

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЛАГОПЕРЕНОСА
В СТРУКТУРЕ МНОГОСЛОЙНОГО ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ НОСКИ¹**

**STUDY OF THE PROCESS OF MOISTURE TRANSFER
IN THE STRUCTURE OF MULTILAYER TEXTILE MATERIAL
UNDER OPERATING CONDITIONS WEARING**

Н.В. СКОБОВА, Н.Н. ЯСИНСКАЯ, А.И. СОСНОВСКАЯ

N.V. SKOBOVA, N.N. YASINSKAYA, A.I. SOSNOVSKAYA

(Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь)

(Vitebsk State Technological University, Belarus)

E-mail: yasinskaynn@rambler.ru, skobova-nv@mail.ru, kolbasnikowa2018@yandex.by

Многослойные текстильные материалы, применяемые для производства специальной защитной одежды, должны обеспечивать термофизиологический комфорт при эксплуатации, достигнуть который можно путем проектирования послойной структуры материала с заданной влаго- и паропропускаемостью, что позволит поддерживать тепловой баланс в пододежном пространстве при различных уровнях активности и воздействии внешних факторов окружающей среды.

Статья посвящена исследованию процесса влагопереноса в структуре трехслойного текстильного материала для специальной защитной одежды, эксплуатируемого в условиях повышенной активности при постоянной температуре и влажности внешней среды и различной подвижности воздуха. В качестве объектов исследований разработаны трехслойные структуры, состоящие из тканого и двухслойного трикотажного полотен. Полотно получено с использованием полиэфирных функциональных нитей в слое, прилегающем к телу человека: нить с функцией управления влагой Quick Dry, микрофиламентная нить Soft, полая нить Thermo, во втором слое использованы полиэфирные традиционные нити. Слои в трикотажной структуре соединены соединительными накидами.

Для определения количества испаренной влаги с поверхности многослойного текстильного материала применялся гравиметрический метод, базирующийся на стандартной методике AATCC 201-2012 «Drying Rate of Fabrics: Heated Plate Method». Анализ полученных результатов позволил установить закономерности испарения влаги с поверхности многослойного материала в условиях вынужденной конвекции с учетом морфологии применяемых функциональных нитей, в результате чего выбрано несколько многослойных структур для изготовления специальной защитной одежды с улучшенным термофизиологическим комфортом при эксплуатации.

Multilayer textile materials used for the production of special protective clothing must provide thermophysiological comfort during wearing, which can be achieved by designing a layer-by-layer structure of the material with a given moisture and

¹Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции "Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2023)", которая состоялась 9-10 ноября 2023 года в учреждении образования "Витебский государственный технологический университет" (Республика Беларусь).

vapor permeability, which will allow maintaining thermal balance in the space under clothing at various levels of activity and exposure to external environmental factors environment.

The article is devoted to the study of the process of moisture transfer in the structure of a three-layer textile material for special protective clothing, used in conditions of increased activity at constant temperature and humidity of the external environment and varying air mobility. Three-layer structures consisting of woven and two-layer knitted fabrics have been developed as research objects. The fabric is made using polyester functional threads in the layer adjacent to the human body: thread with Quick Dry linear density moisture management function, Soft microfilament thread, Thermo hollow thread, in the second layer traditional polyester threads are used. The layers in the knitted structure were connected by connecting yarn overs. To determine the amount of evaporated moisture from the surface of a multilayer textile material a gravimetric method based on the standard AATCC 201-2012 "Drying Rate of Fabrics: Heated Plate Method" was used. Analysis of the results obtained made it possible to establish patterns of moisture evaporation from the surface of a multilayer material under conditions of forced convection, taking into account the surface morphology of the functional threads used, as a result of which several multilayer structures were selected for the manufacture of special protective clothing with improved thermophysiological comfort during wearing.

Ключевые слова: многослойный текстильный материал, функциональные нити, скорость испарения, температурные кривые испарения, защитная одежда.

Keywords: multilayer textile material, functional threads, evaporation rate, evaporation temperature curves, protective clothing.

Введение

Как известно [1], для изготовления специальной защитной одежды особую актуальность имеют многослойные текстильные материалы (МТМ). Последовательное наложение текстильных полотен с различными характеристиками в единую структуру позволяет варьировать свойства создаваемых материалов в очень широких диапазонах, регулировать их поверхностные, объемные, гигиенические и теплофизические характеристики. В МТМ комбинируют различные текстильные полотна: ткань/ткань, ткань/трикотаж, ткань/нетканое полотно (лицевой/изнаночный), различного сырьевого состава, поверхностной плотности, способа соединения слоев.

Многослойные материалы, применяемые для производства специальной защитной одежды, должны обеспечивать термофизиологический комфорт при эксплуатации. Достигается это путем поддержания

теплового баланса в пододежном пространстве при различных уровнях активности и воздействии внешних факторов окружающей среды, на который в значительной степени влияют влаго- и паропроницаемость многослойной структуры. В результате испарения влаги с поверхности кожи человека происходит конденсация пара в виде капельно-жидкой фазы и намокание одежды. При проектировании МТМ необходимо стремиться к тому, чтобы облегчить процесс испарения влаги с поверхности кожи человека, обеспечить удаление испарений и влаги во внешнюю среду.

Авторами исследованы показатели функции управления влагой однослойных и двухслойных трикотажных структур с использованием в их составе функциональных полиэфирных нитей [2, 3]. Установлено, что полотна из нитей Quick Dry являются быстро впитывающими материалами, однако их нельзя классифицировать как

быстро сохнущие. Полотна из микрофиламентных нитей Soft обладают двойным эффектом: быстро впитывают и быстро испаряют влагу, что позволит применять их для изготовления изделий с заданными термо- и влагорегулирующими свойствами. Показано значительное снижение теплопроводности двухслойных трикотажных полотен при использовании в качестве составляющих модифицированных полиэфирных нитей Thermo. На основании полученных результатов исследований принято решение об использовании двухслойных трикотажных структур в качестве одного из слоев при формировании многослойного текстильного материала для изготовления специальной защитной одежды.

Цель исследований – установить кинетические закономерности испарения влаги с поверхности многослойного материала для специальной защитной одежды, эксплуатируемой в условиях повышенной активности при постоянной температуре и влажности внешней среды и различной скорости движения воздуха. Предложить рациональные структуры материалов, позволяющие регулировать тепловой баланс пододежного пространства в зависимости от интенсивности физической нагрузки и условий внешней среды.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследований разработаны трехслойные структуры, состоящие из тканого и трикотажного полотен. Лицевая сторона МТМ – хлопкополиэфирная ткань (ХПЭ) поверхностной плотности

200 г/м², изнаночная сторона – двухслойное трикотажное полотно комбинированного переплетения на базе ластика целостной структуры (табл. 1 – свойства исходных материалов). Полотно получено с использованием полиэфирных функциональных нитей в слое, прилегающем к телу человека: нить с функцией управления влагой Quick Dry линейной плотности 18,7 текс (f144), микрофиламентная нить Soft 16,7 текс (f288), полая нить Thermo 16,7 текс (f96), а во втором слое использованы полиэфирные традиционные нити PEC 16,7 текс (f48). Слои в трикотажной структуре соединялись соединительными накидами. В результате сформированы образцы (рис. 1 – графическое изображение формируемой структуры МТМ: 1 – ткань; 2 – термопластичный клей; 3 – слой из полиэфирной нити в структуре трикотажного полотна; 4 – слой из функциональной нити в структуре трикотажного полотна):

- образец 1 – ХПЭ/полотно Quick/PEC;
- образец 2 – ХПЭ/полотно Thermo/PEC;
- образец 3 – ХПЭ/полотно Soft/PEC.



Рис. 1

Т а б л и ц а 1

Параметр	Материал верха (ХПЭ ткань)	Трикотажное полотно Quick/PEC	Трикотажное полотно Thermo/ PEC	Трикотажное полотно Soft/ PEC
Толщина, мм	0,39	1,14	1,12	1,11
Поверхностная плотность, г/м ²	200	248	230	250
Воздухопроницаемость, дм ³ /м ² ·с	67,5	715	755	514

Формирование многослойной структуры осуществлялось методом равномерного точечного нанесения термопластичного клеевого порошка на основе полиамидного сополимера на тканую основу с последующим инфракрасным нагревом гранул порошка и дублированием с двух-

слойным трикотажным полотном на охлаждающих каландрах [4, 5]. Выбранный способ соединения не препятствует транспорту влаги и водяных паров через структуру многослойного материала. Усредненные параметры режимов формирования многослойной структуры представлены в

таблице 2 (табл. 2 – технологические режимы формирования многослойной структуры).

Т а б л и ц а 2

Температура нагрева, °С	Усилие сжатия, кПа	Продолжительность операции, с	Меш-число
120...160	10...20	10...15	7...13

Для определения количества испаренной с поверхности МТМ влаги применялся гравиметрический метод. Образцы многослойного материала размером 10x10 см выдерживались в нормальных климатических условиях (температура 21 °С и относительная влажность 65%) в течение 24 ч. Подготовленные пробы размещались на нагревательной пластине, имеющей температуру тела потеющего человека (37°С) [6, 7], в течение 5 минут, что позволило исследуемому образцу нагреться до температуры металлической пластины. Образец слоem из функциональных нитей прижимался к металлической пластине для имитации контакта тела человека с материалом. Подача воздуха осуществлялась вентилятором при заданных режимах: 0,5 м/с и 1,5 м/с (рис. 2 – лабораторный стенд для оценки скорости испарения: 1 – нагревательная пластина; 2 – вентилятор; 3 – анемометр; 4 – образец; 5 – весы). Используя бесконтактный метод измерения температуры (пирометр), снимали показания температуры поверхности прогретого образца (начальное значение), после чего на нагревательную плиту наносили каплю жидкости (искусственный пот) объемом 0,3 мл и сверху укладывали образец. Через равные промежутки времени снимали показания температуры поверхности и определяли массу испарившейся жидкости, после чего рассчитывали скорость испарения жидкости с поверхности материала. Данный метод, базирующийся на стандартной методике ААТСС 201-2012 «Скорость сушки тканей: метод нагревательной пластины», позволит провести сравнительный анализ кинетики влагопереноса в многослойных материалах с учетом специфики применяемой функциональной нити в структуре пакета и температурных режи-

мов инфракрасного нагрева при формировании многослойной структуры [8].

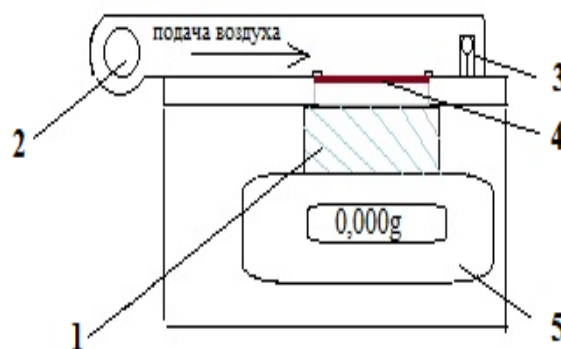


Рис. 2

Результаты и обсуждения

Поскольку образец имеет небольшую начальную влажность (неполное смачивание), основными механизмами изотермического переноса влаги будут нормальная диффузия пара и жидкости, капиллярное течение жидкости. Испаряясь с поверхности тела, парообразная влага проходит через слой трикотажного материала из полиэфирных функциональных нитей. При интенсивном потоотделении избыточное количество влаги поглощается с поверхности тела мелкими капиллярами функциональной нити (капиллярное впитывание). Под действием градиента влажности влага диффундирует от участка трикотажного полотна из функциональных нитей к сухому участку из традиционных полиэфирных нитей с капиллярами большего размера и далее всасывается капиллярами меньшего размера хлопкополиэфирной ткани. С внешней стороны увлажненной хлопкополиэфирной ткани происходит изотермическое испарение в условиях вынужденной конвекции.

Анализ данных кривых испарения показывает, что увеличение скорости воздушного потока приводит к уменьшению времени испарения примерно на 25% для всех типов испытуемых образцов.

Результаты показывают, что критическая влажность является функцией скорости движения воздушного потока $W_{кр} = f(V)$, с увеличением скорости критическая

влажность растёт для всех анализируемых образцов. С использованием плана первого порядка полного факторного эксперимента, в котором варьируемыми факторами выбраны температура инфракрасного нагрева при формировании многослойной структуры и скорость воздушного потока, разработаны теоретико-экспериментальные модели указанной зависимости, анализ которых показывает, что с повышением скорости воздуха увеличивается значение критического влагосодержания, причем у образца 3 оно наибольшее из сравниваемых. Температурные режимы при формиро-

вании МТМ практически не влияют на критическое влагосодержание образцов:

$$W_{кр.обр1} = 10,25 + 2,75V \quad (R^2 = 0,96), \quad (1)$$

$$W_{кр.обр2} = 12,12 + 3,37V \quad (R^2 = 0,98), \quad (2)$$

$$W_{кр.обр3} = 14,5 + 4,0V \quad (R^2 = 0,96). \quad (3)$$

Результаты исследований кинетики испарения и температурные кривые испарения жидкости с поверхности многослойного материала в условиях вынужденной конвекции представлены на рис. 3.

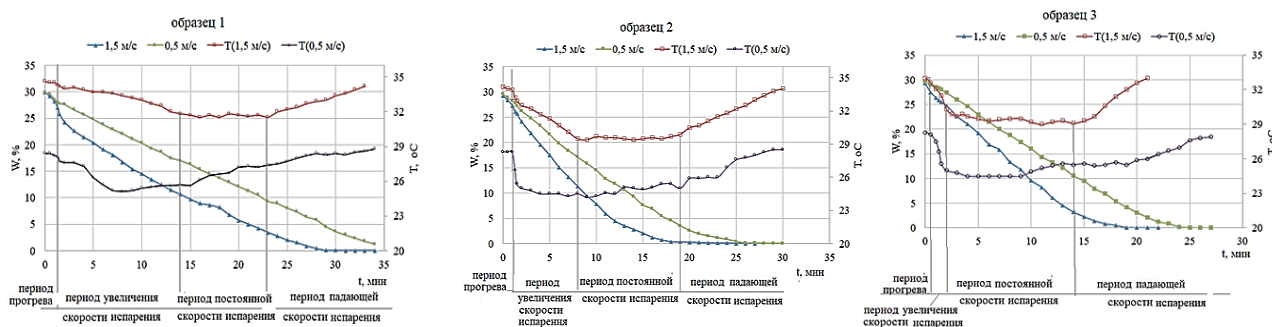


Рис. 3

На температурных кривых испарения можно выделить несколько характерных периодов влагопереноса. На начальном этапе около 30-60 с не наблюдалось значительных изменений температуры, что указывало на прогрев материала [9]. Наиболее протяженный этот период у образца 1, имеющего в своей структуре нити Quick Dry с тетраканальным профилем поперечного сечения, обеспечивающим быстрое впитывание капли влаги и ее аккумуляцию на участке с малой площадью смачивания [3]. Затем в течение некоторого времени происходит перенос влаги от внутреннего слоя к внешнему, температура на поверхности образца снижается, что соответствует периоду увеличения скорости испарения. Наиболее продолжительный период с малым перепадом температуры ΔT отмечается у образца 1, что указывает на невысокие транспортные свойства слоя из функциональной нити Quick Dry за счет прочного удерживания влаги в узких боковых капиллярах нити. У образца 2 высокая подвиж-

ность воздуха приводит к замедлению процесса переноса влаги от нижнего слоя к верхнему (длительность периода 6 мин). Непродолжительный период уменьшения температуры отмечается у образца 3 с вложением микрофиламентной нити. Из-за высокой скорости поглощения [2] и образования большой площади смачивания происходит быстрое испарение влаги. При малой скорости воздуха градиент температуры снижается у всех образцов.

Когда влагосодержание воздуха над материалом равно влагосодержанию воздуха над жидкостью, испарение происходит с постоянной скоростью. При низкой скорости движения воздуха длительность периода постоянной скорости испарения наибольшая из анализируемых для всех образцов. С уменьшением влагосодержания над поверхностью материала происходит повышение температуры – период падающей скорости испарения. Продолжительным этот период является для образца 1 независимо от скорости движения воздуха.

Благодаря микропористой структуре функционального слоя у образца 3 этот период кратковременный во всех сериях опытов.

Построены кривые скорости испарения влаги с поверхности многослойных материалов (рис. 4). На первой стадии процесса наблюдается период постоянной скорости испарения влаги (область удаления свободной влаги – участки BC, BC'). В этот период наблюдается большой перепад влажности внутри материала. Лимитирующее влияние на скорость испарения имеет скорость поверхностного испарения, т.е. внешняя диффузия [10]. В первом периоде испарения влага внутри материала перемещается в виде жидкости (капиллярная влага). Над поверхностью влажного материала образуется насыщенный пар ($\theta = 100\%$), находящийся в равновесии с водой.

Максимальной скоростью испарения при критической влажности в первом периоде сушки обладает образец 3 с микрофиламентной нитью, вложенной в прилегающий

к телу человека слой, что объясняется наличием большого числа микропор в полотне, способствующих увеличению скорости движения фронта поверхностной пропитки полотна при смачивании и площади испарения. Более длительный первый период испарения наблюдается у материалов с вложением нити с функцией управления влажностью. Морфология поверхности нити способствует удерживанию влаги в боковых капиллярах, снижая скорость испарения.

По мере обезвоживания материала наружная поверхность не успевает смачиваться малым количеством подводимой изнутри влаги. Она становится сухой, ее температура повышается. Скорость испарения влаги из материала непрерывно уменьшается, наступает второй период – линейно убывающей скорости испарения. В этом периоде сначала испаряется капиллярно-сконденсированная влага, затем сконденсированная в узких капиллярах.

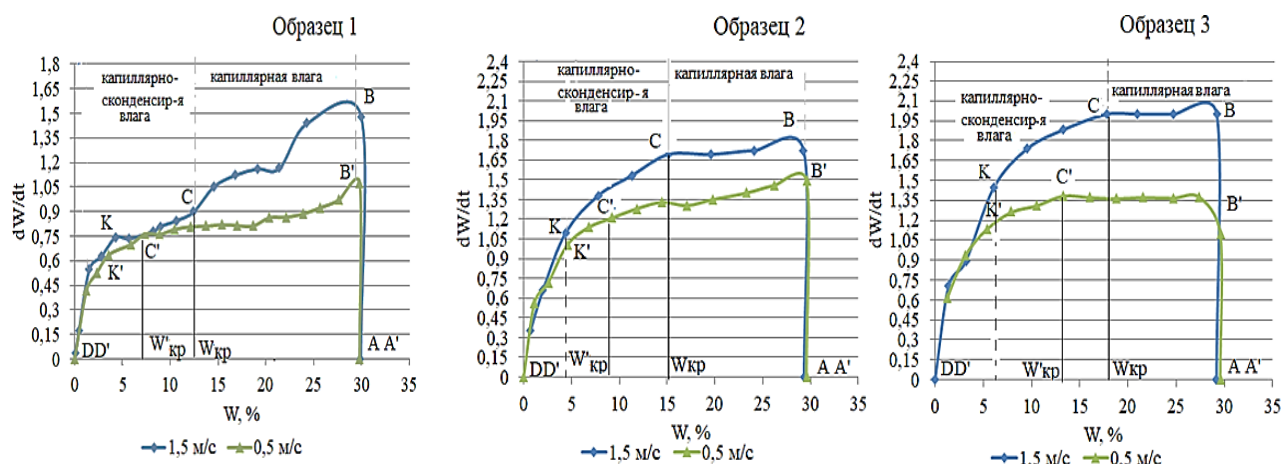


Рис. 4

Для анализируемых материалов характерно разделение периода падающей скорости испарения на два участка различной продолжительности, обусловленных особенностями морфологии поверхности функциональных нитей, а именно наличием мелких капилляров (K и K' – точки раздела участка). Длительность периода падающей скорости испарения для образца 1 составляет 8 минут, образца 2 – 6 минут, образца 3 – 5 минут.

ВЫВОДЫ

Проанализирован процесс влагопереноса и установлены кинетические закономерности испарения влаги в многослойных материалах, полученных с использованием функциональных нитей, при эксплуатационных условиях носки.

Установлено, что температура формирования многослойных пакетов методом равномерного точечного нанесения термо-

пластичного клеевого порошка с последующим инфракрасным нагревом не влияет на транспорт водяных паров и влаги. Увеличение скорости воздушного потока приводит к возрастанию критической влажности материалов, уменьшению времени испарения примерно на 25% для всех типов испытуемых образцов. Применение микрофиламентной нити Soft в структуре одного из слоев многослойного материала позволяет увеличить скорость испарения пота.

Экспериментально определено наличие двух характерных участков в периоде падающей скорости и испарения, обусловленных особенностями морфологии поверхности функциональных полиэфирных нитей.

Разработанные структуры многослойных материалов с использованием нитей Soft и Thermo могут быть рекомендованы для изготовления специальной защитной одежды с улучшенным термофизиологическим комфортом при эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хисамиева Л.Г., Абуталипова Л.Н., Хисамиев А.И., Гатина Г.Г. Многослойные композиционные материалы в проектировании одежды // Вестник Казанского технологического университета. 2015. №15. – <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogosloynnye-kompozitsionnye-materialy-v-proektirovanii-odezhdy>. – Дата обращения 06.09.2023.
2. Ясинская Н.Н., Скобова Н.В. Влагоперенос в текстильных материалах из функциональных нитей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 4 (400). С. 56...61.
3. Скобова Н.В., Ясинская Н.Н., Воробьева А.С. Исследование влагорегулирующих свойств двухслойных трикотажных структур для функциональной одежды // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2023. № 1 (44). С. 49...58.
4. Шайдоров М.А. Клеевые материалы и клеевые соединения при производстве одежды. Витебск: ВГТУ, 2003. 133 с.
5. Ивашкевич Е.М., Гарская Н.П., Филимонова Р.Н. Методы соединения деталей одежды и влажно-тепловая обработка. Витебск: ВГТУ, 2007. 114 с.
6. AATCC 201 Drying Rate of Fabrics: Heated Plate Method. – <http://aatctestmethods.com/test-methods/aatcc-201-drying-rate-of-fabrics-heated-plate-method/>. – Дата обращения 07.09.2023.
7. Mandal S., Chowdhury I.Z., Mazumder N.-U.-S., Agnew R.J., Boorady L.M. Characterization of Sweat

Drying Performance of Single Layered Thermal Protective Fabrics Used in High-Risk Sector Workers' Clothing. *Polymers*. 2022. P14. – <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/24/5393>. – Дата обращения 08.09.2023.

8. Heinisch T., Bajzik V., Hes L. New methodology and instrument for determination of the isothermal drying rate of cotton and polypropylene fabrics at constant air velocity. – <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1558925019873482>. – Дата обращения 06.09.2023.

9. Почекутов И.С., Рязанова Т.В. Процессы массопереноса в системах с участием твердой фазы. Красноярск: СибГАУ, 2016. 92 с.

10. Гордеев Л.С. Процессы и аппараты химической технологии. – https://studme.org/273308/tehnika/perenos_massy_poristyh_telah. – Дата обращения 08.09.2023.

REFERENCES

1. Hisamieva L.G., Abutalipova L.N., Hisamiev A.I., Gatina G.G. Multilayer composite materials in clothing design // Bulletin of Kazan Technological University. 2015. №15. – <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogosloynnye-kompozitsionnye-materialy-v-proektirovanii-odezhdy>. – Access date 06.09.2023.
2. Yasinskaya N.N., Skobova N.V. Moisture transfer in textile materials from functional threads // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 4 (400). Pp. 56...61.
3. Skobova N.V., Yasinskaya N.N., Vorobyeva A.S. Investigation of moisture-regulating properties of two-layer knitted structures for functional clothing. Vestnik of the Vitebsk State Technological University. 2023. No. 1 (44). Pp. 49...58.
4. Shaidorov M.A. Adhesive materials and adhesive compounds in the manufacture of clothing. Vitebsk: VSTU, 2003. 133 p.
5. Ivashkevich E.M., Garskaya N.P., Filimonenkova R.N. Methods of connecting clothing parts and wet-heat treatment. Vitebsk: VSTU, 2007. 114 p.
6. AATCC 201 Drying Rate of Fabrics: Heated Plate Method. Access mode: <http://aatctestmethods.com/test-methods/aatcc-201-drying-rate-of-fabrics-heated-plate-method/>. – Accessed 07.09.2023.
7. Mandal S., Chowdhury I.Z., Mazumder N.-U.-S., Agnew R.J., Boorady L.M. Characterization of Sweat Drying Performance of Single Layered Thermal Protective Fabrics Used in High-Risk Sector Workers' Clothing. *Polymers*. – <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/24/5393>. – Access date 08.09.2023.
8. Heinisch T., Bajzik V., Hes L. New methodology and instrument for determination of the isothermal drying rate of cotton and polypropylene fabrics at constant air velocity. – <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1558925019873482>. – Access date 06.09.2023.
9. Pochekutov I.S., Ryzanova T.V. Mass transfer processes in systems involving the solid phase. Krasnoyarsk: SibGAU, 2016. 92 p.

10. *Gordeev L.S.* Processes and devices of chemical technology. – https://studme.org/273308/tehnika/perenos_massy_poristyh_telah. – Access date 08.09.2023.

Рекомендована организационным комитетом Международной научно-технической конференции "Инновации в текстиле, одежде, обуви (ИСТАИ-2023)".
Поступила 16.11.23.
