

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
И ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА
С ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИМИ МИКРОКАПСУЛАМИ**

**INVESTIGATION OF MECHANICAL, OPERATIONAL
AND TEMPERATURE-REGULATING PROPERTIES OF A MATERIAL
WITH HEAT-ACCUMULATING MICROCAPSULES**

О.А. МОСКАЛЮК^{1,2}, А.А. КОПОТИЛОВА¹, Я.А. КИМ³, Е.Н. ПОПОВА⁴, В.Н. БУТУЗОВ⁵

О.А. MOSKALYUK^{1,2}, А.А. KOPOTILOVA¹, Ya.A. KIM³, E.N. POPOVA⁴, V.N. BUTUZOV⁵

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта,

³ООО «АрктикТекс»,

⁴Институт высокомолекулярных соединений РАН,

⁵ООО «Микскап»)

¹St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,

²Baltic Federal University named after I. Kant,

³ООО "ArcticTex",

⁴Institute of High Molecular Compounds of the Russian Academy of Sciences,

⁵ООО «Mixcap»)

E-mail: 2001kalina@mail.ru

В статье представлены результаты исследования опытного образца материала с внесенными теплоаккумулирующими микрокапсулами. Проведены механические испытания при одноосном растяжении с использованием разрывной машины. Исследованы эксплуатационные свойства полотна, определена устойчивость к истиранию по плоскости. Испытуемые образцы были подвержены стирке в мыльном растворе. Образцы с внесенными термоаккумулирующими капсулами, прошедшие испытания на истирание и стирку, исследованы методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Исследован терморегулирующий эффект в термокриокамере. Показано, что пропитка полотен флиса суспензией теплоаккумулирующих микрокапсул не оказывает существенного влияния на механические характеристики полотна. Испытания готового образца текстильного материала, пропитанного суспензией вещества с фазовым переходом, в термокриокамере подтвердили терморегулирующие свойства образцов. Существенного негативного влияния на терморегулирующие свойства полотна пропитка не оказывает, но сама по себе является неустойчивой к физико-химическим воздействиям.

The article presents the results of a study of a prototype material with introduced heat-accumulating microcapsules. Mechanical tests were carried out under uniaxial tension using a breaking machine. The operational properties of the canvases are investigated, the resistance to abrasion along the plane is determined. The test samples were subjected to washing in soap solution. During the test, 10 washes were carried out. Samples with added thermal storage capsules that were tested for abrasion and washing were examined by differential scanning calorimetry (DSC). The thermo-regulating effect in the thermo-cryo chamber is investigated. It is shown that impregnation of fleece sheets with a suspension of heat-accumulating

microcapsules does not significantly affect the mechanical characteristics of the canvas. Tests of the finished textile material sample with MFP in a thermo-cryo chamber confirmed the thermoregulatory properties of the samples. Impregnation does not have a significant negative effect on the properties of the canvas, but in itself is unstable to physical and chemical influences.

Ключевые слова: текстиль, терморегуляция, теплоаккумулирующие микрокапсулы, прочность, удлинение, истирание, устойчивость к стиркам, метод ДСК, термокриокамера.

Keywords: textiles, thermoregulation, heat-accumulating microcapsules, strength, elongation, abrasion, resistance to washing, DSC method, thermo-cryo chamber.

Современный ритм жизни задает новые требования к функциональности и комфорту одежды. В настоящее время разрабатывается «умная» одежда, способная регистрировать изменения окружающей среды и реагировать на них. Условно она делится на пассивную, активную и «очень умную» [1-4].

Пассивные «умные» материалы содержат сенсорные датчики, снимающие ЭКГ и ЭЭГ, или термодатчики для измерения температур. При помощи углеродных электродов такая одежда может определять уровень загрязнения воздуха, влажность или уровень кислорода. Активные «умные» материалы не только выявляют изменения окружающей среды, но и могут реагировать на них. Устройства ввода и оповещения могут давать обратную связь, регулировать температуру, запоминать форму или поглощать излишнюю влагу. «Очень умная» одежда на основе всех полученных данных способна сама делать прогнозы и адаптироваться к условиям окружающей среды. В материал встроен микрокомпьютер, считывающий информацию с датчиков и оперативно регулирующий свойства одежды.

«Умный» текстиль применяется в различных сферах. До настоящего времени самый большой сегмент рынка приходился на военный сектор, но постепенно интерес стал проявляться в сфере медицины и повседневной одежды. Согласно прогнозу Research and Markets [5-7] наибольший темп роста ожидается в сфере домашнего хозяйства и стиля жизни – примерно на

70% с 2016 по 2026 год. Компания Juniper Research прогнозирует снижение популярности электронных аксессуаров в пользу «умного» текстиля, общемировой рынок которого достигнет 350 млрд долларов [8-10] (рис. 1 – прогнозируемый темп роста «умной» одежды по областям применения к 2026 году).

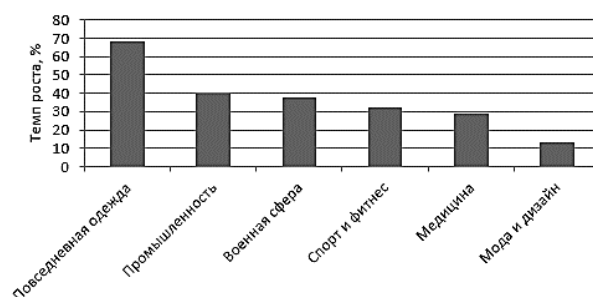


Рис. 1

В России интерес к смарт-текстилю проявляется как среди потребителей, так и среди производителей одежды. Быстро развивающийся новый рынок требует большого количества научных исследований для разработки новых, более эффективных решений. Одним из перспективных направлений является создание материалов с эффектом терморегуляции. Такие ткани найдут широкое применение в спортивной одежде, поскольку смогут повысить комфортность во время и после тренировок за счет эффекта кондиционирования. Использование терморегулирующих материалов может устранить сезонность повседневной одежды, поскольку она

сможет приспособливаться к различным погодным условиям. Ткани с теплоаккумулирующими микрокапсулами поглощают излишки тепла в жаркую погоду, а затем высвобождают это тепло при понижении температуры окружающей среды. Это может быть актуально не только для одежды, но и для производства постельного белья или туристического снаряжения (палаток, спальных мешков). Внесение микрокапсул не влияет на вес готового изделия, для их работы не требуется подключение к источнику питания.

Целью данной работы является модификация текстильного материала составом, содержащим вещества с фазовым переходом, исследование механических, эксплуатационных и терморегулирующих свойств данных материалов.

Объекты и методы исследования

При изготовлении опытного образца терморегулирующего материала применялся флис плотностью 260 г/м², 100% ПЭ, и теплоаккумулирующие микрокапсулы на основе парафина в виде концентрированной суспензии на водной основе. Плотность микрокапсул 880-950 г/см³. Средний размер частиц 1-20 мкм.

При выполнении измерений в лаборатории соблюдены следующие условия: температура воздуха 22±5 °С; атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа; влажность воздуха 45-75% при 25 °С.

Измерения поверхностной плотности образцов проведены в соответствии с ГОСТ 3811-72 на образце 10x10 см с использованием электронных лабораторных весов Госметр ВЛ-210 I класса точности. Поверхностная плотность образца вычислялась по формуле:

$$G = \frac{g}{L \cdot B}, \quad (1)$$

Механические испытания при одноосном растяжении проведены на основе ГОСТ 3813-72 с использованием универсальной испытательной машины Instron. В результате испытаний получены зависимости нагрузка-удлинение $P(\Delta l)$. Скорость растяжения составляла 100 мм/мин, базовая

длина – 100 мм. На основе полученных зависимостей $P(\Delta l)$ построены диаграммы растяжения $\sigma(\varepsilon)$, из которых определены прочность, удлинение при разрыве. Начальный модуль жесткости образцов до и после пропитки рассчитывался по формуле:

$$E_0(\varepsilon) = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}. \quad (2)$$

Испытание материала на устойчивость к износу по плоскости проведено на приборе ДИТ-М по ГОСТ 18976-73. Потеря массы образцов в процессе истирания зафиксирована с помощью электронных лабораторных весов Госметр ВЛ-210.

Испытуемые образцы были подвержены стирке в мыльном растворе при температуре 40 °С в течение 30 минут. В процессе испытания проведено 10 стирок.

Образцы с внесенными термоаккумулирующими капсулами, прошедшие испытания на истирание и стирку, исследованы методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе DSC 204 F1 (фирма Netzsch, Германия) в диапазоне температур от 0 до 40 °С при скорости нагрева 5 °С /мин в инертной среде (аргон).

Для исследования эффекта терморегуляции образец полотна был кондиционирован при нормальных условиях в течение 24 часов, затем установлен в испытательную камеру при комнатной температуре, выдержан в данных условиях 5-10 мин до установления температурной стабилизации в испытательной камере. Далее произвели нагрев образца до температуры 40 °С с шагом 1 °С, делая запись температуры в образце. Затем произведено снижение температуры до -40 °С с шагом 1 °С с записью температуры в образце. Термопара, определяющая значения температуры в образце, располагалась в центре образца.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытания и рассчитанные значения поверхностной плотности полотна флиса до и после пропитки приведены в табл. 1.

Таблица 1

	Длина, м	Ширина, м	Масса, г	Поверхностная плотность, г/м ²
Исходный образец	0,1±0,001	0,1±0,001	2,60±0,3	260±30
Образец после пропитки	0,1±0,001	0,1±0,001	5,25±0,7	525±75

Сравнительные диаграммы растяжения полотен флиса до и после пропитки представлены на рис. 2.

Результаты проведенного испытания и рассчитанные значения показателей механических свойств полотен флиса приведены в табл. 2.

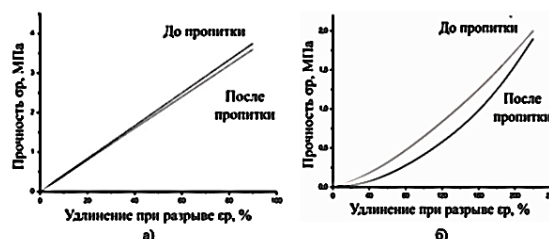


Рис. 2

Таблица 2

	Прочность при разрыве, МПа	Удлинение при разрыве, %	Начальный модуль жесткости, МПа
Исходный образец (основа)	3,8±0,2	85±2	4,4±0,3
Образец после пропитки (основа)	3,5±0,2	89±3	3,6±0,3
Исходный образец (уток)	1,9±0,2	189±4	0,2±0,1
Образец после пропитки (уток)	1,9±0,3	215±5	0,3±0,1

По результатам испытания видно, что поверхностная плотность флисового полотна после пропитки увеличивается в 2 раза. Прочность полотен флиса при разрыве после пропитки незначительно уменьшается до 3,5±0,2 МПа при растяжении по основе и не изменяется при растяжении по утку, остается равной 1,9±0,3 МПа. Удлинение при разрыве после пропитки увеличивается по основе на 4±3%, по утку на 26±5%. Начальный модуль жесткости до и после пропитки незначительно снижается по основе до 3,6±0,3 МПа и не изменяется по утку. Таким образом, значительных изменений механических свойств полотен флиса после пропитки не наблюдается, кроме увеличения растяжимости в направлении утка.

В рамках испытания на истирание по плоскости образцы были подвергнуты 10000 истирающих циклов, процесс истирания изображен на рис. 3.

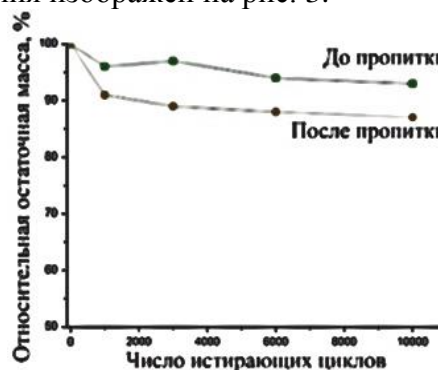


Рис. 4

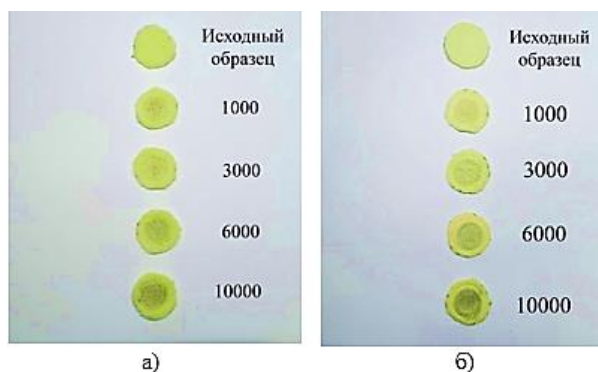


Рис. 3

В процессе истирания по плоскости или стирки происходит потеря массы образцов за счет уменьшения количества теплоаккумулирующих микрокапсул. Диаграмма изменения массы образцов в зависимости от количества истирающих циклов представлена на рис. 4, в зависимости от количества стирок – на рис. 5.

На рисунках видно, что полотна флиса после пропитки быстрее теряют массу, истирание визуально более заметно, ворс стирается после 10000 истирающих циклов.

лов, становится видно переплетение материала.

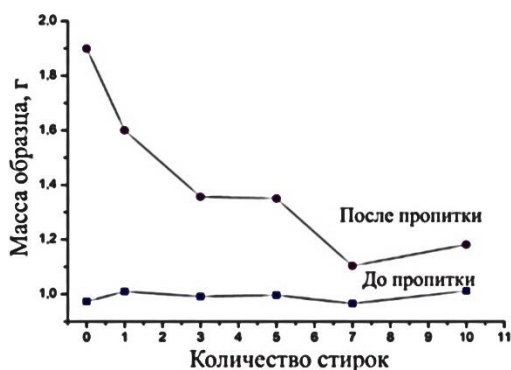


Рис. 5

В процессе стирки пропитка вымывается из материала. Масса образцов без пропитки не изменяется, следовательно, потеря массы образцов с пропиткой происходит исключительно за счет вымывания микрокапсул.

В результате эксперимента ДСК определены температуры плавления ($T_{пл}$) и кристаллизации ($T_{кр}$) МФП на образцах ткани (эндо- и экзотермические пики, которые наблюдаются при нагревании и охлаждении образцов в процессе эксперимента), а также энтальпии плавления ($\Delta H_{пл}$) и кристаллизации ($\Delta H_{кр}$), представленные в табл. 3.

Таблица 3

№ образца	Описание образца	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$T_{кр}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{пл}, \text{Дж/г}$	$\Delta H_{кр}, \text{Дж/г}$
1	Капсулы (пропитка)	30,4	18,9	110,1	115,3
2	Флис до пропитки	-	-	-	-
3	Флис после пропитки	31,3	18,0	167,1	172,1
4	Флис после пропитки после 3 стирок	28,7	23,0	16,98	18,6
5	Флис после пропитки после 10 стирок	28,4	13,47	20,8	10,2
6	Флис после пропитки после 1000 истирающих циклов	32,0	18,9	163,7	175,1
7	Флис после пропитки после 10000 истирающих циклов	31,8	18,0	128,1	132,2

Диаграммы полученных зависимостей для образцов № 1-7 представлены на рис. 6-12

соответственно.

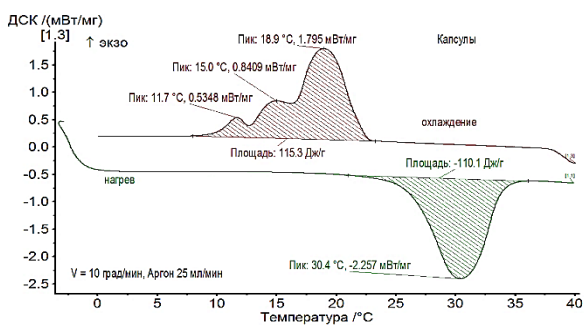


Рис. 6

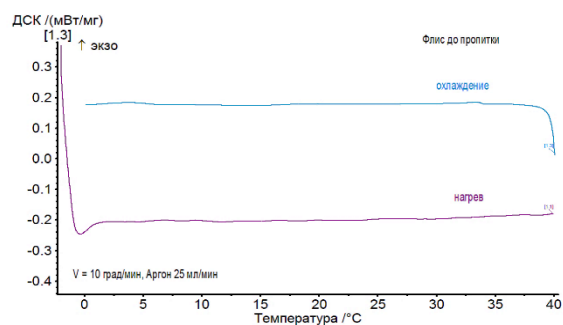


Рис. 7

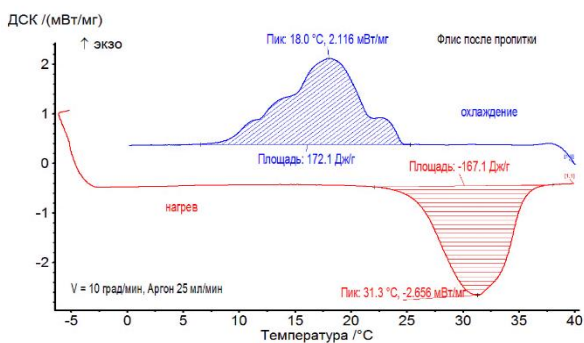


Рис. 8

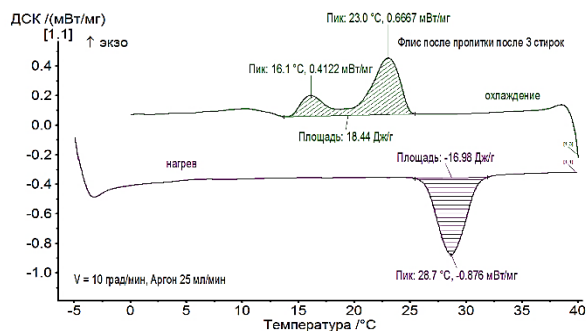


Рис. 9

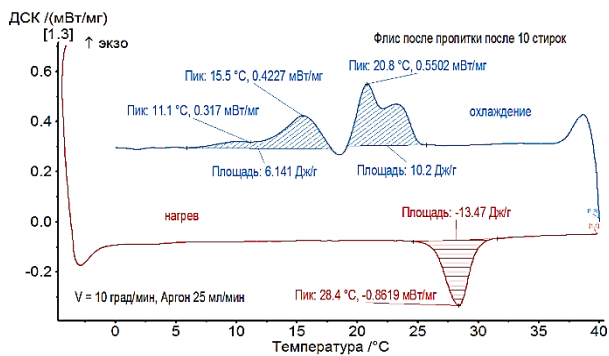


Рис. 10

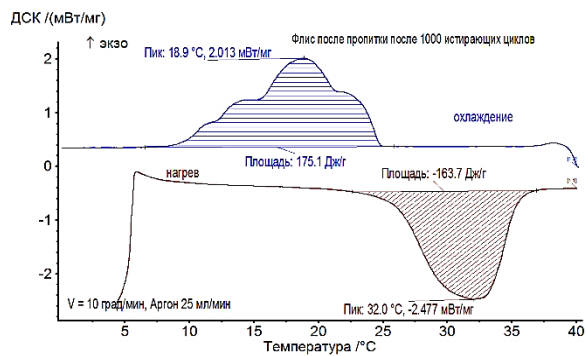


Рис. 11

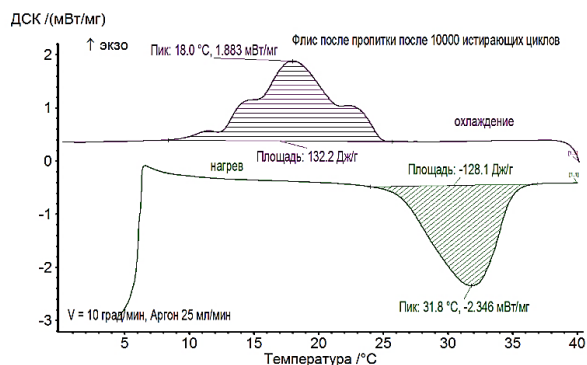


Рис. 12

На всех образцах, наполненных капсулами, наблюдаются экзо- и эндотермические процессы, которые можно отнести к кристаллизации и плавлению наполнителя (капсул). При этом пик плавления имеет один максимум в интервале 28,4–31,8 °С, а пик кристаллизации имеет сразу несколько экстремумов: 22,7°С; 18,0°С; 15,0°С; 11,7°С. В случае образца №5 (после 10 стирок) пик кристаллизации разделяется на два отдельных пика 20,8 и 15,5 °С. Можно отметить, что образцы №№ 4 и 5 (подвергнутые стирке) в отличие от образ-

цов №№ 6 и 7 (подвергнутые истиранию) имеют гораздо меньшие значения энтальпии плавления и кристаллизации, что свидетельствует о том, что при стирке капсулы наполнителя быстро вымываются из флиса.

Исследования эффекта терморегуляции в полотно проведены на базе ООО ИЛ «ТестСертифико». Образец, установленный в термокриокамеру, 5-10 минут выдерживался при комнатной температуре. Далее производился нагрев образца до 40 °С, затем снижение температуры до -40 °С. Первые 30 мин испытания при повышении температуры с +21 до +40 °С температура в материале с пропиткой повышалась примерно в 2 раза медленнее, чем в материале без пропитки, затем выравнивалась (рис. 13). При понижении температуры с +40 до -40 °С температура в материале с пропиткой снижалась медленнее (особенно в первые 30 мин), чем в материале без пропитки (рис. 14). Таким образом, полученный образец обладает заявленными терморегулирующими свойствами.

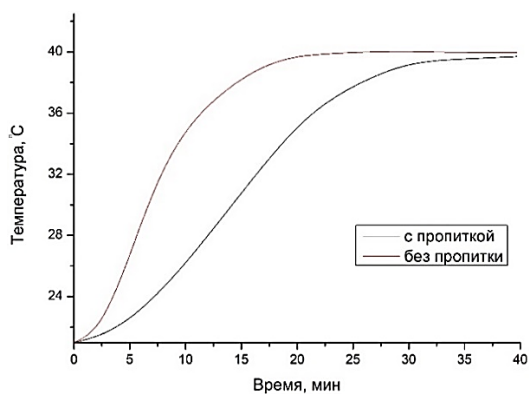


Рис. 13

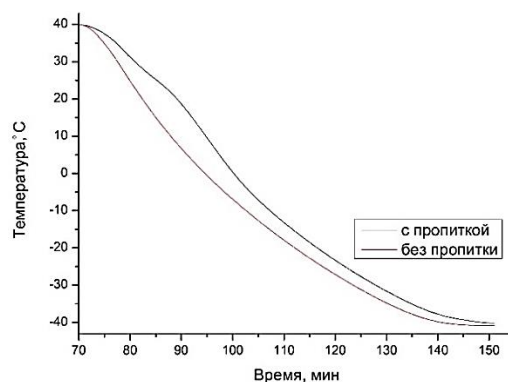


Рис. 14

ВЫВОДЫ

Получены образцы текстильного материала, обработанного суспензией с МФП. Показано, что пропитка полотен флиса суспензией теплоаккумулирующих микрокапсул не оказывает влияния на прочность и начальный модуль жесткости материала, а также на удлинение при растяжении по основе. По утку полотно с пропиткой удлиняется на $26 \pm 5\%$ больше, чем без пропитки.

Показано, что поверхностная плотность после пропитки увеличивается в 2 раза по сравнению с исходными образцами.

В процессе истирания заметно, что износ полотна после пропитки происходит немного быстрее, чем до пропитки. Через 10000 истирающих циклов стирается ворс и у образцов с пропиткой, и без пропитки.

С помощью метода ДСК выявлено, что при стирке теряется значительно большее количество микрокапсул, чем при истирании по плоскости, что снижает терморегулирующий эффект.

Испытания готового образца текстильного материала с МФП в термокриокамере подтвердили терморегулирующие свойства образцов.

Выяснено, что существенного негативного влияния на свойства полотна пропитка не оказывает, но сама по себе является неустойчивой к физико-химическим воздействиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глобальные технологические тренды. Трендлеттер. 2016. №4. – <http://issek.hse.ru/trendletter>. – 05.08.2023.
2. Василевская В.В., Горень И.Г., Козловская Л.Г., Шевцова М.В. Виды «умного» текстиля и изделий на его основе // Материалы докладов 52-й междунар. науч.-техн. конф. преп. и студ. Витебск, 2019. Т. 2. С. 214...2016.
3. Weng W., Chen P., He S., Sun X., Peng H. Smart Electronic Textiles // *Angewandte Chemie International Edition*, 2016. Vol. 21. P. 6140...6169.
4. Lund A., Wu Y., Salerno B., Torrisi F., Carmichael T.B.. Conducting materials as building blocks for electronic textiles // *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 6. P. 491...501.
5. Research and Markets - Market Research Reports. – <https://www.researchandmarkets.com/> – 05.08.2023.

6. Круглов А.В., Телегин Е.С., Матрохин А.Ю., Грузинцева Н.А. Современные тенденции и перспективы использования «умной одежды» // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 1 (403). С. 192...195.

7. Ларикова М.Д., Пищинская О.В. Анализ рынка "умной" одежды // Инновации и современные технологии в индустрии моды: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. / РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), НТИ (филиал). Саратов: Амирит, 2018. С. 106...109.

8. Стратегическая программа исследований Технологической платформы «Текстильная и легкая промышленность на 2021-2023 гг.» – <http://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=356311>.

9. Ядровская М.В., Поркшеян М.В., Синельников А.А. Перспективы технологии интернета вещей // *Advanced Engineering Research*. 2021. Т. 21, № 2. С. 207...217.

10. Недогарок В.В. Умная одежда – технология будущего // *Ceteris Paribus*. 2022. № 12. С. 32...33.

REFERENCES

1. Global technological trends. Trendletter. 2016. No. 4. – <http://issek.hse.ru/trendletter>. – 05.08.2023.
2. Vasilevskaya V.V., Goren I.G., Kozlovskaya L.G., Shevtsova M.V. Types of "smart" textiles and products based on it // *Materials of reports of the 52nd International Scientific and Technical Conference of teachers and students*. Vitebsk, 2019. Vol. 2. P. 214...2016.
3. Weng W., Chen P., He S., Sun X., Peng H. Smart Electronic Textiles // *Angewandte Chemie International Edition*, 2016. Vol. 21. P. 6140...6169.
4. Lund A., Wu Y., Salerno B., Torrisi F., Carmichael T.B. Conducting materials as building blocks for electronic textiles // *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 6. P. 491...501.
5. Research and Markets - Market Research Reports. – <https://www.researchandmarkets.com/> – 05.08.2023.
6. Kruglov A.V., Telegin E.S., Matrokhina A.Yu., Gruzintseva N.A. Modern trends and prospects of using "smart clothes" // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. № 1 (403). Pp. 192...195.
7. Larikova M.D., Pishchinskaya O.V. Market analysis of "smart" clothing // *Innovations and modern technologies in the fashion industry: materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference / A.N. Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Novosibirsk Institute of Technology (branch)*. Saratov: Amirite 2018. P. 106...109.
8. Strategic Research Program of the Technology Platform "Tech-stylish and light industry for 2021-2023" – <http://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=356311>.
9. Yadrovskaya M.V., Porksheyen M.V., Sinelnikov A.A. Prospects of IoT technology // *Advanced Engineering Research*, 2021, vol. 21, no. 2. P. 207...217.

10. *Nedogarok V.V.* Smart clothes – the technology of the future // *Ceteris Paribus*. 2022. No. 12. P. 32...33.

Рекомендована оргкомитетом XIX Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы». Поступила 09.10.23.
