

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ МЕМБРАННЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР****STUDY OF THE WATER AND VAPOR PERMEABILITY OF MEMBRANE MATERIALS OF DIFFERENT STRUCTURES**

УДК 677.017.623

**Д.К. Панкевич\*, А.Ю. Мойсейчик***Витебский государственный технологический университет*<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2023-2-27-37>**D. Pankevich\*, A. Moiseichik***Vitebsk State Technological University***РЕФЕРАТ****МЕМБРАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ВОДОПАРОПРОНИЦАЕМОСТЬ, СТРУКТУРА, КОМФОРТ, ОДЕЖДА**

*Объектом исследования являются мембранные текстильные материалы различных структур. Правильный выбор структуры материала для конфекционирования оптимального пакета одежды является практически трудно решаемой задачей в связи с малой изученностью свойств мембранных материалов и отсутствием четких рекомендаций по области их применения.*

*Предметом исследования является водопаропроницаемость мембранных текстильных материалов как характеристика уровня комфортности одежды из них.*

*Цель работы – определение зависимости водопаропроницаемости мембранных материалов различных структур от условий испытаний для формирования рекомендаций по области их применения.*

*В процессе работы выполнено исследование структуры (метод сканирующей электронной микроскопии) и водопаропроницаемости (метод Тейлора) материалов, проанализированы результаты и разработаны рекомендации по применению материалов, содержащих мембраны различных структур.*

*Результат работы – выявлено, что водопаропроницаемость мембранных материалов, имеющих гидрофобную пористую мембрану, при изменении разности давлений изменяется по степенному или по экспоненциальному закону, а материалов с гидрофильной непористой мем-*

**ABSTRACT****MEMBRANE MATERIALS, WATER AND VAPOR PERMEABILITY, STRUCTURE, COMFORT, CLOTHING**

*The water and vapor permeability index is one of the determinants of the level of comfort of clothing materials. The paper presents the results of investigation of water and vapor permeability of waterproofing membrane materials when changing the difference of partial pressures of water and vapor from both sides of the tested sample. In order to realize the purpose of the research, the structure of the materials was examined by scanning electron microscopy and their water and vapor permeability was examined by the Taylor's method. It was shown that among the studied objects, membrane materials with a hydrophobic porous membrane change their vapor permeability when the pressure gradient changes according to a power or exponential law, depending on the type of the porous structure, while materials with a hydrophilic non-porous membrane change their vapor permeability according to the logarithmic law. On the basis of the conducted research it is recommended to use materials with a mesh membrane structure for manufacturing waterproof clothes for sports and recreation activities. In clothes made of materials containing a hydrophobic porous membrane of a sponge structure it is necessary to provide ventilation holes in addition. Materials with a monolithic hydrophilic membrane can be used for making windbreakers and raincoats that are used in cool rainy weather by low activity wearers.*

\* E-mail: [dashapan@mail.ru](mailto:dashapan@mail.ru) (D. Pankevich)

*браной – по логарифмическому закону.*

*Рекомендовано материалы с мембраной сетчатой структуры применять для изготовления водозащитной одежды для спорта и активного отдыха, так как они способны поддерживать высокий уровень комфорта носчика даже при быстром изменении его активности. В одежде из материалов, содержащих гидрофобную пористую мембрану губчатой структуры для достижения комфорта носчика необходимо предусматривать вентиляционные отверстия. Материалы*

*с монолитной гидрофильной мембраной можно использовать для изготовления бытовых ветровок, плащей, штормовок, дождевиков. При этом зона комфорта для носки подобных материалов смещена в область низких значений разности парциальных давлений, которая характерна для прохладной и влажной погоды и низкой активности носчика.*

*Область применения результатов – швейная промышленность.*

Тепловые ощущения человека в одежде являются субъективным показателем, однако, независимо от этого, при подборе одежды главной задачей для любого человека является достижение теплового комфорта в ней. Современные исследования в области создания функциональной терморегулирующей [1, 2, 3], водозащитной и влагоотводящей [4] и спортивной одежды [5] показывают, что текстильная наука далеко продвинулась в вопросе регулирования микроклимата пространства под одеждой. Однако по-прежнему актуальным является исследование свойств имеющихся на рынке текстильных материалов для одежды, способных обеспечивать комфорт носчика в конкретном диапазоне температурно-влажностных условий. Для производителей одежды очень важно понимание того, какие закономерности характеризуют процессы обмена между пододежным пространством и внешней средой в зависимости от применяемого в одежде пакета материалов. Ведь без этого немислим правильный выбор материалов.

Под действием тепла и холода у человека изменяются кровоснабжение кожи и подкожной клетчатки, их температура, а также температура венозной крови, что является главной причиной появления ощущений теплового дискомфорта. От того, как человек оценивает свое тепловое состояние, в значительной мере зависит его умственная и физическая работоспособность. При пребывании человека в покое или выполнении лёгких физических работ наблюдается достаточно высокая корреляция между объективными показателями теплового состояния и тепловыми ощущениями самого человека [6]. Человеческий

организм может рассматриваться как термостатированная биологическая система с внутренним источником тепла, находящимся в непрерывной связи с внешней средой. В нормальных условиях теплопродукция соответствует теплоотдаче и зависит от температуры и влажности воздуха, скорости его движения, энергозатрат человека. Колебания температуры тела происходят вследствие изменения этого соотношения. При этом в организме непрерывно происходит процесс терморегуляции путем изменения интенсивности обмена веществ (химическая терморегуляция) и за счет физических процессов, например, испарения (физическая терморегуляция) [7]. Если тепловой баланс нарушается и тело человека перегревается, срабатывает механизм физической терморегуляции и потоотделение существенно увеличивается. У одетого человека пакет материалов создает вокруг тела оболочку, которая тем комфортнее, чем больше она способна помогать работе механизмов терморегуляции.

Показатель водопаропроницаемости является одним из определяющих уровень комфортности водозащитных мембранных материалов для одежды, т. к. от значения этого показателя зависит, насколько эффективно будет удаляться влага из пододежного пространства при сохранении высокого уровня водонепроницаемости одежды.

В настоящее время существуют различные методики определения водопаропроницаемости, однако условия, создаваемые в процессе выполнения эксперимента, могут существенно отличаться, в связи с чем значения показателей

водопроницаемости варьируют в широком диапазоне. Наиболее распространен стандартный метод исследования – метод вертикально стоящей чаши или метод Тейлора [8]. Согласно методике проведения испытания, коэффициент водопроницаемости WVP (water vapour permeability),  $г/(м^2 \cdot 24ч)$ , определяется как количество пара, прошедшее через единицу площади исследуемого образца материала за 24 часа. В работах Ю.В. Светлова [8] показано, что коэффициент водопроницаемости, измеряемый методом Тейлора, не может однозначно и достоверно служить мерой оценки гигросвойств материала. Это характеристика процесса, происходящего под воздействием ряда внешних факторов, основными из которых являются физические и режимные параметры воздуха по обе стороны от исследуемого образца, в сочетании создающие определенный градиент парциальных давлений водяного пара [8]. Именно поэтому показатель водопроницаемости материала, исследуемый при каком-то одном установленном значении градиента не дает полной информации о способности материала выводить необходимое количество влаги из пододежного пространства наружу.

Испытание можно проводить при различных значениях парциальных давлений водяного пара по обе стороны от образца, что дает ценную информацию о способности материалов повышать уровень водопроницаемости при увеличении движущей силы этого процесса. При эксплуатации колебания парциальных давлений водяного пара внутри и снаружи одежды происходят непрерывно и в довольно широком диапазоне.

Водопроницаемость является ключевым показателем качества водозащитных материалов, содержащих в своей структуре мембранный и текстильные слои (далее – мембранные материалы). Поскольку мембранный полимерный слой является наименее проницаемым для водяного пара, все процессы переноса через такие материалы в большой степени обусловлены физикой процессов, происходящих в мембране.

По структуре все мембраны, используемые в производстве материалов для одежды, можно разделить на следующие группы: пористые, непористые, комбинированные. Непористые

мембраны вырабатывают из гидрофильных полимеров, пористые – из гидрофобных или гидрофильных полимеров. Комбинированные мембраны могут состоять из нескольких различных по структуре и гидрофильности слоев. В порах гидрофобной мембраны перенос вещества осуществляется конвективным потоком, в сплошном материале гидрофильной мембраны – диффузионным потоком.

С точки зрения процессов массопереноса в системе «человек – одежда – среда» должно иметь место вполне определенное соотношение между потоком со стороны источника, величина которого определяется скоростью потовыделения, и суммарным потоком на входе в мембрану, который, в свою очередь, определяется суммой динамической сорбции материала и фазовым переносом влаги по его пористой структуре.

Очевидно, что влажность в пододежном пространстве будет поддерживаться на заданном уровне (определяющем оценку теплоощущений «комфорт»), если поток от источника меньше или равен потоку на входе в мембрану. При нарушении этого условия, которое может быть связано либо с изменением внешних условий, либо с увеличением производительности источника, в системе будет формироваться новый градиент влажности по обе стороны от мембраны. Этот градиент должен адекватным образом компенсировать изменившиеся условия, вызывая повышение плотности потока, и восстановить условия «комфорта».

Такая компенсация может достигаться двумя способами: либо путем сорбционного «связывания» избыточного количества пара мембраной, либо увеличением фазового потока при переносе. Поскольку сорбционная емкость мембраны имеет конечное значение для каждого интервала влажности, естественно, что время, в течение которого этот вклад может выполнять свою роль, ограничено. После исчерпания этого ресурса, в системе остается лишь один путь удаления из пододежного пространства избыточного количества паров воды – перенос по системе транспортных пор. Эффективность этого пути удаления влаги также конечна и ограничена для каждого материала величиной градиента движущей силы процесса и новыми характеристиками пористости, изменившимся вследствие набуха-

ния сорбировавшего влагу полимера (если он гидрофилен).

Вполне вероятно, что в зависимости от типа входящей в состав материала мембраны будет наблюдаться определенная закономерность скорости изменения коэффициента водопропускной способности при изменении разности парциальных давлений водяного пара. Исследованиями влияния температуры и влажности воздуха на способность мембранных материалов пропускать пары воды занимались, в основном, за рубежом. Известны фундаментальные работы американских ученых Gibson P. W. [9] и Schreuder-Gibson H. [10], работающих в области создания одежды для военнослужащих, в которых показано, что мембранные материалы различных структур демонстрируют различную паропропускную способность при разных значениях разности парциальных давлений водяных паров. В работе чешских ученых A. Mazarí и A. Havelka показано, что мембранные материалы, содержащие нано-пористые гидрофобные мембраны, имеют самую высокую способность к транспортированию водяного пара, за ними следуют материалы с гидрофобной микропористой мембраной, а затем – с гидрофильной мембраной. При этом для исследования авторами использованы три стандартные методики, основанные на методе Тейлора, но отличающиеся значени-

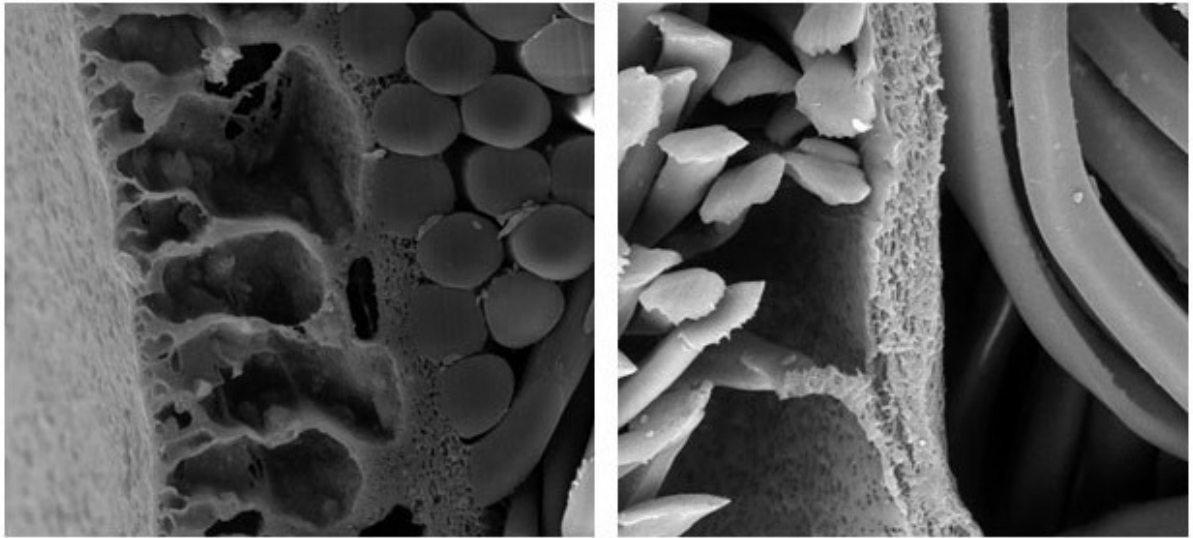
ем разности парциальных давлений, в которых для четырех образцов мембранных материалов различных структур получены согласованные по рангу ряды структурных типов материалов по убыванию значения коэффициента водопропускной способности [5]. Однако более или менее масштабных исследований, направленных на выявление общей закономерности этого явления для мембранных материалов определенных структурных типов, не проводилось.

Целью работы является определение зависимости водопропускной способности мембранных материалов различных структур от условий испытаний для формирования рекомендаций по области их применения.

Для проведения испытания были отобраны образцы двухслойных (2L) и трехслойных (3L) мембранных материалов, содержащих текстильный тканый (тк) или трикотажный (тр) слой и полиуретановые мембраны различных типов. Среди исследуемых образцов выделили группы, образцы в которых обладают сходством структуры содержащихся в них мембран. Характеристика образцов мембранных материалов представлена в таблице 1. Микрофотографии среза материалов каждого типа, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлены на рисунках 1 и 2.

Таблица 1 – Характеристика объектов исследования

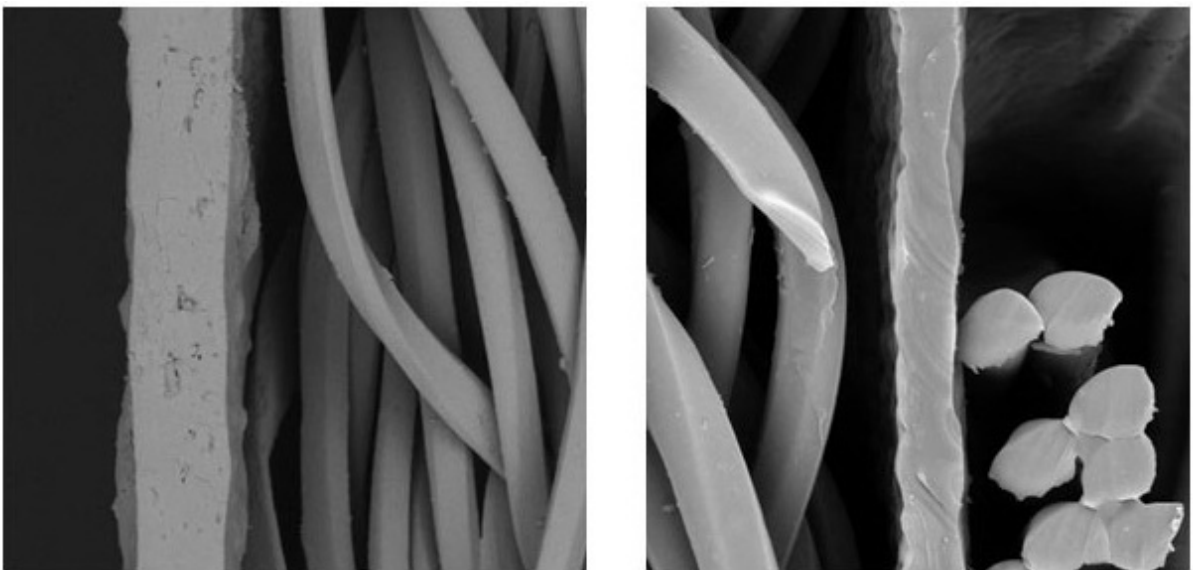
Номер образца / тип	Поверхностная плотность, $г/м^2$	Тип полиуретановой мембраны	Толщина слоев (по результатам СЭМ), мм	
			текстильных слоев	мембранного слоя
1 / 3Lтр	328	пористая сетчатая гидрофобная (рисунок 1)	1,02	0,02
2 / 3Lтр	305		0,54	0,04
3 / 3Lтр	274		0,62	0,03
4 / 2Lтр	134	монолитная гидрофильная (рисунок 2)	0,32	0,02
5 / 3Lтр	228		0,55	0,016
6 / 3Lтр	148		0,24	0,014
7 / 2Lтк	100	пористая губчатая гидрофобная анизотропная (рисунок 3)	0,15	0,015
8 / 2Lтр	148		0,12	0,02
9 / 2Lтк	160		0,13	0,05
10 / 2Lтк	109		0,11	0,07
11 / 2Lтк	142		0,16	0,01
12 / 2Lтк	133		0,16	0,01



а

б

Рисунок 1 – СЭМ поперечного среза образцов (x1800) с пористой мембраной: а) образец № 11 с губчатой гидрофобной мембраной; б) образец № 1 с сетчатой гидрофобной мембраной



а

б

Рисунок 2 – СЭМ поперечного среза образцов (x1800) с монолитной мембраной: а) образец № 4; б) образец № 5

В условиях лаборатории кафедры «Техническое регулирование и товароведение» УО «ВГТУ» проводили испытания образцов на водопаропроницаемость по методике, изложенной в ГОСТе Р 57514-2017. «Ткани с резиновым или полимерным покрытием для водонепроницаемой одежды. Технические условия» с корректировкой температурно-влажностных условий испытания.

Подготовленные образцы материалов размером 11,0×11,0 см помещали на чаши с водой и закрепляли при помощи герметичных прижимных пластин, имеющих отверстие диаметром 9,5 см. После чего чаши устанавливали на столик, оснащенный нагревательными элементами для подогрева чаш с водой. Регистрация изменения температур внутри чаш осуществлялась датчиками с помощью цифрового регистратора температуры производства EuroPribor. Испытания проводили с подогревом воды в чашах от (33±1) °С до (37±1) °С для создания необходимого градиента давлений. Чаши с установленными в них образцами взвешивали до и после испытания, по разнице значений массы чаш затем рассчитывали значения коэффициента водопаропроницаемости. Постоянную температуру и влажность наружного воздуха создавали при помощи климатической камеры. Разность парциальных давлений водяного пара  $\Delta P$ , Па, рассчитывали онлайн при помощи специализированной программы-калькулятора, размещенной в открытом доступе [11], принимая допущение о том, что в чашах под образцами относительная влажность воздуха в момент установившегося режима испытаний составляет 100 %.

Результаты испытаний представлены в виде графиков изменения коэффициента водопаропроницаемости при изменении парциальных давлений водяного пара на рисунках 3, 4 и 5. Полученные в экспериментах данные обрабатывали с помощью табличного редактора Microsoft Excel. Ряды данных аппроксимировали линиями тренда, имеющими наибольшее значение достоверности аппроксимации  $R^2$  (значение  $R^2$  представлено на рисунках).

Анализ результатов исследования позволяет сделать вывод, что коэффициент водопаропроницаемости не является абсолютной величиной, характеризующей данный материал, его

значение может колебаться и зависит от всего комплекса создаваемых в процессе эксперимента условий. Поэтому при подборе материалов в пакет нового проектируемого изделия необходимо ориентироваться на значения показателя, полученные в ходе эксперимента в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Водопаропроницаемость материалов с гидрофобной пористой мембраной сетчатой структуры изменяется по закону основной показательной (экспоненциальной) функции – возрастает сперва медленно, а после определенного значения градиента – очень быстро (рисунок 3). Это свойство позволяет материалам с сетчатой мембраной поддерживать высокий уровень комфорта носчика даже при быстром изменении его активности, поскольку излишки влаги при определенной разнице парциальных давлений пара быстро удаляются из пододежного пространства, возвращая системе «человек – одежда – окружающая среда» баланс. При этом на примере трех образцов при сопоставлении уравнений линий тренда и данных о толщине образцов (таблица 1) наблюдается следующая зависимость: материал с наименьшей общей толщиной обладает наибольшим значением темпового параметра уравнения (коэффициента при  $x$ ). То есть, чем тоньше материал, тем быстрее будет нарастать скорость увеличения его паропрооницаемости. Вблизи верхней границы изучаемого диапазона  $\Delta P$  материалы с мембраной сетчатой структуры демонстрируют наиболее высокий уровень водопаропроницаемости, что согласуется с данными А. Mazari и А. Havelka, в работе которых такая структура мембраны обозначена как нано-пористая. Материалы с мембраной сетчатой структуры можно применять для изготовления водозащитной одежды для спорта и активного отдыха.

Для материалов с монолитной гидрофильной мембраной характерен логарифмический закон изменения водопаропроницаемости – осязательное возрастание функции наблюдается на небольшом начальном участке, а далее происходит снижение скорости изменения водопаропроницаемости, функция возрастает, но медленно (рисунок 4). Такая закономерность указывает на узкий диапазон комфортных условий носки одежды из материалов с мембранами подоб-

Водопаропроницаемость образцов с сетчатой гидрофобной мембраной, г/м<sup>2</sup>·24 ч

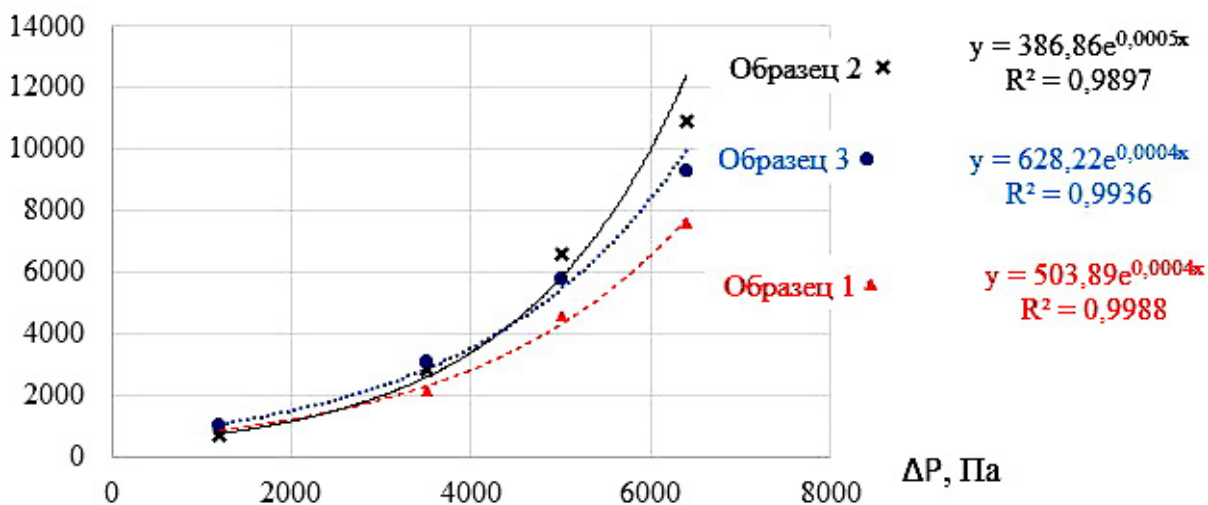


Рисунок 3 – Графики зависимости водопаропроницаемости от разности парциального давления водяных паров для образцов № 1–3

Водопаропроницаемость образцов с монолитной гидрофобной мембраной, г/м<sup>2</sup>·24 ч

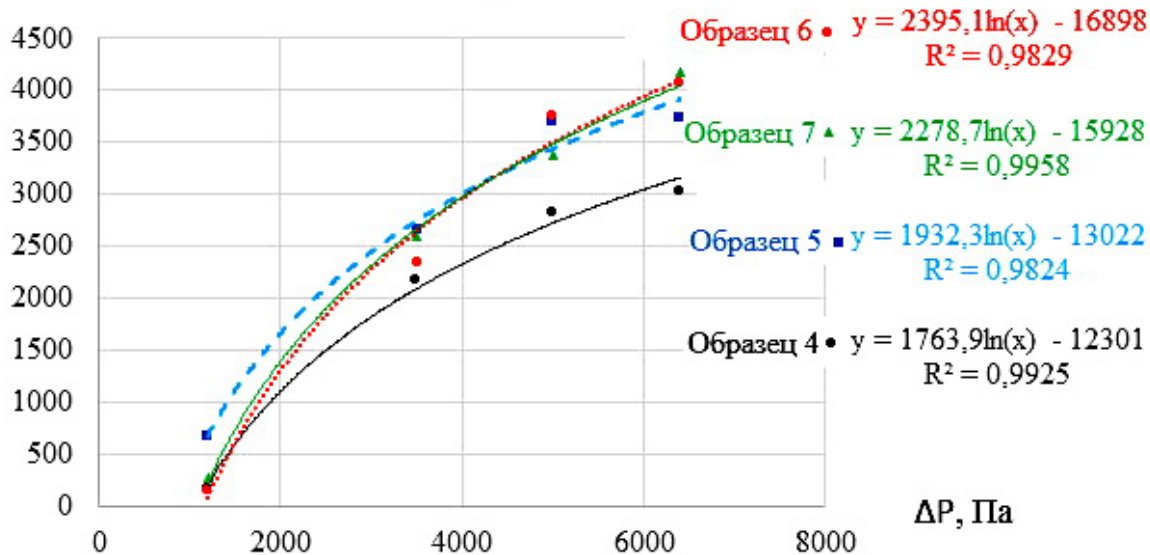


Рисунок 4 – Графики зависимости водопаропроницаемости от разности парциального давления водяных паров для образцов № 4–7

Водопаропроницаемость образцов с губчатой гидрофобной мембраной, г/м<sup>2</sup>·24 ч

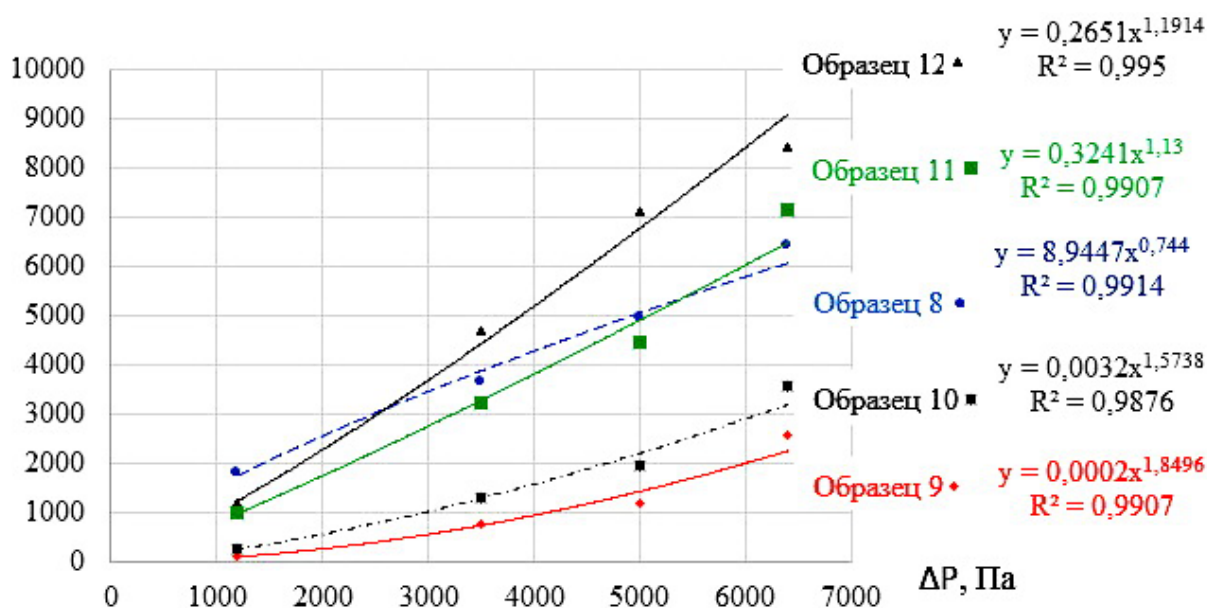


Рисунок 5 – Графики зависимости водопаропроницаемости от разности парциального давления водяных паров для образцов № 8–12

ных структур, так как скорость возрастания водопаропроницаемости существенно отстает от скорости возрастания  $\Delta P$  при изменении теплопродукции носчика. Как и авторы исследования [5], мы также пришли к выводу о том, что материалы с гидрофильной мембраной обладают наименьшим уровнем паропроницаемости из всех исследуемых образцов. При этом, чем толще мембрана, тем ниже значение водопаропроницаемости. Материалы с монолитной гидрофильной мембраной можно использовать для изготовления бытовых ветровок, плащей, штормовок, дождевиков. При этом зона комфорта для носки подобных материалов смещена в область низких значений  $\Delta P$  – такая разница характерна для прохладной и влажной погоды и низкой активности носчика.

У мембранных водозащитных материалов, содержащих гидрофобную пористую мембрану губчатой структуры, водопаропроницаемость изменяется по закону степенной функции с положительным дробным показателем – монотонно

возрастает на всем промежутке исследуемого диапазона  $\Delta P$ . У таких материалов степень комфортности будет определяться соответствием начального значения коэффициента водопаропроницаемости уровню активности носчика. Чем быстрее носчик будет изменять свой уровень активности, тем меньше вероятность его комфортного состояния. В одежде из материалов подобной структуры важно минимизировать резкие перепады активности, поскольку способность материала к транспортировке влаги наружу нарастает равномерно. Еще одним решением является проектирование регулируемых вентиляционных элементов (в боковых швах курток, в швах соединения кокеток). В случае повышенной активности носчик может открыть вентиляционное отверстие, и излишки влаги удалятся быстрее. Подобные элементы, безусловно, повышают стоимость одежды, снижают ее водозащитные свойства, нервируют некоторых носчиков, но без них водозащитная одежда из материалов, содержащих гидрофобную пористую мембрану



губчатой структуры, будет менее комфортной.

Для определения наиболее информативных для исследователя условий испытаний представляет интерес сравнение показателей водопаропроницаемости, полученных при различных значениях  $\Delta P$ , всех исследуемых образцов.

В таблице 2 представлен анализ коэффициента водопаропроницаемости, рассчитанного по полученным закономерностям в условиях, сопоставимых по значению  $\Delta P$  с различными стандартными методиками. Справа в таблице показан ранг материалов в ряду возрастающих значений коэффициента водопаропроницаемости, при этом наименьший уровень водопаропроницаемости соответствует рангу 1, наибольший – рангу 12.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что различия в скорости увеличения водопаропроницаемости при увеличении  $\Delta P$  приводят к тому, что ранжирование материалов по уровню коэффициента водопаропроницаемости не всегда совпадает для разных условий испытаний. При этом есть образцы, ранг которых мало изменяется. А для некоторых образцов ранг изменяет-

ся очень существенно, как в случае с образцом № 1. Следовательно, для оценки уровня водопаропроницаемости материалов, содержащих мембраны, недостаточно проводить эксперимент при какой-то одной  $\Delta P$ , это может привести к неверной интерпретации результатов.

В результате выполненной работы выявлено, что водопаропроницаемость мембранных материалов, имеющих гидрофобную пористую мембрану, при изменении разности давлений изменяется по степенному или по экспоненциальному закону, а материалов с гидрофильной непористой мембраной – по логарифмическому закону.

Поэтому рекомендовано материалы с мембраной сетчатой структуры применять для изготовления водозащитной одежды для спорта и активного отдыха, так как они способны поддерживать высокий уровень комфорта носчика даже при быстром изменении его активности. В одежде из материалов, содержащих гидрофобную пористую мембрану губчатой структуры, для достижения комфорта носчика необходимо предусматривать вентиляционные отверстия.

Таблица 2 – Коэффициент водопаропроницаемости образцов при различных значениях  $\Delta P$

Номер образца / тип	Коэффициент водопаропроницаемости, $WVP, г/(м^2 \cdot 24ч)$ , при различных значениях $\Delta P$			Ранг образца по возрастанию $W$ при значениях $\Delta P$		
	$\Delta P = 2168 Па$ (условия по ИСО 15496:2004)	$\Delta P = 3093 Па$ (условия по ИСО 11092)	$\Delta P = 6638 Па$ (условия по JIS L 1099(A1))	$\Delta P = 2168 Па$	$\Delta P = 3093 Па$	$\Delta P = 6638 Па$
1 / 3Лтр	1144	1816	10690	3	4	12
2 / 3Лтр	1495	2165	8938	6	6	10
3/ 3Лтр	1199	1736	7169	4	3	9
4 / 2Лтр	1249	1875	3222	5	5	2
5 / 3Лтр	1821	2508	3983	9	9	4
6 / 3Лтр	1500	2351	4180	7	7	6
7 / 2Лтк	1576	2386	4126	8	8	5
8 / 2Лтр	2714	3535	6240	12	11	7
9 / 2Лтк	296	571	2346	1	1	1
10 / 2Лтк	569	996	3313	2	2	3
11 / 2Лтк	1907	2850	6754	10	10	8
12 / 2Лтк	2500	3818	9484	11	12	11

Материалы с монолитной гидрофильной мембраной можно использовать для изготовления бытовых ветровок, плащей, штормовок, дождевиков, которые эксплуатируются в прохладную и влажную погоду при низкой активности носчика.

Статья подготовлена по материалам доклада 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, которая состоялась 19 апреля 2023 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Leqi, L., Shuo, S., Dong, W., Shuo, M., Jian-Guo, D., Shaohai, F., Jinlian, H. (2023), Recent Advances in Thermoregulatory Clothing: Materials, Mechanisms, and Perspectives, *ACS Nano*, 2023, № 17 (3), pp. 1803–1830.
2. Yongfang, C., Fengxian, Q., Dongya, Y., Yuqi, L., Hui, L., Tao, Z. (2022), Multifunctional Hybrid Membranes with Enhanced Heat Dissipation and Sweat Transportation for Wearable Applications, *ACS Applied Energy Materials*, 2022, 5 (9), pp. 11892–11899.
3. Jinhao, X., Xuanxuan, D., Binjie, X., Chiwai, K., Yaqian, X., Zhuoming, C., Mengjuan, Z., Qingshuai, Y. (2021), Moisture-Wicking and Solar-Heated Coaxial Fibers with a Bark-like Appearance for Fabric Comfort Management, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, № 13 (22), pp. 26590–26600.
4. Dongyang, M., Zhan, H., Xianfeng, W., Jianyong, Y., Bin, D. (2018), Continuous, Spontaneous, and Directional Water Transport in the Trilayered Fibrous Membranes for Functional Moisture Wicking Textiles, *Small*, 2018, № 14(32).
5. Mazari, A., Havelka, A. (2020), Comparison of textile membranes for moisture transport, *Fibres and Textiles*, 2020, № 5, pp. 24–31.
6. Тимофеева, Е. И., Федорович, Г. В. (2005), *Экологический мониторинг параметров микроклимата*, Москва, 2005, 194 с.

## REFERENCES

1. Leqi, L., Shuo, S., Dong, W., Shuo, M., Jian-Guo, D., Shaohai, F., Jinlian, H. (2023), Recent Advances in Thermoregulatory Clothing: Materials, Mechanisms, and Perspectives, *ACS Nano*, 2023, № 17 (3), pp. 1803–1830.
2. Yongfang, C., Fengxian, Q., Dongya, Y., Yuqi, L., Hui, L., Tao, Z. (2022), Multifunctional Hybrid Membranes with Enhanced Heat Dissipation and Sweat Transportation for Wearable Applications, *ACS Applied Energy Materials*, 2022, 5 (9), pp. 11892–11899.
3. Jinhao, X., Xuanxuan, D., Binjie, X., Chiwai, K., Yaqian, X., Zhuoming, C., Mengjuan, Z., Qingshuai, Y. (2021), Moisture-Wicking and Solar-Heated Coaxial Fibers with a Bark-like Appearance for Fabric Comfort Management, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, № 13 (22), pp. 26590–26600.
4. Dongyang, M., Zhan, H., Xianfeng, W., Jianyong, Y., Bin, D. (2018), Continuous, Spontaneous, and Directional Water Transport in the Trilayered Fibrous Membranes for Functional Moisture Wicking Textiles, *Small*, 2018, № 14(32).
5. Mazari, A., Havelka, A. (2020), Comparison of textile membranes for moisture transport, *Fibres and Textiles*, 2020, № 5, pp. 24–31.
6. Timofeeva, E. I., Fedorovich, G. V. (2005), *Ekologicheskiy monitoring parametrov mikroklimate* [Ecological monitoring of microclimate parameters], Moscow, 2005, 194 p.

7. Колесников, П. А. (1971), *Основы проектирования теплозащитной одежды*, Москва, 1971, 112 с.
8. Светлов, Ю. В. (2006), *Термовлажностные процессы в материалах и изделиях легкой промышленности*, Москва: Академия, 2006, 272 с.
9. Schreuder-Gibson, H. (2008), Self-Detoxifying Materials for Chemically and Biologically Protective Clothing, *US Army Natick Soldier Research, Development, and Engineering Center Technical Report*, Natick/TR-08 L, 2008, Vol. 8, pp. 2008.
10. Gibson, P. W. (1999), Water vapor transport and gas flow properties of textiles, polymer membranes, and fabric laminates, *Journal of Coated Fabrics*, 1999, Vol. 28, № AVR, pp. 300–327.
11. *Калькулятор для расчета парциального давления водяного пара* (2023), режим доступа: <https://gidrotgv.ru/raschet-parcialnogo-davleniya-nasyshhennogo-vodyanogo-para/>, (дата доступа 20.05.2023).
7. Kolesnikov, P. A. (1971), *Osnovy proektirovaniya teplozashhitnoj odezhdy* [Fundamentals of heat protection clothing design], Moscow, 1971, 112 p.
8. Svetlov, Ju. V. (2006), *Termovlazhnostnye processy v materialah i izdelijah legkoj promyshlennosti* [Thermal-moisture processes in materials and products of light industry], Moscow, 2006, 272 p.
9. Schreuder-Gibson, H. (2008), Self-Detoxifying Materials for Chemically and Biologically Protective Clothing, *US Army Natick Soldier Research, Development, and Engineering Center Technical Report*, Natick/TR-08 L, 2008, Vol. 8, pp. 2008.
10. Gibson, P. W. (1999), Water vapor transport and gas flow properties of textiles, polymer membranes, and fabric laminates, *Journal of Coated Fabrics*, 1999, Vol. 28, № AVR, pp. 300–327.
11. *Kal'kuljator dlja rascheta parcial'nogo davlenija vodjanogo para* [Calculator for calculating the partial pressure of water vapor], (2023), available at: <https://gidrotgv.ru/raschet-parcialnogo-davleniya-nasyshhennogo-vodyanogo-para/> (accessed 20.05.2023).

Статья поступила в редакцию 04.07.2023 г.