

**РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ И ПАРОЕМКОСТИ
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**DEVELOPMENT OF A MEASURING INSTALLATION
FOR EXPRESS ASSESSMENT OF VAPOR PERMEABILITY
AND VAPOR CAPACITY INDICATORS OF TEXTILE MATERIALS**

И.А. ШЕРОМОВА, А.С. ЖЕЛЕЗНЯКОВ

I.A. SHEROMOVA, A.S. ZHELEZNYAKOV

(Владивостокский государственный университет)

(Vladivostok State University)

E-mail: Irina.Sheromova@mail.ru

В работе рассматривается техническое решение разработанной измерительной установки и результаты исследований параметров паропроницаемости и пароемкости текстильных материалов, полученные с ее помощью. Выполнены поисковые научные исследования существующей методической и технической базы для определения массообменных характеристик материалов, используемых в швейной отрасли, при взаимодействии с газообразными средами различной природы, выявлены основные недостатки, в том числе ограничения по технологическим возможностям и области применения, длительность проведения эксперимента, что указывает на необходимость ее совершенствования. Предложенное решение измерительной установки для оценки показателей паропроницаемости и пароемкости текстильных материалов отличается от известных аналогов широкими технологическими возможностями, в том числе использованием компьютерных технологий для регистрации искомых параметров и формирования электронной базы данных. Апробация предлагаемого технического решения, выполненная на базе специально созданного экспериментального стенда, конструктивно и функционально базирующегося на разработанном техническом решении, и результаты проведенных исследований доказали работоспособность и целесообразность его использования для оценки рассматриваемых массообменных характеристик свойств текстильных материалов. В ходе апробации определены фактические затраты времени на проведение испытаний, свидетельствующие о том, что реализуемую на базе измерительной установки технологию оценки можно отнести к разряду экспресс-методов.

The paper considers the technical solution of the developed measuring unit and the results of studies of the parameters of vapor permeability and vapor capacity of textile materials obtained with its help. Exploratory scientific studies of the existing methodological and technical base for determining the mass transfer characteristics of materials used in the clothing industry, when interacting with gaseous media of various nature, were carried out, the main shortcomings were identified, including limitations in technological capabilities and areas of application, the duration of the experiment, which indicates the need for its improvement. The proposed solution of the measuring unit for assessing the indicators of vapor permeability and vapor capacity of textile materials differs from known analogs in wide technological capabilities, including the use of computer technologies for recording the desired parameters and forming an electronic database. The testing of the proposed technical solution, carried out on the basis of a specially created experimental stand, structurally and functionally based on the developed technical solution, and the results of the conducted studies proved the operability and expediency of its use for assessing the considered mass-transfer characteristics of the properties of textile materials. During the testing, the actual time costs for conducting tests were determined, indicating that the assessment technology implemented on the basis of the measuring unit can be classified as an express method.

Ключевые слова: текстильные материалы, показатели паропрооницаемости и пароемкости, измерительная установка, массообменные уравнения, компьютерная технология экспресс-оценки.

Keywords: textile materials, vapor permeability and vapor capacity indicators, measuring installation, mass transfer equations, computer technology for express assessment.

Введение

Одной из важнейших массообменных характеристик текстильных материалов, обеспечивающих выполнение эргономических требований к одежде, а в случае швейных изделий специального назначения и их защитную функцию, является паропрооницаемость, характеризующая способность материала к пропусканию или задерживанию парообразной влаги и паров различных техногенных сред. Проникновение паров через толщу материала сопровождается их частичным поглощением, таким образом, материалы можно дополнительно характеризовать еще и пароемкостью (сорбционной емкостью).

Паропрооницаемость определяется как природными свойствами волокон и структурой материала (видом, формой, размерами, количеством пор, состоянием поверхности, плотностью, толщиной и т. п.), так и рядом факторов, не имеющих отношения к материалу как таковому, в частности, физи-

ческими и режимными параметрами воздухообмена, температурным перепадом и относительной влажностью воздуха с обеих сторон материала [1, 2], давлением водяных паров [3] и др. Этим объясняется изменение в широких пределах измеряемых параметров и непредсказуемость истинных значений характеристик паропрооницаемости и пароемкости материалов.

Основной количественной характеристикой названного свойства материалов является коэффициент паропрооницаемости, значение которого для одежных текстильных полотен пальтово-костюмного ассортимента в среднем находится в интервале от 1,1 до 1,7 мг/(м²×с). Учитывая, что величина показателя в значительной степени изменяется под влиянием таких факторов, как перепад температуры и давления проникающей среды, а также относительной влажности воздуха, применительно к одежде бытового назначения для приближения условий испытаний к условиям эксплуатации целесо-

образно проводить измерение характеристик паропроницаемости при температуре воздуха, соответствующей температуре тела человека (35...36,2 °С).

На практике при оценке массообменных характеристик одежных полотен вышеназванные характеристики могут определяться как в изотермических, так и неизотермических условиях. Изотермические условия проведения испытаний предполагают равенство и постоянство температуры паровоздушной среды над и под пробой материала (20±2) °С. При соблюдении неизотермических условий эксперимента разница температур паровоздушной среды над и под пробой материала поддерживается постоянной на протяжении всего испытания, при этом температура над пробой меньше температуры под пробой материала.

Исследованию паропроницаемости материалов, предназначенных для изготовления швейных изделий, в том числе и разработке методического и технического обеспечения ее оценки, посвящено достаточное число научных исследований. Среди работ отечественных авторов можно выделить исследования Лунькова М.А., Куличенко А.В. [4], Шустова Ю.С., Нечушкиной Е.А. [5], Роенко (Дудника) А.О., Армеева Г.А. и др. [6], а также работу авторов данной статьи [7]. Научный интерес представляют и работы иностранных авторов, в том числе исследователей из Витебского государственного технологического университета [8] и ученых из дальнего зарубежья [9, 10, 11].

Анализ стандартизированных методов исследования показал, что гостированный метод определения паропроницаемости текстильных материалов бытового назначения в Российской Федерации отсутствует. Известен только стандартный метод испытаний, предназначенный для оценки названной характеристики свойств мембранных материалов и швов в специальной одежде для защиты от химических веществ (ГОСТ Р 12.4.287-2013).

Следует отметить, что практически все рассмотренные методы и технические средства имеют недостатки, ограничивающие возможности их применения. К наиболее существенным недостаткам, в той или иной

степени присущим выявленным технико-технологическим решениям, можно отнести: ограничения по технологическим возможностям или области применения; длительность проведения испытаний; сложность конструктивного исполнения устройства и невозможность получения информации в электронном варианте при варьировании режимов обработки или действующих сред; отсутствие возможности формирования электронной базы данных о результатах исследования.

Среди наиболее удачных вариантов технического решения с широкими технологическими возможностями можно отметить устройство, описанное в работе [5]. Данное устройство имеет достаточно широкие функциональные возможности за счет приближения параметров эксперимента к реальным условиям эксплуатации материалов, использования разных концентраций смесей аэрозоля при различной продолжительности процесса и скорости потока воздуха в диапазоне температур от 0 °С до 100 °С, количественного анализа загрязнителя, поглощенного волокнисто-пористым материалом, но не позволяет формировать базу данных на электронных носителях информации.

Все вышеперечисленное свидетельствует об актуальности и необходимости проведения дальнейших исследований в области разработки методической и технико-технологической базы для оценки параметров паропроницаемости и пароемкости материалов, используемых в швейной отрасли.

Таким образом, целью настоящего исследования стала разработка нового технического решения измерительной установки, обеспечивающей возможность проведения количественной экспресс-оценки характеристик паропроницаемости и пароемкости текстильных материалов.

Методы

Для исследования теоретических аспектов и существующей методической и технико-технологической базы для определения параметров паропроницаемости различных материалов использован анализ специальной литературы, в том числе и контент-анализ, а также патентный поиск, глубина которого определялась давностью

разработки и применения используемых на практике по настоящее время методов и устройств и составила более 40 лет.

Разработка технического и технологического решения осуществлялась с применением общенаучных и инженерных методов и базировалась на положениях теории тепломассообмена. В основу расчета характеристик паропроницаемости положено классическое уравнение состояния идеального газа.

Экспериментальные исследования проводились на базе специально изготовленного испытательного стенда с вариантом разработанного экспресс-метода оценки показателей паропроницаемости и пароемкости материалов, используемых при изготовлении швейных изделий.

Результаты исследования

По результатам научно-технического и патентного поиска предложено техническое решение измерительной установки, предназначенной для экспресс-оценки показателей паропроницаемости и пароемкости текстильных материалов, которая включает два сообщающихся сосуда – камеры, герметично разделенные испытываемым образцом материала и специальным затвором: накопительную, в которую подается паровоздушная среда, и принимающую – для сбора прошедшего через образец материала влажного воздуха.

Количественной оценочной характеристикой (показателем) паропроницаемости, определяемой на основе исходной инфор-

мации, получаемой с помощью предлагаемой измерительной установки, является коэффициент паропроницаемости, характеризующий количество водяных паров, прошедших через единицу площади испытуемого материала за единицу времени. Для его расчета определяется количество пара, прошедшего через пробу известной площади за время, требуемое для установления равновесия давлений в обеих камерах после начала процесса (после открытия затвора между накопительной и принимающей камерами). Количество прошедшего через испытуемый образец пара рассчитывается на основе измеряемых значений давления, относительной влажности воздуха и температуры паровоздушной смеси в обеих камерах в ходе процесса и в момент установления равновесия.

Расчет базируется на классическом уравнении состояния идеального газа [2]:

$$pV = \nu \cdot RT, \quad (1)$$

где V – объем камеры; p – парциальное давление водяного пара, Па; ν – количество водяных паров.

Парциальное давление водяного пара рассчитываются по формуле [2]:

$$p = \varphi \cdot 6,112 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot t}{243,12+t}} \cdot 10^2 \text{ Па}, \quad (2)$$

где φ – относительная влажность воздуха; t – температура, °С.

Давление пара во влажном воздухе определяется как

$$(p_{env}, t) = \left(1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} p_{env} - \frac{0,074}{p_{env}}\right) \cdot 6,112 e^{\frac{17,62 \cdot t}{243,12+t}}, \quad (3)$$

где p_{env} – давление паровоздушной смеси.

Следовательно,

$$\nu = \frac{p \cdot V}{RT}, \quad \nu = \frac{p_0 V}{RT_0}, \quad (4)$$

где p_0 , T_0 – давление и температура до подачи паровоздушной среды в камеру; ν определяется из измерений давления в накапливающей камере до отпирания затвора в камерах:

$$p_1 V_1 = (\nu_1) RT_1,$$

$$p_2 V_2 = (\nu_2) RT_2, \quad \nu = \nu_1 + \nu_2. \quad (5)$$

Если предположить, что водяные пары из паровоздушной среды частично впитываются волокнами образцов, то можно оценить пароемкость пробы. Для количественной оценки пароемкости используется по-

казатель в виде отношения изменения массы пробы в насыщенном парами влаги и сухом состояниях. Для определения изменения массы пробы достаточно определить суммарное количество пара в обеих камерах до открывания затвора и после завершения процесса. Разность полученных значений численно равна значению искомого параметра.

В ходе исследования предложено принципиальное конструктивное решение измерительной установки, обеспечивающее возможность получения необходимой первичной информации для расчета выбранных показателей паропроницаемости и пароемкости текстильных материалов (рис. 1 – структурно-кинематическая схема измерительной установки: 1 – проба; 2 – парогенератор, редуктор давления; 3 и 4 – камеры; 5 – опора с шарниром и возможностью поворота рабочей камеры; 6 – упругорычажный механизм; 7 и 9 – цифровые манометры; 10 – центральный затвор-шторка механического типа с замыкающимися сегментами поворотного типа; 11 и 12 – цифровые гигрометры; 13 и 14 – цифровые термометры; 15 – блок адаптеров, обеспечивающий интерфейс с цифровыми измерительными приборами; 16 – процессор; 17 – обратный клапан; 18 – сливные магистрали).

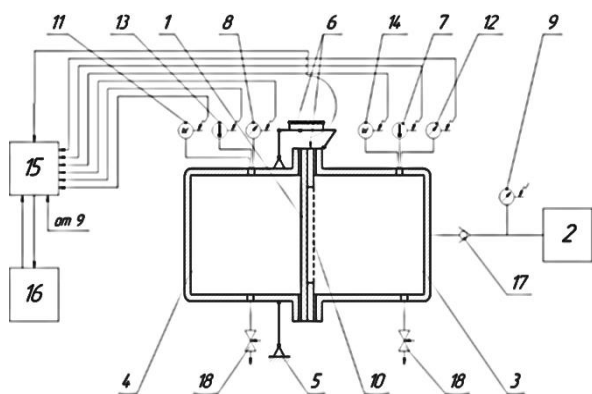


Рис. 1

Авторами разработан и исследован специальный испытательный стенд, конструктивно и функционально базирующийся на предлагаемом техническом решении измерительной установки (рис. 1) с возможностью проведения экспресс-оценки показате-

лей паропроницаемости и пароемкости текстильных материалов, где используется интерфейсный вариант компьютерной технологии, обеспечивающей формирование базы данных на электронных носителях информации. Испытательный стенд состоит из двух сообщающихся камер, между которыми закрепляют образец текстильного материала. В камеру 3 запускают паровоздушную среду, а после установившегося состояния процесса открывают мембрану перед образцом. Под действием избыточного парциального давления паровоздушная среда (ПВС) перетекает в камеру 4. Одновременно в обеих камерах измеряется температура, давление и влажность среды. При этом используются цифровые приборы: мультиметры и осциллограф HS4, подключенные к процессору 16 через интерфейс USB 15. Датчики давления, хромель-алюмелевые термопары и цифровой осциллограф Tie-PieHS4 входят в комплект цифрового мультиметра APPA.

ПВС из парогенератора 2 подается в накопительную камеру 3 до установившегося состояния, затем открывается клапан-затвор 10 и накопленная ПВС перетекает в принимающую камеру 4. С помощью вышеописанного комплекта цифровых приборов проводится измерение параметров процесса в обеих камерах. Исходя из результатов анализа собранных данных и начальных условий проведения эксперимента выполняется оценочный расчет искомых параметров.

В ходе процесса измерения осуществляется регистрация характеристик паровоздушной среды в принимающей и накопительной камерах. В массиве измеренных значений отражаются величины давления и температуры паровоздушной смеси в обеих камерах в ходе процесса и в момент равновесия. После выравнивания давлений в обеих камерах по синхронным графикам самописцев рассчитывается число молей водяных паров в принимающей камере, по которому определяют массу пара в обеих камерах. Коэффициент паропроницаемости исследуемого материала рассчитывается по массе пара в принимающей камере, а пока-

затель пароемкости определяется из разности числа молей паровоздушной среды в обеих камерах до начала процесса и после его завершения.

Расчет оценочных параметров паропроницаемости и пароемкости пробы текстиль-

ного материала проводится исходя из анализа массива данных, полученных с помощью Tie-PieHS4, согласно алгоритму программы (рис. 2 – блок-схема алгоритма программы для расчета параметров паропроницаемости и пароемкости).

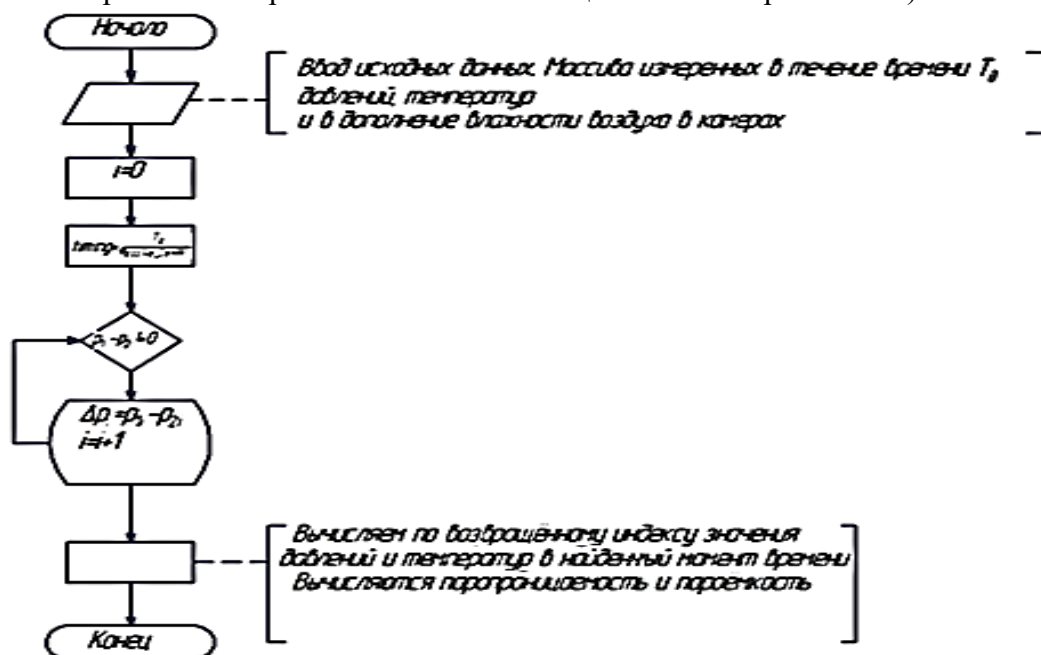


Рис. 2

На базе разработанного стенда и компьютерной технологии проведены исследования по ГОСТ 29298-2005 искомых параметров на пробе из трех слоев бязи с поверхностной плотностью 140...145 г/м² и толщиной 0,25 мм и получены зависимости температуры и давления в накапливающей и принимающей камерах от времени (рис. 3 – экспериментальные графики зависимости режимных параметров в рабочих камерах от времени).

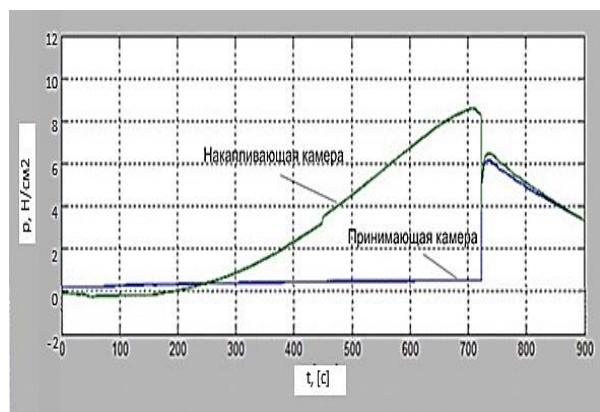


Рис. 3

По зафиксированным данным значения давлений выравниваются на 890-й секунде и равняются 3,43 Н/см² (см. рис. 3). Затвор открывали на 723-й секунде, следовательно, время установления давлений в обеих камерах равняется 167 с. Таким образом, общая длительность испытания составляет около 15 минут, что позволяет отнести реализуемую на предлагаемой измерительной установке компьютерную технологию определения параметров паропроницаемости и пароемкости к классу экспресс-методов.

При относительной влажности воздуха в принимающей камере, равной 100 %, водяной пар находится в термодинамическом равновесии с жидкой фазой, следовательно, можно оценить парциальное давление водяных паров и рассчитать характеристики паропроницаемости и пароемкости исследуемого материала. Так, измеренное значение коэффициента паропроницаемости трех слоев бязи составило 46,58 мг/м²×с (рис. 4 – фрагмент листинга Mathcad-программы расчета паропроницаемости трех слоев бязи).

$m_{gm} := 10^{-3} \cdot gm$ $r := 0.5 \cdot 0.025 \cdot m$ $length1 := 200 \cdot mm + 60 \cdot mm$
 $V1 := \pi \cdot r^2 \cdot length1$ $length2 := 200 \cdot mm$ $S_{sample} := \pi \cdot$
 $Rg := \frac{J}{mol \cdot K}$ $V2 := \pi \cdot r^2 \cdot length2$ $V0 := V1 + V2$
 $p0 := 745 \cdot torr$ $T0 := 20.5 \cdot ^\circ C$

V1 -объем накапливающей камеры
V -объем принимающей камеры

$V0 = 0.226 L$
 $T_{выравнивания} := 167 \cdot sec$

Температуры в камерах после выравнивания давлений

$T_{set2_chamber1} := 64 \cdot ^\circ C$
 $T_{set2_chamber2} := 30 \cdot ^\circ C$

Парциальное давление водяных паров в принимающей камере

$t2 := 30$ $\varphi := 1$

$P_{part_H2O_C2} := \varphi \cdot 6.112 \cdot e^{\frac{17.62 \cdot t2}{243.12 + t2}} \cdot 10^2 \cdot Pa$

Рис. 4

ВЫВОДЫ

1. Проведены поисковые научные исследования существующих технических решений для измерения параметров паропроницаемости и пароемкости композиционных и волокнистых материалов и на основе выявленных направлений совершенствования технической и методической базы для оценки названных характеристик разработана принципиально новая схема технического решения измерительной установки для реализации компьютерной технологии оценки, рабочий блок которой

состоит из двух сообщающихся камер, разделенных образцом испытуемого текстильного материала. Согласно предлагаемой технологии основной оценочной характеристикой принят коэффициент паропроницаемости, определяемый на основе массы пара, рассчитанной с учетом измеренных значений параметров паровоздушной среды в обеих камерах в начале процесса и при установлении равновесного состояния. Характеристикой пароемкости текстильных материалов при этом является показатель в виде отношения изменения массы пробы в насыщенном парами влаги и сухом состоя-

ниях, определяемый на основе разности количества водяных паров в обеих камерах до начала процесса и после его завершения.

2. Выполнена экспериментальная апробация предложенного технического решения, проведены необходимые исследования, позволившие установить фактическое время проведения испытаний и получить оцифрованные результаты, характеризующие уровень паропроницаемости и пароемкости исследуемого материала с учетом принятых оценочных характеристик.

3. На основе полученных экспериментальных значений параметров испытаний в сопоставлении с известными данными можно утверждать, что компьютерная технология оценки показателей паропроницаемости и пароемкости текстильных материалов, реализуемая на основе предлагаемой измерительной установки, может быть отнесена к классу экспресс-методов. Кроме того, в ходе экспериментальной апробации показана возможность формирования электронной базы данных по результатам исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Куришин А.П.* Закономерности изменения проницаемости пористых сред при фильтрационных течениях // Ученые записки ЦАГИ. 2008. Т. XXXIX, № 1-2. С. 125...135.
2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник // Теплотехника и теплотехника. Справочная серия. Кн. 2 / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 561 с.
3. *Thierry Duforestel, Imane Oubrahim, Rafik Belarbi etc.* Assessment of the water vapor permeability: Effect of the total pressure // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022, 196(2). – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123210
4. *Луньков М.А., Куличенко А.В.* Разработка экспресс-метода оценки паропроницаемости текстильных полотен // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2007. № 3С (302). С. 24...26.
5. *Шустов Ю.С., Нечушкина Е.А.* Исследование паропроницаемости текстильных материалов и пакетов в динамических условиях // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 3 (332). С. 23...26.
6. *Рoenko (Дудник) А.О., Армеев Г.А., Трофимчук Е.С., Яминский И.В.* Портативная ячейка для качественной оценки паропроницаемости пленочных материалов // Наноиндустрия. 2022. Т. 15, № 5.

С. 308..318. – DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.5.308.318

7. *Sheromova I.A., Zheleznyakov A.S.* Development of methodological support for the study of materials' air permeability // Materials Science Forum. 2018, Vol. 945. P. 938...943. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.938

8. *Ивашко Е.И., Буркин А.Н.* Методика определения паропроницаемости водозащитных материалов // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2023. № 2 (45). С. 9...16. – DOI: doi.org/10.24412/2079-7958-2023-2-9-16

9. *Haghi A.K.* Mechanism of Heat and Mass Transfer in Moist Porous Materials // Jurnal Teknologi. 2012. 36. – DOI: 10.11113/jt.v36.579

10. *Hu Y.* Measurement of Water Vapor Transmission Rate in Highly Permeable Films // Journal of Applied Polymer Science. 2001, Vol. 81. P. 1624...1633. – DOI: 10.1002/app. 1593

11. *McCullough Elizabeth A.* A comparison of standard methods for measuring water vapour permeability of fabrics // Meas. Sci. Technol. 2003. Vol. 14. P. 1402...1408. – DOI: 10.1088/0957-0233/14/8/328

REFERENCES

1. *Kurshin A.P.* Patterns of changes in the permeability of porous media during filtration flows // Scientific notes of CzAGI. 2008. XXXIX, 1-2. P. 125...135.
2. Theoretical foundations of heat engineering. Thermal-technical experiment. Directory // Heat power engineering and heat engineering. Reference series / under general ed. A.V. Klimenko, V.M. Zorina. Moscow: MEI Publishing House, 2007. 561 p.
3. *Thierry Duforestel, Imane Oubrahim, Rafik Belarbi, Hanaa El Hardouz, Mathilde Colmet Daège* Assessment of the water vapor permeability: Effect of the total pressure // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022, 196(2). – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123210
4. *Lunkov M.A., Kulichenko A.V.* Development of an express method for assessing the vapor permeability of textile fabrics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2007. 3С (302) P. 24...26.
5. *Shustov Yu.S., Nechushkina E.A.* Research of vapour permeability of textile materials and packages in dynamic conditions // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2011. 3 (332). P. 23...26.
6. *Roenko (Dudnik) A.O., Armeev G.A., Trofimchuk E.S., Yaminsky I.V.* Portable cell for qualitative assessment of vapor permeability of film materials // Nanoindustry. 2022. Vol. 15, 5. P. 308...318. – DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.5.308.318
7. *Sheromova I.A., Zheleznyakov A.S.* Development of methodological support for the study of materials' air permeability // Materials Science Forum. 2018, Vol. 945. P. 938...943. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.938

8. *Ivashko E.I., Burkin A.N.* Methodology for determining the vapor permeability of waterproof materials // Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2023, 2 (45). P. 9...16. – DOI: doi.org/10.24412/2079-7958-2023-2-9-16

9. *Haghi A.K.* Mechanism of Heat and Mass Transfer in Moist Porous Materials // Jurnal Teknologi. 2012, 36. – DOI: 10.11113/jt.v36.579

10. *Hu Y.* Measurement of Water Vapor Transmission Rate in Highly Permeable Films // Journal of Applied Polymer Science. 2001, Vol. 81. P. 1624...1633. – DOI: 10.1002/app. 1593

11. *McCullough Elizabeth A.* A comparison of standard methods for measuring water vapour permeability of fabrics // Meas. Sci. Technol. 2003, Vol. 14. P. 1402...1408. – DOI: 10.1088/0957-0233/14/8/328

Рекомендована кафедрой дизайна и технологий Владивостокского государственного университета.
Поступила 05.06.24.
