

Научный журнал «Костюмология» / Journal of Clothing Science <https://kostumologiya.ru>

2024, Том 9, № 2 / 2024, Vol. 9, Iss. 2 <https://kostumologiya.ru/issue-2-2024.html>

URL статьи: <https://kostumologiya.ru/PDF/05TLKL224.pdf>

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Абрамов, А. В. Современные тенденции развития функциональных текстильных материалов одежды для занятия спортом и активного отдыха / А. В. Абрамов, К. М. Смолянинов, М. В. Родичева, И. Р. Кадыров // Костюмология. — 2024. — Т. 9. — № 2. — URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/05TLKL224.pdf>

For citation:

Abramov A.V., Smolyaninov K.M., Rodicheva M.V., Kadyrov I.R. Actual trends in the development of functional textile materials for sports and outdoor activities. *Journal of Clothing Science*. 2024;9(2): 05TLKL224. Available at: <https://kostumologiya.ru/PDF/05TLKL224.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 677:687.14

Абрамов Антон Вячеславович

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия
Профессор кафедры «Материаловедения и товарной экспертизы»
Доктор технических наук, доцент
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-1344>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=572662

Смолянинов Кирилл Михайлович

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия
Аспирант кафедры «Материаловедения и товарной экспертизы»
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3557-5299>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1235403

Родичева Маргарита Всеволодовна

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орел, Россия
Заведующая кафедрой
Кандидат технических наук, доцент
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1092-6141>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=421517

Кадыров Ильдар Ринатович

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия
Аспирант кафедры «Материаловедения и товарной экспертизы»
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2556-7148>

**Современные тенденции развития
функциональных текстильных материалов одежды
для занятия спортом и активного отдыха**

Аннотация. Показано, что одним из основных трендов развития одежды для занятия спортом и активного отдыха является внедрение функциональных текстильных материалов. За счет аккумуляции передовых достижений в области нанотехнологии, микроэлектроники, физики, химии такие материалы изменяют величину показателей свойств при колебании погодных условий и изменении физической активности человека. Систематизированы основные задачи, решаемые за счет использования функциональных текстильных материалов:

управление состоянием микроклимата, защита пододежного пространства от проникновения внешней влаги; регулирование тепловых потоков в пакете одежды; измерение биосигналов, обработка и передача полученных данных на внешние устройства.

Установлены основные структурные особенности и направления их развития функциональных текстильных материалов. Показано, что управление потоками влаги в структуре пакета одежды и придания ему выраженных гидрофобных свойств осуществляется за счет использования оригинальных свойств нано размерных покрытий волокон и полотен. Управление процессами передачи тепла достигается за счет: изменения концентрации воздуха в полотнах за счет использования профилированных волокон; химической модификации волокон полимерами с температурой фазового перехода, близкой к температуре кожи; использования металлических нано размерных покрытий. Для регулирования конвективных потоков в структуре пакета одежды разработаны новые виды текстильных материалов с эффектом памяти формы, что позволяет им, при определенных условиях, активировать окошки для движения влажного воздуха.

Возможность передачи электрических и электронных сигналов обеспечивается внедрением в структуру полотен датчиков, микросхем, проводников сигнала.

Предложены классификации и установлены перспективные направления обеспечения новых и улучшенных свойств всех рассмотренных групп текстильных материалов.

Ключевые слова: функциональные текстильные материалы; динамические свойства; гидрофобность; физическая модификация; химическая модификация; тепломассообмен; токопроводящие нити; носимая электроника

Задачи, решаемые функциональными материалами в одежде для занятия спортом и активного отдыха

Спортивная одежда достаточно активно интегрирует передовые научные достижения в области текстильного материаловедения, химии, нанотехнологий и др. Выраженным трендом последних лет является активное внедрение в спортивную одежду функциональных текстильных материалов. Считается, что такие материалы повышают эффективность тренировочного процесса и создают условия для формирования комфортного состояния человека при изменении условий эксплуатации и физической активности [1].

С начала XXI века в развитых странах мира, в том числе, Российской Федерации высокую популярность набирает активный отдых на открытом воздухе: воркаут, туристические походы, квесты и т. д. В результате на мировом рынке сформировался повышенный спрос на спортивную одежду из функциональных текстильных материалов. По прогнозу ряда специалистов его объем вырастет с 40,7 млрд \$ в 2022 году до 64,39 млрд \$ к 2030 году.¹ В процессе конкуренции за долю этого рынка ведущие производители текстильных материалов проводят НИОКР, направленные на:

- разработку новых волокон и текстильных полотен;
- разработку новых технологий отделки текстильных материалов.

Полученные результаты незамедлительно внедряются в передовые изделия ведущих брендов «Nike», «Outlast», «Prevayl» и др.

¹ Sports textiles market report «Global forecast from 2022 to 2030» [Эл. ресурс] // режим доступа: <https://dataintelo.com/report/global-sports-textiles-market/> дата обращения 21.03.2024.

В современных разработках в области функциональных текстильных материалов основной упор делается на обеспечение физиологического комфорта человека за счет поддержания оптимального состояния пододежного микроклимата. За счет этого комплекты спортивной одежды приобретают улучшенные и оригинальные свойства: регулирование теплового потока в пакете одежды при изменении погодных условий и уровня физической активности, своевременно отводят пары влаги и продуктов кожного дыхания в окружающую среду, не пропускают капельную влагу почти без снижения воздухопроницаемости и других свойств.

Известно, что комфортное состояние человека возможно при температурах от +20°C до +24°C [2]. В условиях ниже этого диапазона необходимо использовать комплекты одежды, состоящие более чем из одного слоя, при более высоких температурах — одежду со свойством повышенного теплоотвода от тела человека. Тренировки и иные виды физической активности на открытом воздухе протекают при меняющихся погодных условиях, что выражается в колебании температуры воздуха, интенсивности солнечного излучения, скорости ветра, возможным выпадением осадков.

При повышенных физических нагрузках в организме человека вырабатывается от 700 Вт до 1 000 Вт тепловой энергии [3]. Такое существенное повышение теплопродукции вызывает рост температуры тела на 1,5–2°C при использовании спортивной одежды из традиционных материалов. Наблюдаемая при этом интенсификация потоотделения способствует насыщению пакета одежды влагой [4].

Качественная спортивная одежда должна обеспечивать теплоотвод от тела человека на уровне, соответствующем интенсивности ее выработки в организме человека, способствовать выведению этой влаги в окружающую среду без ее накопления в слоях.

В ряде случаев, например, при подготовке к ответственным соревнованиям, или при длительных туристических подходах, влажно контролировать динамику состояния человека. Для этого в комплекте одежды необходимо обеспечить функцию измерения показателей физиологических показателей и обеспечивать передачу этих данных внешним устройствам.

Для решения этих задач разрабатываются функциональные материалы с улучшенными или принципиально новыми свойствами. Также проводится поиск путей их рационального использования при проектировании одежды для занятия спортом и активного отдыха. В этих условиях актуальной является задача обобщения накопленных данных. В последнее время опубликованы обзорные статьи по этой тематике. В большинстве из них систематизация проводится с учетом естественной иерархии текстильных материалов — начиная от волокно и далее до уровня полотна. В то же время, при разработке комплектов одежды для занятия спортом и активного отдыха необходимо понимать физические процессы в системе «человек — одежда — среда».

Таким образом целью настоящей статьи является обзор и систематизация функциональных текстильных материалов по принципу организации их новых и улучшенных свойств.

Функциональные материалы с улучшенными свойствами гидрофобности

Влага в капельном виде (осадки, туман) является одним из основных негативных факторов окружающей среды в условиях занятия спортом на открытом воздухе и туристических походов. Традиционные текстильные материалы, особенно из натуральных волокон, активно поглощают влагу в парообразной и капельной фазах, что вызывает: повышение веса одежды и ухудшение ее удобства, снижение теплоизоляционных показателей.

Современная одежда для этих условий должна обеспечивать надежную защиту пододежного пространства от проникновения жидкой влаги при выпадении осадков.

Первый известный подход к созданию гидрофобных текстильных материалов связан с нанесением на них искусственных покрытий [5]. В дальнейшем и до конца XX века технологии создания гидрофобизирующих покрытий активно развивались, что позволил создать широкую линейку материалов. Их физическим пределом считаются ткани с мембранным покрытием. Такие материалы обладают свойством избирательной проницаемости, при котором мембрана пропускает газовую фазу (пары пота), но является непреодолимым препятствием для капельной влаги [6].

В то же время известно, что направление процесса переноса пара через мембрану определяется разностью концентрации паров воды по обеим сторонам материала. По этой причине в условиях повышенной влажности окружающего воздуха, например при длительном морозящем дожде или в тумане, мембранные материалы способствуют насыщению пододежного пространства парами влаги. М. Гок (M. Gök) разработал технологию производства материалов с адаптивной мембраной. Стенки ее пор образованы нано-сферами, которые набухают при повышенной влажности окружающего воздуха и перекрывают каналы для движения пара [7]. При снижении влажности окружающей среды поры вновь открываются и процесс вывода пара из пододежного пространства возобновляется. Не смотря на такие решения, материалы с мембранным покрытием уже не рассматриваются в качестве передовых решений при организации процесса выведения паров воды из пододежного пространства. Во многом это связано с их низкой воздухопроницаемостью, что снижает эргономичность одежды [8].

Новые подходы к обеспечению повышенных гидрофобных свойств текстильных материалов получили активное развитие после пересмотра теоретических представлений о процессах, протекающих на поверхностях раздела фаз «газ — твердое тело» и «твердое тело — жидкость» и роли нано размерных выступов на их поверхности [9; 10]. Обобщая эти и аналогичные исследования авторами разработаны следующие схемы гидрофильной (рис. 1 а) и гидрофобной (рис. 1 б) поверхностей.

Если расстояние между выступами превышает два диаметра нано размерной частицы ($2D$), давление капли вытесняет зажатый воздух, капля вступает в контакт с основной поверхностью материала и растекается по ней. Поверхность материала в этом случае является гидрофильной.

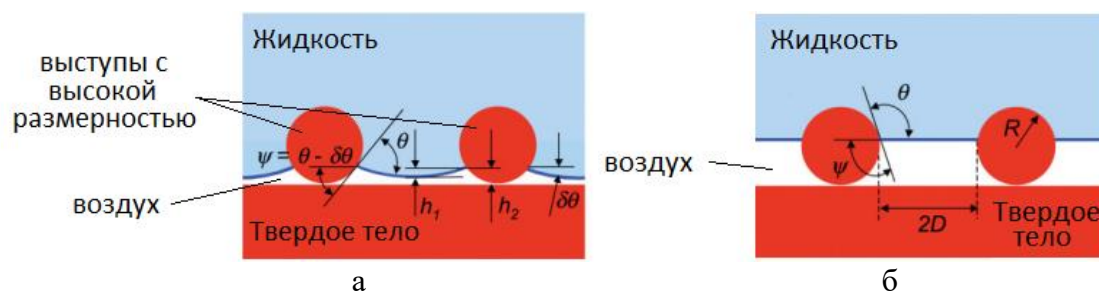


Рисунок 1. Поведение жидкости на нано размерных выступах на поверхности материала: а — на смачиваемой поверхности; б — на не смачиваемой поверхности (разработано авторами)

Если расстояния между нано размерными частицами меньше их удвоенного диаметра ($2D$), давления капли недостаточно для вытеснения воздуха. Таким образом, при создании на поверхности текстильного материала нано размерного покрытия с определенными параметрами, воздушная пленка между каплями и поверхностью материала не разрушается и не позволяет жидкости войти в контакт с поверхностью материала.

Повышенная гидрофобность поверхности за счет нано размерных покрытий впервые была обнаружена у листьев лотоса. По этой причине текстильные материалы с поверхностью структурированной на нано размерном уровне получили название «lotus effect textile» [11].

К настоящему моменту предложены многочисленные технологии придания текстильным материалам гидрофобных свойств за счет нано размерных покрытий. При использовании метода плазменной печати фтор содержащими полимерами поверхность волокон приобретает зернистую структуру.

На рисунке 2, а приведены микрофотографии поверхности волокна с нано размерным покрытием, полученные С. Брюером (S. Brewer) с применением авторской технологии [12].

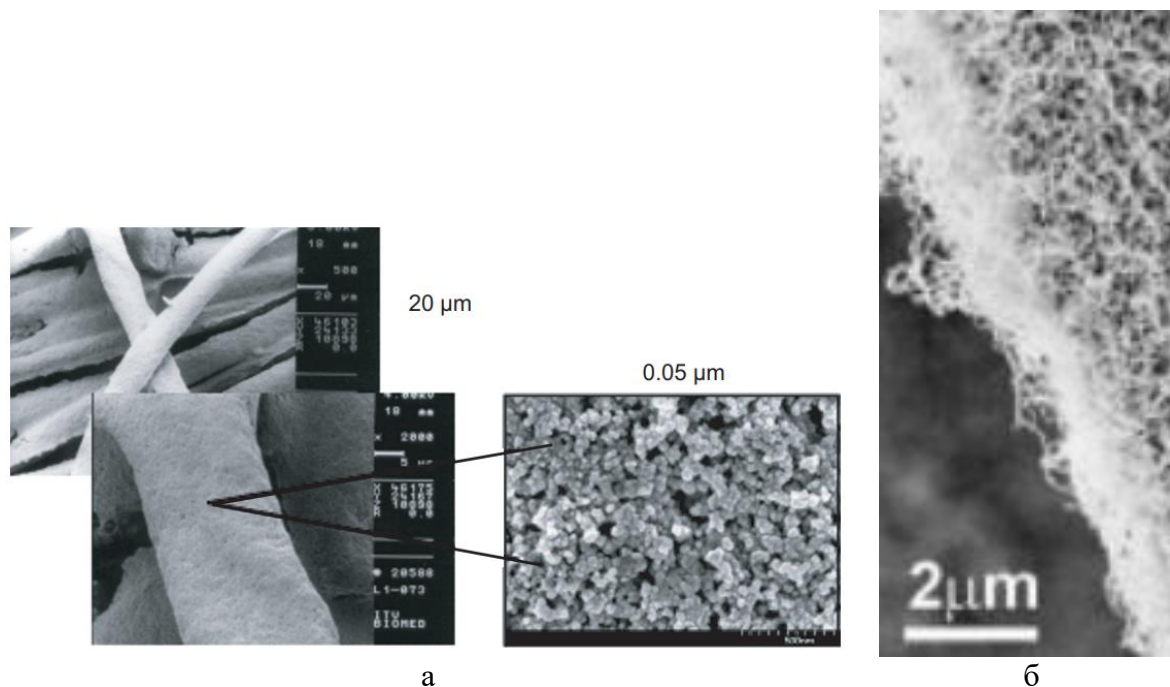


Рисунок 2. Гидрофобизирующие покрытия волокон на нано размерном уровне: а — по технологии С. Брюера [12]; б — по технологии Дж. Циммермана [14]

Однако для получения покрытий требуемого качества в рамках метода необходимо обеспечить стабильность множества параметров, что снижает коммерческую целесообразность метода.

Для обеспечения коммерчески применимой технологии в настоящее время проводятся исследования, направленные на снижение количества контролируемых параметров. В числе наиболее успешных — метод нанесения на поверхность текстильных волокон нано размерных частиц фтордецила, предложенная В. Чоем (W. Choi) [13].

В его исследовании отмечается существенное удешевление процесса формирования покрытия и масштабируемость процесса. Дж. Циммерманном (J. Zimmermann) предложена более простая технология формирования гидрофобизирующих нано размерных покрытий на поверхности волокон в виде трубчатых структур (рис. 2 б) [14]. По заверениям автором в настоящее время она находится на стадии внедрения в коммерческое использование у ведущих производителей спортивной одежды.

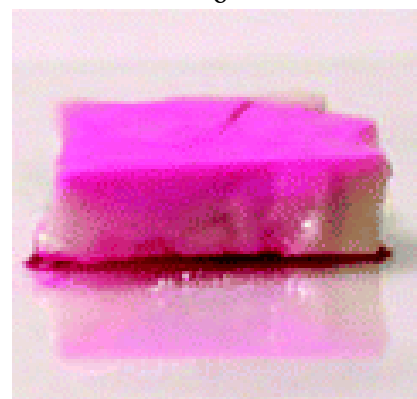
Применение волокон с нано размерными гидрофобизирующими покрытиями позволяет получать совершенно не смачиваемые текстильные материалы. Капли влаги на их поверхностях приобретают форму идеального шара (рис. 3 а).



а



б



в

Рисунок 3. Смачиваемость материалов, структурированных на нано уровне строения: а — поведение капли на текстильном материале из волокон с нано размерным покрытием по технологии Дж. Циммермана [14]; б, в — материал со свойством динамического смачивания по технологии Н. Шортклиффа [15]

В последнее время активизировались работы по разработке материалов с динамической смачиваемостью. В определённом диапазоне температур поверхность таких материалов является гидрофобной, в результате жидкость находится на поверхности этих материалов в виде идеального шара (рис. 3 б). При изменении температуры такие материалы становятся смачиваемыми и мгновенно поглощают всю контактирующую с ними жидкость (рис. 3 в) [15]. Технология получения покрытий с динамической смачиваемостью реализована на модельном капиллярно-пористом теле. В настоящий момент авторы проводят работы по ее адаптации к обработке других тел, в том числе — текстильных материалов.

Функциональные материалы для управления тепловыми потоками в одежде

Управление тепловыми потоками в пакете одежды основано на использовании оригинального сочетания свойств воздуха. Известно, что иммобилизованный воздух является наилучшим утеплителем. Если в его объемах возникают течение, теплопередача значительно интенсифицируется.

Большинство текстильных материалов в сухом состоянии содержат вещество в двух фазах: твердой (основной объем текстильных волокон) и газообразной (воздух между волокнами, нитями, внутри некоторых волокон). В гигроскопическом состоянии этот воздух может содержать пары воды. Во влажном состоянии в текстильном материале появляется третья фаза — жидкая вода. Процессы взаимодействия текстильных материалов с химическими веществами в нашем обзоре не рассматриваются.

В комплектах одежды из традиционных материалов изменение объема иммобилизованного воздуха достигается изменением слойности, а управление степенью его иммобилизации обеспечивается конструктивными приемами. Традиционная одежда для занятия спортом и активного отдыха на открытой территории содержит съемные утепляющие прокладки и вентиляционные вставки на участках с наиболее интенсивным потоотделением тела человека.

Такой подход имеет многочисленные недостатки, которые снижают эффективность их применения [16]:

- вентиляционные вставки не оказывают существенного влияния на тепломассообмен в одежде при высоких физических нагрузках;
- толщина пакета одежды, превышающая 30 мм ограничивает свободу движений, а ее дальнейшее увеличение незначительно повышает теплоизоляцию комплекта.

Применение функциональных текстильных материалов для изготовления спортивной одежды для условий пониженных температур обеспечивает динамическую теплоизоляцию комплекта без существенного увеличения его толщины.

Повышенная теплоизоляция одежды обеспечивается применением функциональных материалов из физически модифицированных волокон. Известны технологии получения: профилированных и полых волокон, волокон сверхмалой толщины, методы химической модификация текстильных волокон для придания им возможность поглощения и выделения тепла.

Введение в структуру функционального материала ультратонких волокон позволяет увеличить содержание иммобилизованного воздуха в полотне. Одним из наиболее известных материалов, разработанных на основе этой технологии являются объемные утеплители торговой марки «Thinsulate». В их структуре содержатся волокна диаметром 400 нм. В числе последних разработок можно отметить технологию А. Юаня (A. Yang), которая позволяет получать химические волокна диаметром от 1 до 100 нм [17]. Механические свойства текстильных полотен на их основе сопоставимы с традиционными, что позволяет использовать их при производстве одежды для занятия спортом и активного отдыха.

Традиционные химические волокна имеют близкое к круглому сечение, из-за чего они плотно размещаются в структуре нитей и нетканых полотен (например, объемных утеплителей). Это не позволяет иммобилизовать в их структуре существенные воздушные объемы. Профилированные химические волокна размещаются в нетканом полотне менее плотно, что позволяет увеличить объём, занятый воздухом. С. Лин (C. Lin) исследовал характер взаимного расположения в объемном нетканом утеплителе волокон различного поперечного сечения (рис. 4 а–г) [18]. В результате исследования было установлено, что максимальный объем иммобилизованного воздуха в нетканом полотне наблюдается при использовании волокон крестообразного сечения.

Технология производства полых волокон разработана достаточно давно, а сами волокна активно используются при производстве объемных нетканых утеплителей. Например, известны полотна торговой марки «Hollowfiber».

Однако потенциал использования полых волокон при производстве объемных нетканых утеплителей не исчерпан. Ю. Куи (Y. Cui) в 2018 году предложил технологию производства волокна с четырьмя изолированными каналами (рис. 4 д) [19].

Подобная форма сечения характерна для волокон шерсти белого медведя, которая обладает наилучшими теплозащитными свойствами из всех видов шерстяных волокон.

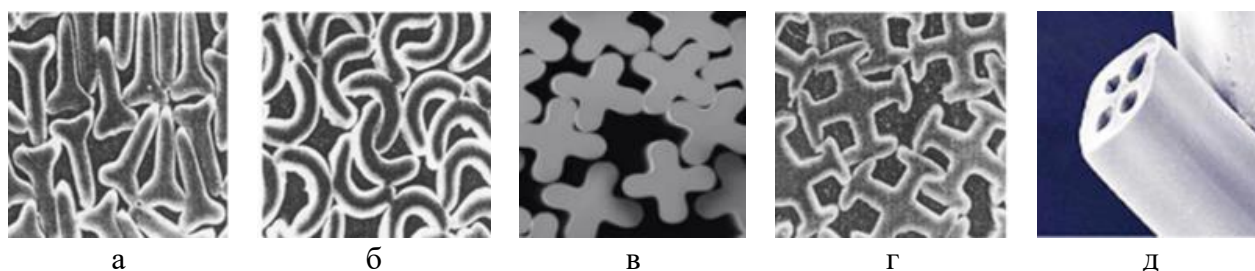


Рисунок 4. Сечения профилированных волокон по данным С. Лина и Ю. Куи:

а–г — профилированные волокна в структуре объемно нетканого полотна, соответственно: трехгранной формы, изогнутой формы; крестообразной формы; формы модифицированного креста; д — полое волокно с четырьмя каналами [18; 19]

Известен широкий класс функциональных текстильных материалов, которые способны поглощать и выделять тепло без изменения своей температуры. Эти материалы активно используются при производстве спортивной одежды для эксплуатации в условиях меняющихся погодных условий и динамической физической нагрузки человека.

Такие функциональные материалы используют эффект фазовых переходов полимеров из жидкого в аморфное состояние. Известны некоторые группы полимеров, температура фазового перехода которых близка к температуре тела человека (табл. 1).

Таблица 1

**Полимеры с температурой фазового перехода,
подходящей для производства РСМ — материалов**

Наименование полимера	Температура перехода в жидкую фазу, °С	Температура перехода в аморфную фазу, °С	Тепло, выделяемое (поглощаемое) при фазовом переходе, Дж/г
Эйкозан	36,1	30,6	247
Нонадекан	32,1	26,4	222
Октадекан	28,2	25,4	244
Гептадекан	22,5	21,5	213
Гексадекан	18,5	16,2	237

По данным М. Мякинена (M. Mäkinen) [20]

Предложены различные технологии интегрирования этих полимеров в структуру химических волокон. Наиболее проработанная технология химической модификации волокон полимерами из таблицы 1 связана с подачей в камеру экструдирования газового потока, насыщенного микросферами полимера. Под действием кинетической энергии воздушного потока микросферы проникают в структуру еще не застывшего филамента, насыщая волокно (рис. 5 а)² [21].

В рамках второго подхода полые химические волокна заполняются полимером с требуемой температурой фазового перехода, в результате чего оно принимает вид, приведенный на рис. 5 б) [22].

При повышении температуры кожи полимеры в структуре волокна переходят в жидкое состояние, поглощая теплоту в количестве, указанном в таблице 1. При снижении температуры кожи переходят из жидкого в аморфное состояние, выделяя накопленное ранее тепло.

За счет этой особенности ткани и трикотажные полотна из химически модифицированных волокон получили общее наименование «phase change materials» (PCM).

² Not too hot, not too cold ... Just right smart textile [Эл. ресурс] // режим доступа: <https://liongtex.com/products/thermo-technology/outlast>. Дата обращения: 8.04.2024.

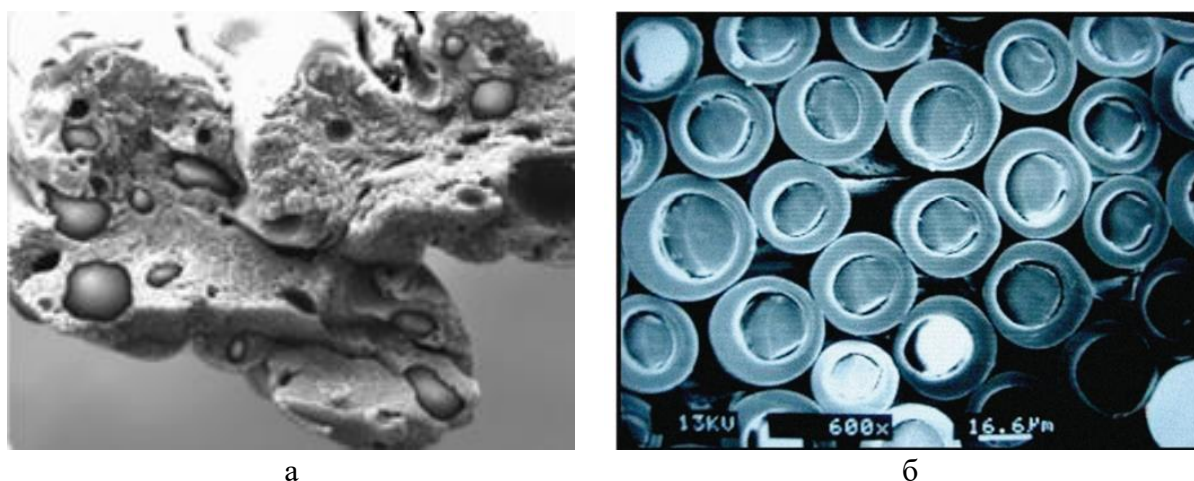


Рисунок 5. Химически модифицированные волокна для РСМ материалов: а — волокна торговой марки Outlast (по данным производителя) [21]; б — полое волокна, заполненного полимером (по данным В. Капсали (V. Kapsali) [22])

В процессе эксплуатации материалы, основанные на эффекте фазового перехода, работают следующим образом: при повышении температуры кожи вследствие увеличивающейся физической активности человека или изменения климатических условий, частицы полимера в волокне переходят в жидкое состояние, поглощая тепло. При этом резко повышается теплоотдачи от тела человека, способствуя его охлаждению. При снижении физической активности человека, или повышении интенсивности охлаждающего воздействия окружающей среды, температура кожи человека и пакета одежды снижается. Полимер в структуре волокна переходит в аморфную фазу, выделяя накопленное ранее тепло.

При достаточно высокой эффективности в моменте эти материалы способны накопить незначительное количество тепла, что не позволяет использовать это новое свойство на длительных временных промежутках.

В условиях повышенных температур необходимо напротив повышать теплоотвод от тела человека. Для решения этой задачи предложены различные решения на уровнях текстильных волокон и полотен в целом.

Традиционные методы производства химических волокон не обеспечивают высокую степень ориентации полимеров, в результате чего в объеме волокна содержатся значительные воздушные объемы. Ю. Куи (Y. Cui) разработана технология упорядочивания химических волокон за счет вытягивания сразу после продавливания в отверстия фильер и непосредственно перед застыванием [19].

В исследовании предложены оптимальные температурные режимы и величина прикладываемого усилия для получения волокон с требуемой ориентации макромолекул полимеров, которые способствуют вытеснения из волокна воздуха. На рисунке б представлен микрофотографии среза волокна в зависимости от температуры исходного раствора.

Согласно результатам исследований, такой подход позволяет обеспечить повышенную теплопроводность химических волокон.

Одним из важных механизмов регулирования теплоотдачи человека при повышенных температурах является конвекция. Интенсификация воздушных потоков вокруг тела человека создает условия для дополнительного отведения тепла. Традиционно управление конвективными потоками в одежде реализовывалось за счет изменения плотности ткани (количество нитей на единицу длины (ширины) полотна). Изменение воздухопроницаемости материала вызывает изменение конвективных потоков в пакете одежды.

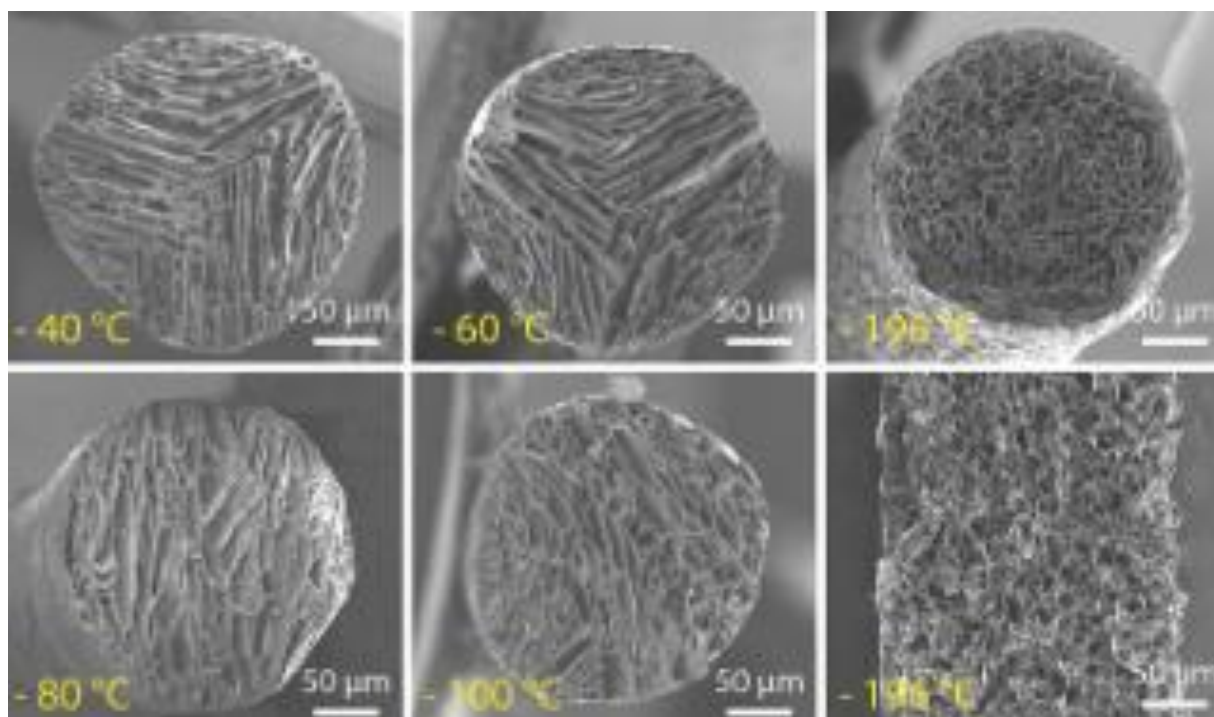


Рисунок 6. Химические волокна с высоко ориентированной структурой, полученные Ю. Куи при различных температурных режимах и величинах прикладываемого усилия [19]

Зависимости между плотностью ткани и воздухопроницаемостью хорошо известны почти для всех видов текстильных материалов. В научной литературе прописаны рекомендации к воздухопроницаемости слоев и пакетов одежды различного назначения. Считается, что при использовании этих рекомендации обеспечивается эффективное управление конвективными потоками в пакете одежды. В то же время, он имеет несколько недостатков:

1. Влияние количество нитей на воздушные потоки в полотне фиксируется в условиях ветра. В спокойную погоду, при естественно-конвективном теплообмене между телом человека и пододежным пространством, изменение частоты расположения нитей почти не влияет на воздушные потоки в структуре материала.
2. Интенсивность прохождения конвективных потоков через структуру полотна невозможно регулировать в процессе эксплуатации одежды.



Рисунок 7. Принцип действия текстильных материалов со свойством регулирования конвективных потоков [23]

Вследствие этих недостатков продолжают работы в области создания функциональных текстильных материалов со свойством динамического регулирования конвективных потоков. В результате этих исследований Ю. Жонгом (Y. Zhong) предложен метод управления за счет материалов с эффектом памяти формы (рис. 7) [23].

В структуре этих материалов с трех сторон прорезаются клапаны для движения влажного воздуха. Если параметры пододежного микроклимата сохраняют оптимальные значения, форма клапанов повторяет форму основного материала.

При повышении влагосодержания воздуха, материал поглощает влагу, что формирует изгибающие напряжения на уровне полимерной структуры. Основной объем материала закреплен в изделии и не деформируется. Свободный объем клапана изгибается в сторону более сухого воздуха, открывая окошки, через которые влажный воздух выходит из пододежного пространства. По мере снижения влажности под одеждой клапаны возвращают исходную форму.

На базе этого принципа разработана широкая линейка функциональных материалов со свойством управления конвективными потоками. Максимальное распространение в производстве спортивной одежды получил материал торговой марки «Sphere React Dry» [24]. Однако такие изделия имеют очень высокую стоимость, что существенно ограничивает его использование. Ю Жонг разработал усовершенствованную технологию производства таких материалов, которая позволила существенно удешевить процесс производства. В настоящий момент на ее основе производится материал торговой марки «Nafion».

Текстильные материалы с интегрированными электронными компонентами

Идея о возможности совмещения текстиля и электроники высказана еще Х. Ширикавой (H. Shirakawa), который разработал технологию производства токопроводящих полимеров [25]. На ее основе Г. Патон (G. Paton) получен патент на использование этой технологии при производстве текстильных материалов.³ Чуть позже Г. Миллером (Miller G.) запатентован принцип интегрирования в одежду проводников тока и полупроводниковых компонентов.⁴

К настоящему моменту предложены многочисленные образцы текстильных материалов, в нити и полотна которых интегрированы датчики, проводники, микрочипы и др. С их помощью решаются различные измерительные задачи: мониторинг биосигналов (частота пульса; мышечная активность), контроль движений тела человека (преодоленное расстояние, скорость, характер совершаемых движений), оценка параметров пододежного пространства и окружающей среды, информационный обмен с внешними устройствами. Интеграция электронных компонентов в текстильные материалы производится на уровне нитей и текстильных полотен. Нити с интегрированными электронными компонентами, как правило, позволяют передавать сигналы от датчиков к микросхемам или WiFi модулям. Известные многочисленные нити, скрученные с проводниками электрических и электронных сигналов. Проводники могут вплетаться в нить на этапе прядения (рис. 8 а) [26]. Также разрабатываются технологии совмещения проводников с уже готовыми нитями (рис. 8 б) [27]. Проводники в структуре этой ткани не изолированы, что создает условия для выхода измерительной системы из строя при воздействии на нее влаги. Также очевидно, что при движении человека возможно взаимное замыкание этих проводников, что в свою очередь, приведет к потере информации.

³ U.S. Patent No 4,045,949, Integral, electrically-conductive textile filament. Appl. filed 1976.04, publ. 1977.09 / G. Paton, M. Sterling, J. Sanders. — 8 p.

⁴ U.S. Patent No 4,164,008 Illuminated article of clothing. Appl. filed 1977.02, publ. 1979.08 / G. Miller, M. Dalke. — 8 p.

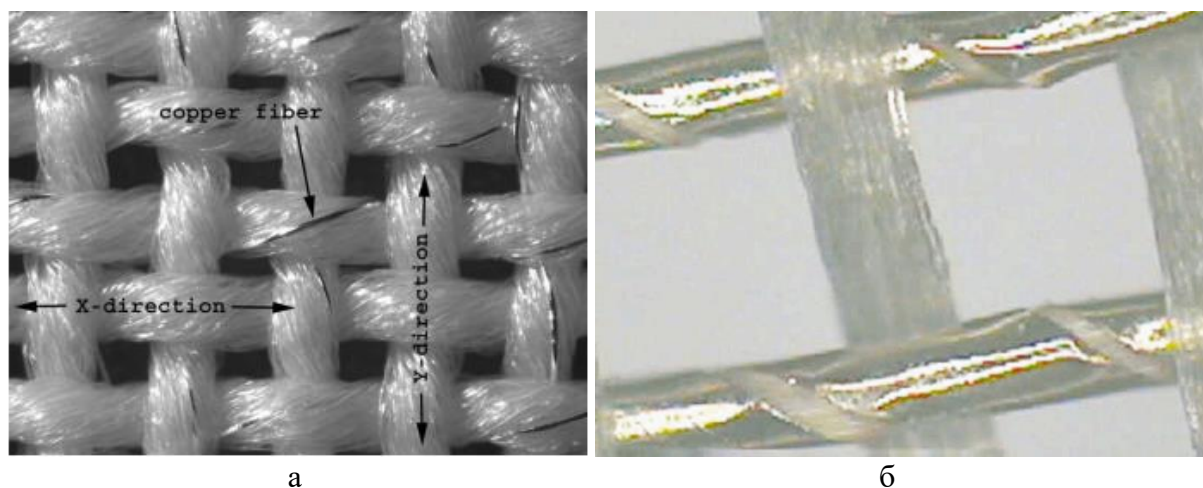


Рисунок 8. Нити с интегрированными проводниками сигнала: а — ткань, разработанная Д. Коттеом (D. Cottet) [26]; б — ткань, разработанная М. Постом (M. Post)

Разработки по защите проводников от воздействия влаги реализуются путем использования армированных нитей [27]. Сердечник нити представлен пучком проводников, которые изолированы обмоткой из гидрофобных монослоев (рис. 9 а) [28]. В рамках этой технологии созданы образцы бельевых изделий (футболки) с функцией контроля потоотделения.

Для этого в конструкцию одежды интегрированы датчики пота, а ряд нитей в структуре трикотажного полотна представлен рассмотренными образцами. Измерительная система сопряжена с программным обеспечением на внешних устройствах (например, смартфоне). При насыщении изделия потом выше установленного предела, программное обеспечение подает соответствующие сигналы.

В последнее время нити с интегрированным защищенным проводником активно используются для нанесения на текстильные материалы и готовые швейные изделия узоров, соответствующих логике передачи и преобразования сигнала (рис. 9 б, в) [27; 29]. Такие изделия позволяют решить многочисленные задачи получения данных и проведения сигналов.

В последние годы активно развивается технология напыления nano размерных частиц металла на готовые текстильные полотна, что позволяет получать проводники сигнала с различной логикой передачи и обработки информации (рис. 9 г) [30]. Однако у последнего решения может быть отмечен тот же недостаток, что и у крученых нитей с интегрированными проводниками сигналов — отсутствие защиты от воздействия влаги.

Одно из ключевых условий использования электронных элементов, интегрированных в одежду и текстильные материалы, заключается в обработке сигналов, передаваемых в структуре комплекта. Для реализации этой задачи в одежде активно развиваются технологии совмещения текстильных материалов с логическими микросхемами.

Все технологии решения этой задачи, которые были предложены в последние годы можно разделить на два класса.

В рамках решений первого класса микросхемы напаиваются на интегрированные в полотна проводники. При этом логическая подложка припаивается к интегрированным в текстильный материал контактам (1 фаза производства на рис. 10 а) [31]. Далее на ней располагается кристалл с вычислительными элементами (2 фаза производства). Полученная структура изолируется компаундом для защиты от влаги и механических воздействий (3 фаза производства).

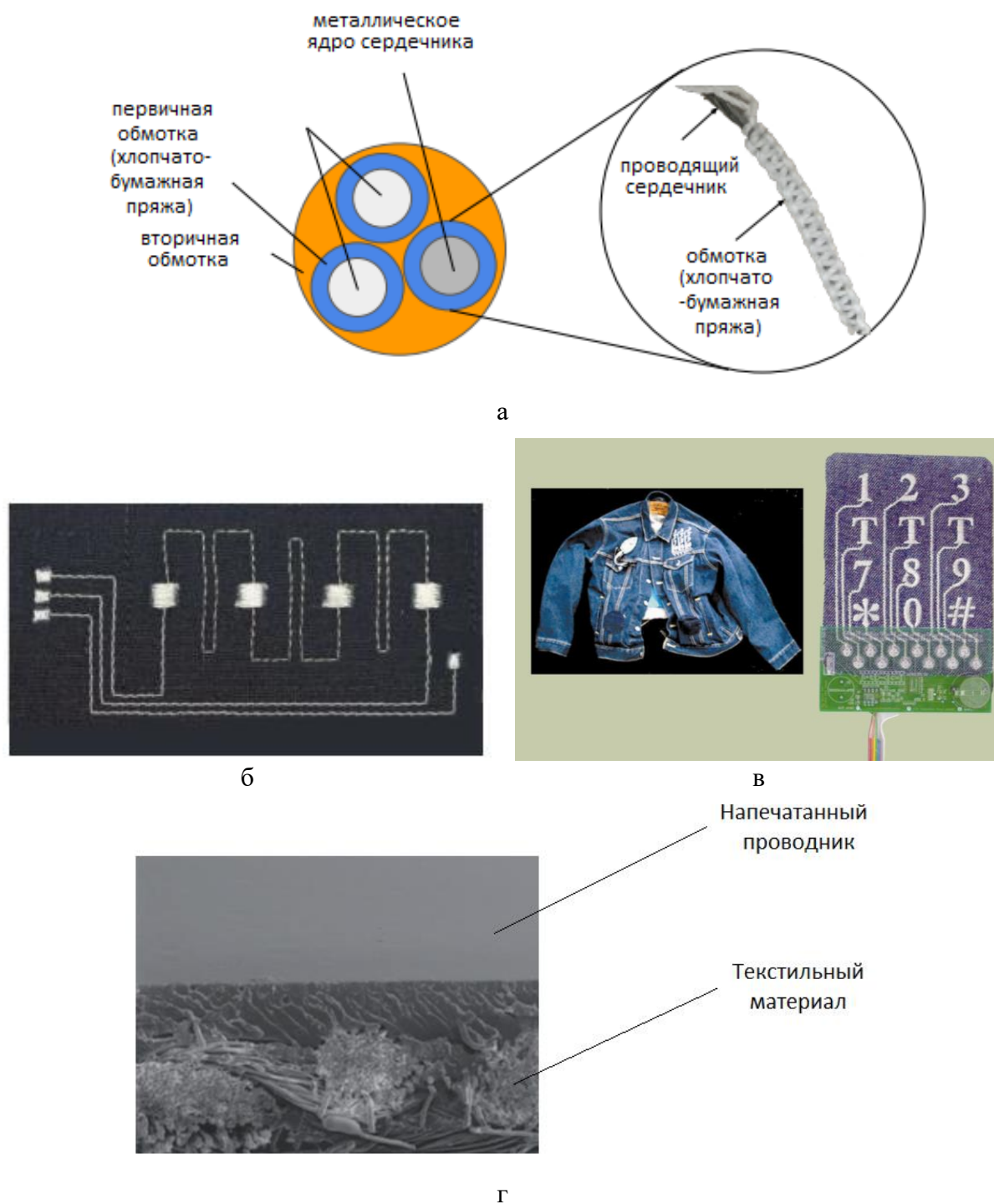


Рисунок 9. Схема токопроводящих нитей и изделий: а — армированная нить конструкции Д. Джиа (J. Jia) [28]; б — логическая схема передачи сигнала, полученная методом вышивки (по данным Д. Роха [29]) в — изделие с вышитыми электронными компонентами, разработанное Е. Постом (E. Post) [27]; г — ткань с напечатанным проводником по технологии К. Юаня (K. Yang) [30]

На основе этой технологии разработаны многочисленные виды текстильных материалов. Например, на рисунке 10 б приведен образец экспериментального материала с интегрированной микросхемой, предложенный С. Лаутербахом [32].

Эта технология была усовершенствована Ю. Кимом (Kim Y.). В новой интерпретации (рис. 10 в) напечатанные на текстильном материале проводники изолируются друг от друга эпоксидной подложкой, защищающей схему от влаги [33]. Сверху на нее накладывается чип и заливается эпоксидной смолой (рис. 10 г).

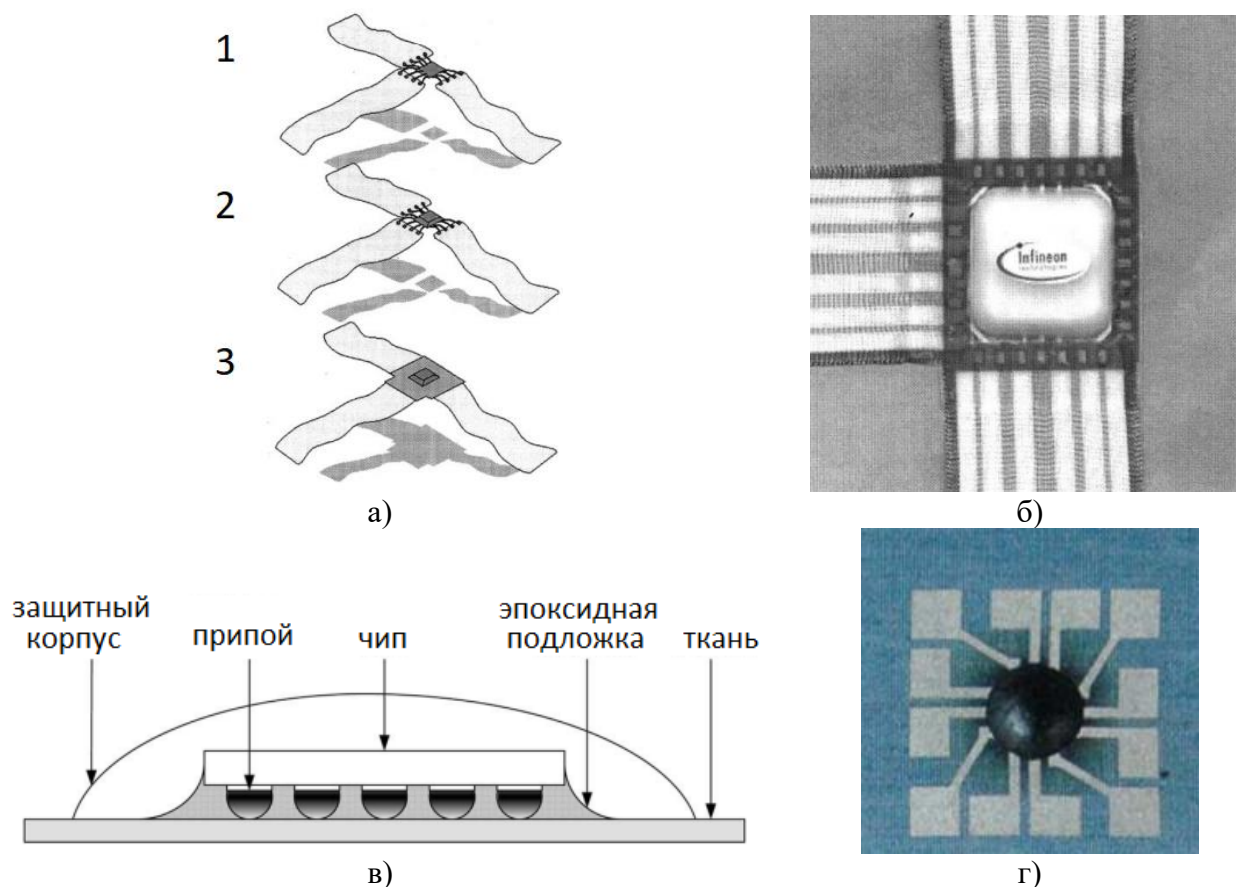


Рисунок 10. Текстильные материалы с логическими микросхемами: а — обобщенная технология совмещения микросхем со структурой материала; б — внешний вид материала с микросхемой (по данным Д. Маркулеску (Marculescu D.) [31]); в — общая схема интеграции логических микросхем с текстильным материалом по технологии Ю. Кима; г — внешний вид материала с микросхемой (из работы [33])

Технологии второго класса связаны с интегрированием в структуру текстильного материала готовых SCADA-систем. Для этого подложки с электронными компонентами (сенсоры, проводники, логические микросхемы) изготавливаются отдельно, а после вплетаются в структуру текстильного полотна на этапе его производства. Например, на рисунке 11, а приведена ткань с интегрированной SCADA-системой, которая позволяет измерять параметры микроклимата пододежного пространства [34; 35].

Технология производства разработанная У. Бударом (U. Buder), позволяет получать гибкие подложки, которые не оказывают существенного влияния на механические свойства материала [35]. Однако в их структуру входят слои текстолита, что создает некоторый дискомфорт в использовании одежды с такими элементами.

Более совершенная технология получения интегрируемых подложек разработана фирмой Samsung (рис. 11 б) и уже внедрена в концептуальный проект трикотажного изделия «E-TeCS» (рис. 11 в) [36].

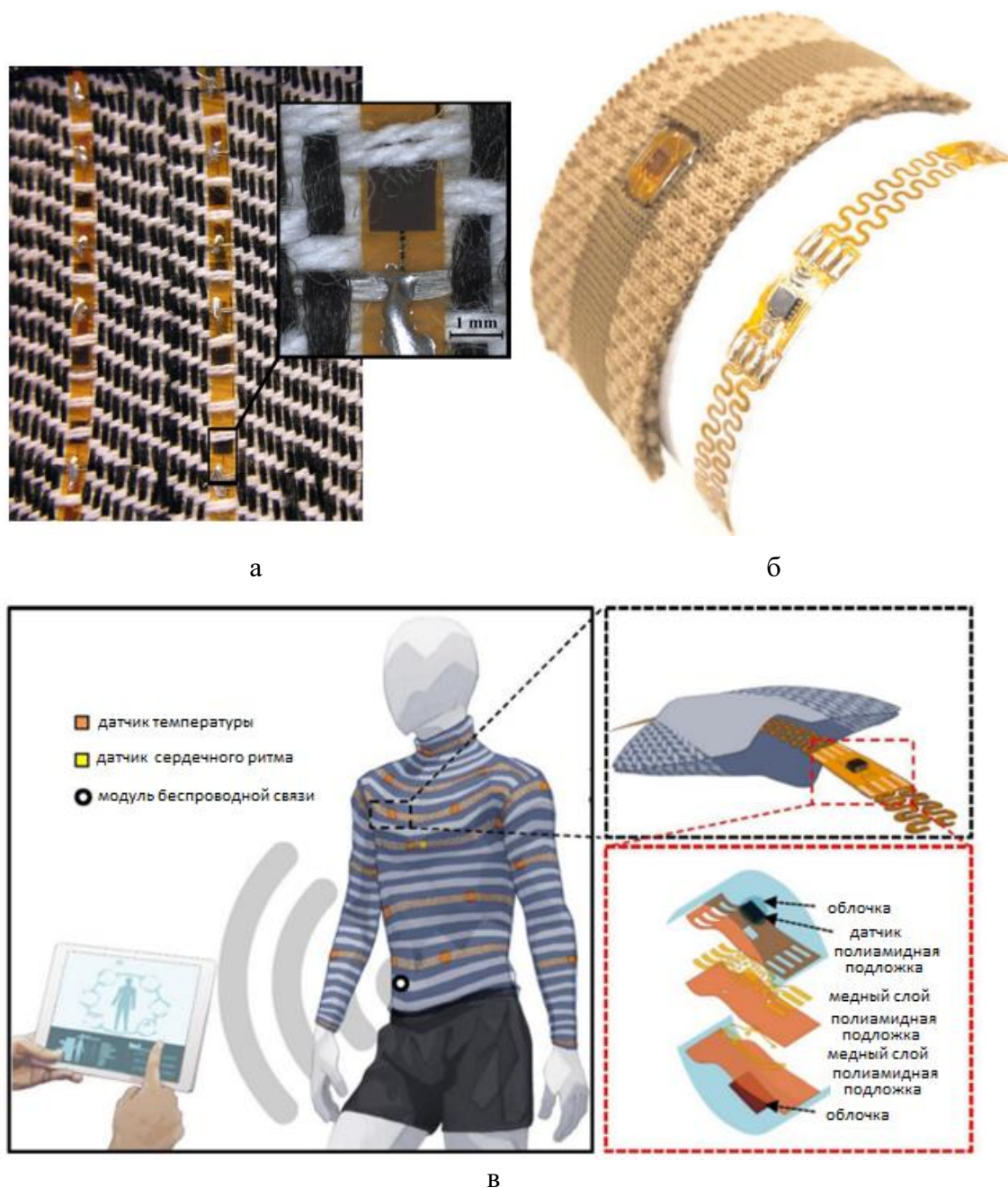
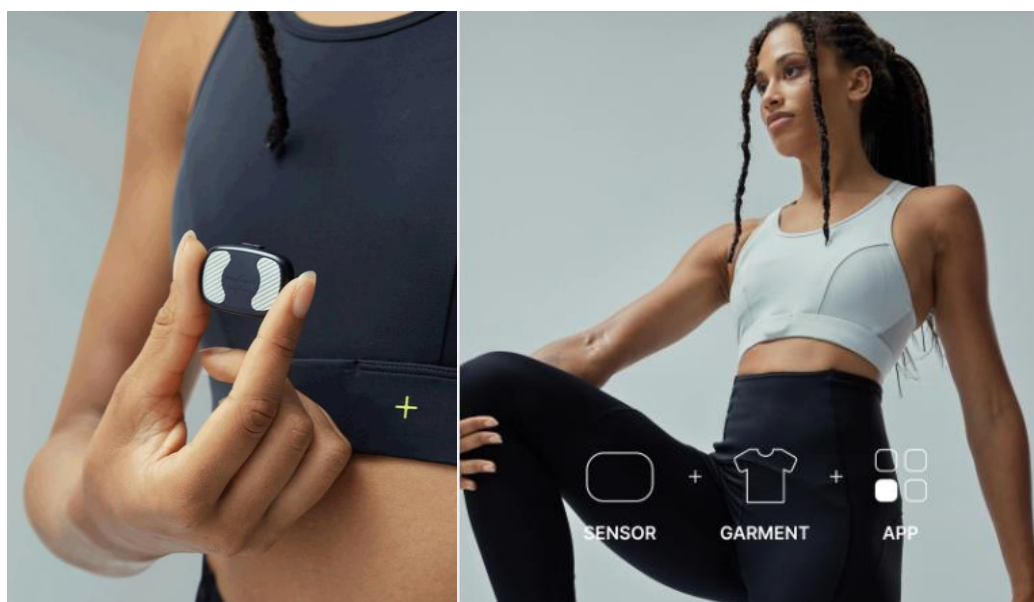


Рисунок 11. Текстильные материалы с интегрированными подложками носимой электроники: а — ткань с подложкой по технологии У. Будера [35]; б — трикотажный материал с гибкой подложкой, разработанный фирмой Samsung [36]

По данным Л. Рума (Rum L.), по мере совершенствования этих решения все активно интегрируются в одежду и, в первую очередь — комплекты для профессиональных спортсменов и продвинутых любителей [37]. Уже сегодня эти решения позволяют объединить усилия тренеров по различным спецификациям, спортивных врачей, психологов, физиологов при подготовке спортсменов к соревнованиям высокого уровня [38].

Одежда с интегрированными элементами носимой электроники уже сегодня доступна на рынке и активно используется продвинутыми пользователями для активного отдыха и занятия спортом на открытом воздухе. На рисунке 12 приведены изделия линейки одежды «Prevayl».



а

б

Рисунок 12. Образцы одежды торговой марки Prevayl с интегрированными электронными компонентами: а — устройство сбора данных; б — спортивный топ для использования на открытом воздухе (рисунки взяты с сайта производителя⁵)

В структуре этого и аналогичных комплектов одежды реализована функция контроля за комплексом физиологических показателей, включая: температуру кожи, кровяное давление, частоту пульса, частоту дыхания. Результаты измерений передаются на внешние устройства.

Заключение и выводы

Из приведенного обзора можно заключить, что функциональные текстильные материалы все активнее используются при производстве одежды для занятия спортом и активного отдыха. За счет использования передовых достижений в области нанотехнологий, химии, микроэлектроники они обладают новыми и улучшенными свойствами, не характерными для традиционных текстильных материалов.

В ближайшие годы можно ожидать дальнейшего повышения качества одежды для занятия спортом и активного отдыха за счет внедрения все новых видов функциональных текстильных материалов. Ведущие специалисты ожидают появления в ближайшие годы тканей с интегрированными нейроморфными процессами с элементами искусственного интеллекта. Это позволит совместить измерительные элементы с исполнительными устройствами, например, системами нагрева.

Вместе с тем необходимо отметить существенный недостаток научных публикаций с описанием функциональных материалов. В рассмотренных статьях основное внимание уделяется описанию структуры материалов и вновь формируемым свойствам. В то же время, публикации почти не содержат данных о значениях показателей свойств, что не позволяет проводить прогностические расчеты спортивной одежды.

⁵ Women's SmartWear™ Training Packs [Эл. ресурс]. Режим доступа: <https://shop.prevayl.com/collection/womens-smartwear-training-packs>. дата обращения: 08.04.2024.

По нашему мнению, это связано с отсутствием адекватных методов оценки. Как следует из приведенных данных, свойства функциональных материалов нельзя рассматривать в виде констант, как это происходит при анализе традиционных текстильных материалов. Они являются сложными функциями от комплекса эксплуатационных факторов и физиологических показателей состояния человека.

Таким образом в ближайшем будущем можно ожидать активного развития методов оценки свойств функциональных материалов с использованием численного моделирования. Это, в свою очередь, позволит не только полнее реализовывать особенности функциональных текстильных материалов в одежде для занятия спортом и активного отдыха, но и расширит пути их использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kothari, V. Fibres and fabrics for active sportswear // Asian Textile Journal. — 2003. — Vol. 12. — pp. 55–61.
2. Человек в условиях холода. Физиологические и патологические явления, возникающие при действии низких температур. / А. Бартон О. Эдхолм // Москва: Иностранная литература, 1957 г. — 336 с.
3. Recent developments in materials and manufacturing techniques used for sports textiles / F. Ahmad, K. Akhtar, W. Anam, B. Mushtaq, A. Rasheed, S. Ahmad, F. Azam, Y. Nawab // International Journal of Polymer Science. 2023. — Vol. 2023. 20 p. <https://doi.org/10.1155/2023/2021622>.
4. Brotherhood, J. Sports textile // Journal of Science and Medicine in Sport. — Vol. 11(6). — 2007. — pp. 50–60.
5. Singha, K. A Review on Coating & Lamination in Textiles: Processes and Applications // American Journal of Polymer Science. — 2012. — Vol. 2(3). — pp. 39–49. — <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20120203.04>.
6. Gibson, P.W. Transport Properties of Porous Membranes Based on Electrospun Nanofibers // Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects. — 2001. — Vol. 5 — pp. 187–188.
7. Shape-Memory Applications in Textile Design / M. Gök, M. Bilir, B. Gürcüm // Procedia — Social and Behavioral Sciences. — 2015. — Vol. 195. — pp. 2160–2169.
8. Analysis of air permeability for a waterproof breathable fabric / G. Moussa, B. Marzoug, C. Campagne, M. Rochery, F. Sakli // International Conference of applied research on textile (CIRAT-7). — 2016. — 6 p.
9. An effective and low-consumption foam finishing strategy for robust functional fabrics with on-demand special wettability Author links open overlay panel / X. Xie, S. Li, X. Wang, J. Huang, Z. Chen, W. Cai, Y. Lai // Chemical Engineering Journal. — 2021. — Vol. 426. — 13 p. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131245>.
10. Nanodiamond fabrication of superhydrophilic wool fabrics / S. Houshyar, R. Padhye, R. Shanks, R. Nayak // Langmuir. — 2019. — Vol. 35. — pp. 7105–7111. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b02191>.

11. Self-cleaning textiles using the Lotus Effect (In book: Biologically Inspired Textiles) / T. Stegmaier, V. von Arnim, A. Scherrieble // *Polymedics Innovations*. — 2008. — pp. 137–149. — DOI: 10.1533/9781845695088.2.137.
12. Structure and oil repellency. Textiles with liquid repellency to hexane / S. Brewer, C. Willis // *Application Surface Science*. — 2008. — Vol. 254. — pp. 6450–6454. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.04.053/.
13. Fabrics with Tunable / W. Choi, A. Tuteja, S. Chhatre, J. Mabry, R. Cohen, G. McKinley // *Oleophobicity*. — 2009. — Vol. 21(21). — pp. 2190–2195. doi: 10.1002/adma.200802502.
14. A Simple, One-Step Approach to Durable and Robust Superhydrophobic Textiles / J. Zimmermann, F. Reifler, G. Fortunato, L. Gerhardt, S. Seeger // *Advanced Functional Materials*. — 2008. — Vol. 18(22). — pp. 3662–3669. doi: 10.1002/adfm.200800755.
15. Porous materials show superhydrophobic to superhydrophilic switching / N. Shirtcliffe, G. McHale, M. Newton, C. Perry, P. Roach // *Chemical Communications*. — 2005. — Vol. 25. — pp. 3135–3137.
16. Review of clothing for thermal management with advanced materials / L. Peng, B. Su, A. Yu, X. Jiang // *Cellulose*. — 2019. — Vol. 26(10). — 34 p.
17. Thermal management in nanofiber-based face mask / A. Yang, L. Cai, R. Zhang, J. Wang, P. Hsu, H. Wang, G. Zhou, J. Xu, Y. Cui // *Nano Letters*. — 2017. — Vol. 17(6). — pp. 3506–3510.
18. Manufacturing and properties of fire-retardant and thermal insulation nonwoven fabrics with FR-polyester hollow fibers / C. Lin, C. Lou, J. Lin // *Textile Research Journal*. — 2009. — Vol. 79(11). — pp. 993–1000.
19. Thermal insulation: a thermally insulating textile inspired by polar bear hair / Y. Cui, H. Gong, Y. Wang, D. Li, H. Bai // *Advanced Materials*. — 2018. — Vol. 30(14). — 8 p.
20. Mäkinen, M. Introduction to phase change materials. In H. Mattila // *Intelligent textiles and clothing*. — 2006. — pp. 21–33.
21. Sinclair, R. *Textiles and Fashion. Materials, design and technology*. // Woodhead Publishing Series in Textiles: No 126. — 2015. — 895 p.
22. From a pinecone to design of an active textile / V. Kapsali, J. Vincent // *Biomimetics*. — 2020. — Vol. 5(52). — 14 p. doi: 10.3390/biomimetics 5040052.
23. Reversible humidity sensitive clothing for personal thermoregulation / Y. Zhong, F. Zhang, M. Wang, C. Gardner, G. Kim, Y. Liu, J. Leng, S. Jin, R. Chen // *Science Reports*. — 2017. Vol. 7. — 8 p. doi: 10.1038/srep44208.
24. A review of stimuli-responsive polymers for smart textile applications / J. Hu, H. Meng, G. Li, S. Ibekwe // *Smart Materials Structures*. — 2012. — Vol. 21(5). — 24 p. DOI 10.1088/0964-1726/21/5/053001.
25. Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of polyacetylene / H. Shirakawa, E. Louis, A. MacDiarmid, C. Chiang, A. Heeger // *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*. — 1977. — Vol. 16. — pp. 578–580.

26. Electrical Characterization of Textile Transmission Lines / D. Cottet, J. Grzyb, T. Kirstein, G. Tröster // IEEE Transactions on advanced packaging. — 2003. — Vol. 26, No. 2. — pp. 182–190.
27. E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing / E. Post, P. Orth, R. Gershenfeld, N. Gershenfeld // IBM Systems Journal. — 2000. — Vol 39. — 2000. — pp. 840–860.
28. Moisture Based Perspiration Level Estimation / J. Jia, C. Xu, S. Pan, S. Xia, P. Wei, H.Y. Noh, P. Zhang, X. Jiang // Proceedings of the ISWC. — 2018. — pp. 38–44.
29. Roh, J.S. Conductive Yarn Embroidered Circuits for System on Textiles // chapter in book «Wearable Technologies». — 2019. — pp. 161–174.
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.76627>.
30. Waterproof and durable screen printed silver conductive tracks on textiles / K. Yang, R. Torah, Y. Wei, S. Beeby, J. Tudor // Textile Research Journal. — 2013. — Vol. 83. — pp. 202–2031. — doi: 10.1177/004051751349 0063.
31. Electronic Textiles: A Platform for Pervasive / Marculescu D., Marculescu R., Zamora N., Stanley-Marbell P., Khosla P., Park S., Jayaraman S., Jung S., Lauterbach C., Weber W., Kirstein T., Cottet D., Grzyb J., Tröster G., Jones M., Martin T., Nakad Z. // Proceedings of the IEEE. — 2003. — VOL. 91. — pp. 1995–2018.
32. Enabling Technologies for Disappearing Electronics in Smart Textiles / Jung S., Lauterbach C., Strasser M., Weber W. // ISSCC Technical Digest. — 2003. — pp. 386–387, 2003.
33. Electrical Characterization of Screen-Printed Circuits on the Fabric / Kim Y., Kim H., Yoo H. // IEEE Transactions on Advanced Packaging. — 2010. — Vol. 33(1). — pp. 196–205. doi: 10.1109/tadvp.2009.2034536.
34. An electronic nose on flexible substrates integrated into a smart textile / T. Kinkeldei, C. Zysset, N. Münzenrieder, G. Tröster // Sensors and Actuators B. — 2018. — Vol. 174. — pp. 81–86.
35. Reactive ion etching for bulk structuring of polyimide / U. Buder, J.P. von Klitzing, E. Obermeier // Sensors and Actuators A. — 2006. — Vol. 132(1). — pp. 393–399.
36. A tailored, electronic textile conformable suit for large-scale spatiotemporal physiological sensing in vivo [Text] / I. Wicaksono, C.I. Tucker, T. Sun, C.A. Guerrero, C. Liu, W.M. Woo, E.J. Pence, C. Dagdeviren. // Flexible Electronics. — 2020. — Vol. 4(5). — 13 p. — doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-020-0068-y>.
37. Wearable Sensors in Sports for Persons with Disability: A Systematic Review / L. Rum, O. Sten, E. Vendrame, V. Belluscio, V. Camomilla, G. Vannozzi, L. Truppa, M. Notarantonio, T. Sciarra, A. Lazich // Sensors. — 2021. — Vol. 21. — 25 p.
38. Multidisciplinary Sport Science Teams in Elite Sport: Comprehensive Servicing or Conflict and Confusion? / Reid C., Stewart E., Thorne G. // Sport Psychology. — 2004. — Vol. 18. — pp. 204–217.

Abramov Anton Vyacheslavovich

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-1344>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=572662

Smolyaninov Kirill Mikhailovich

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3557-5299>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1235403

Rodicheva Margarita Vsevolodovna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1092-6141>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=421517

Kadyrov Ildar Rinatovich

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2556-7148>

Actual trends in the development of functional textile materials for sports and outdoor activities

Abstract. It is shown that one of the main trends in the development of clothing for sports and active recreation is the introduction of functional textile materials. Due to the accumulation of advanced achievements in the field of nanotechnology, microelectronics, physics, and chemistry, such materials change the value of property indicators when weather conditions fluctuate and human physical activity changes. The main tasks solved through the use of functional textile materials are systematized: microclimate control, protection of the underwear space from the penetration of external moisture; regulation of heat flows in a clothing package; measurement of biosignals, processing and transmission of received data to external devices.

The main structural features and directions of their development of functional textile materials have been established. It is shown that controlling the flow of moisture in the structure of a clothing package and giving it pronounced hydrophobic properties is carried out through the use of the original properties of nano-sized coatings of fibers and fabrics. Control of heat transfer processes is achieved by: changing the air concentration in the sheets through the use of profiled fibers; chemical modification of fibers with polymers with a phase transition temperature close to skin temperature; use of metal nano-sized coatings. To regulate convective flows in the structure of a clothing package, new types of textile materials with shape memory effect have been developed, which allows them, under certain conditions, to activate windows for the movement of moist air.

The ability to transmit electrical and electronic signals is ensured by the introduction of sensors, microcircuits, and signal conductors into the structure of the fabrics.

Classifications have been proposed and promising directions for providing new and improved properties of all considered groups of textile materials have been established.

Keywords: functional textile materials; dynamic properties; hydrophobicity; physical modification; chemical modification; heat and mass transfer; conductive threads; wearable electronics