teplozashchitnoj odezhdy dlya uslovij kriosfery* [Design Features of Women's Thermal-Protective Clothing for Cryospheric Conditions]. Kursk: university book, Russian Federation (In Russian).

Pankevich, D.K. and Kukushkin, M.L. (2017). Effect of high-cycle mechanical loads on the structure of waterproof materials with a polyester urethane membrane [Vliyanie mnogociklovyyh mekhanicheskikh nagruzok na strukturu vodozashchitnykh materialov s poliefiruretanovoy membranoj]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, no. 1 (32), pp. 99–108 [In Russian].

Petyul, I.A. and Sapelko, V.V. (2019). Study of the total thermal resistance of material packages by alternative methods [Issledovanie summarnogo teplovogo soprotivleniya paketov materialov al'ternativnymi metodami]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, no. 1 (36), pp. 68–80 [In Russian].

Sklyannikov, V.P. (1984). *Structure and quality of fabrics* [Stroenie i kachestvo tkanej]: Moscow: Light and food industry, Russian Federation [In Russian].

Sokolova, A.S., Kuznetsov, A.A. and Nadezhnaya, N.L. (2016). Method for assessing the thermal protection properties of clothing materials and their packages [Metod ocenki teplozashchitnykh svoystv materialov odezhdy i ih paketov]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, no. 2 (31), pp. 24–31 [In Russian].

Usenbekov, ZH., Nurbaj, S.K. and Seitov, B.H. (2024). Calculation of thermal protection parameters of clothing bags using Monte Carlo simulation. [Raschet teplozashchitnykh parametrov paketov odezhdy metodom imitacionnogo modelirovaniya (metodom Monte-Karlo)]. *Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Almaty Technological University*, no. 2, pp. 197–206 [In Russian].

Cherunova, I.V. and Lesnikova, T.Yu. (2017). Physico-biological conditions for the design of protective clothing against human cooling in air and water [Fiziko-biologicheskie usloviya dlya proektirovaniya zashchitnoj odezhdy ot ohlazhdeniya cheloveka na vozduhe i vode]. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, no. 3 (46), pp. 78–91 [In Russian].

Besshaposhnikova, V.I., Klimova, N.A. and Kovaleva, N.E. (2018). Research of the effect of low temperatures on the structure and properties of membrane fabrics for clothing. *ISJ Theoretical & Applied Science*, no. 11 (67), pp. 54–61.

Информация об авторах

Information about the authors

Панкевич Дарья Константиновна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технология одежды и обуви», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: dashapan@mail.ru

Иванова Юлия Сергеевна

Магистрант, Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: juls.iv@mail.ru

Darya K. Pankevich

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor of the Department "Clothing and Footwear Design and Technology", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: dashapan@mail.ru

Yulia S. Ivanova

Master's Student, Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: juls.iv@mail.ru