

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Обзорная статья

УДК 677.017.632:687.14

EDN VTQVCE

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-2-64-5-12>

Антон Вячеславович Абрамов¹

Владимир Владимирович Кургузов²

Николай Николаевич Уткин³

Маргарита Всеволодовна Родичева⁴

^{1,2,3} Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

⁴ Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Россия

¹ Ant-lin88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7082-1344>

² forbeemo@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-0962-5386>

³ kol.utkin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-6211-5565>

⁴ rodicheva.unpk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1092-6141>

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СО СВОЙСТВОМ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ВЛАГИ ДЛЯ ОДЕЖДЫ СПОРТИВНОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. Представлены результаты анализа функциональных материалов со свойством управления потоками влаги в пакете одежды. Показано, что в современных разработках вектор переноса формируется за счет градиента поверхностной энергии или капиллярного потенциала. Установлено, что все разработки могут быть классифицированы по виду механизма переноса. Перенос влаги за счет потоков Марангони в текстильных материалах обеспечивается: сочетанием натурального и синтетического сырья; нанесением на поверхности материала гидрофобизирующих и гидрофильных покрытий; использованием мембран. Организация в текстильных материалах градиента капиллярного потенциала связана с изменением поверхностной плотности по толщине. В ряде образцов используется сочетание этих подходов. Для каждого из выделенных классов представлены торговые марки материалов, которые доступны на современном рынке текстильной продукции.

Ключевые слова: управление потоками влаги, краевой угол смачивания, поверхностное натяжение, трикотаж, капиллярный потенциал, поток Марангони, поверхностная энергия, мембрана, электроосмос

Для цитирования: Функциональные материалы со свойством управления потоками влаги для одежды спортивного и специального назначения / А. В. Абрамов, В. В. Кургузов, Н. Н. Уткин, М. В. Родичева // Технологии и качество. 2024. № 2(64). С. 5–12. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-2-64-5-12>.

Review article

Anton V. Abramov¹

Vladimir V. Kurguzov²

Nikolai N. Utkin³

Margarita V. Rodicheva⁴

^{1,2,3} Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

⁴ Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

FUNCTIONAL MATERIALS WITH MOISTURE FLOW MANAGEMENT PROPERTIES FOR SPORTS AND SPECIAL PURPOSE CLOTHING

© Абрамов А. В., Кургузов В. В., Уткин Н. Н., Родичева М. В., 2024

Abstract. The results of the analysis of functional materials with the property of controlling moisture flows in a clothing package are presented. It has been shown that in modern developments the transfer vector is formed due to the surface energy gradient or capillary potential. It has been established that all developments can be classified according to the type of transfer mechanism. Moisture transfer due to Marangoni flows in textile materials is ensured by: a combination of natural and synthetic raw materials; applying water-repellent and hydrophilic coatings to the surface of the material; use of membranes. The organization of a capillary potential gradient in textile materials is associated with a change in surface density along the thickness. A number of images use a combination of these approaches. For each of the selected classes, trademarks of materials that are available on the modern textile market are presented.

Keywords: control of moisture flows, contact angle, surface tension, knitwear, capillary potential, Marangoni flow, surface energy, membrane, electroosmosis

For citation: Functional materials with moisture flow management properties for sports and special purpose clothing / A. V. Abramov, V. V. Kurguzov, N. N. Utkin, M. V. Rodicheva. Technologies & Quality. 2024. No 2(64). P. 5–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-2-64-5-12>.

Проблема отведения пота при формировании качества одежды

Качество одежды определяется в том числе способностью комплекта обеспечивать комфортные параметры пододежного микроклимата: температура воздуха от +25 до +27 °С, а влажность от 40 до 60 % [1]. В этом случае обеспечиваются максимальная работоспособность человека и эффективность тренировочного процесса [2].

При высокой физической активности комплект одежды не всегда обеспечивает баланс между теплопродукцией организма и теплоотдачей, что может вызвать избыточное потоотделение. Белье должно эффективно поглощать пот с поверхности кожи и передавать его вышележащим слоям. При накоплении влаги в бельевом слое одежда прилипает к телу, ограничивая свободу движений и создавая ощущение нагрева [3].

Вывод паров влаги из-под одежды обеспечивается использованием материалов с низкой поверхностной плотностью. Однако в ряде случаев необходимо изолировать пододежное пространство от окружающей среды. Например, в одежде шахтеров требуется предотвратить проникновение пыли под одежду, а в комплектах для активного отдыха – осадков и ветра. В этих условиях в комплекте обеспечивается управление потоками влаги на основе теории движения жидкости [4].

Согласно этим представлениям для растекания влаги по поверхности материала силы межмолекулярного взаимодействия должны совершить работу по преодолению сил поверхностного натяжения капли. Мерой этой работы является краевой угол смачивания (рис. 1, а, б). При контакте жидкости с поверхностью она проникает в объем материала за счет всасывающего давления. Силы всасывания обусловлены гради-

ентом поверхностной энергии или сил поверхностного натяжения.

В условиях градиента поверхностной энергии влага самопроизвольно перемещается из зон с меньшим коэффициентом поверхностного натяжения в зоны с большим коэффициентом (см. рис. 1, в) [5]. Это движение называют потоком Марангони. В капиллярно-пористом теле влага перемещается от капилляров большего размера к капиллярам меньшего под действием капиллярного потенциала (см. рис. 1, г).

На основе этих эффектов разработаны функциональные материалы со свойством управления потоками влаги.

Двухслойные трикотажные материалы, нижний слой (поз. 1, рис. 2, а) которых изготовлен из синтетического сырья, а верхний (поз. 2) – из натурального [6]. За счет различий в краевом угле смачивания между ними возникает поток Марангони, направленный к лицевой поверхности материала. К концу XX века изделия из них использовались в комплектах одежды для занятия спортом. Однако в процессе их использования было выявлено затухание потоков влаги при ее связывании с натуральными волокнами.

Профилирование синтетических волокон (см. рис. 2, б) позволяет повысить интенсивность потоков влаги в структуре материала в соответствии с числом канавок на поверхности [7]. В числе наиболее распространенных материалов на базе таких волокон – трикотаж торговой марки “CoolMax”. Существенный недостаток таких волокон связан с организацией потока влаги в обоих направлениях. При повышенной влажности окружающего воздуха такие материалы будут способствовать насыщению влагой пододежного пространства.

Управление потоками влаги за счет градиента капиллярного потенциала. Х. Мориц и Д. Бриер предложили методы организации

градиента капиллярного потенциала в трикотажных полотнах из синтетических волокон [8]. Полотно имеет основной (поз. 3, см. рис. 2, в) и ворсовой (поз. 4) слои. Различие в размере капилляров между ними позволяет материалу

активно поглощать влагу без связывания в своей структуре. Разрежение ворса канавками способствует дополнительному охлаждению тела человека за счет воздушного потока [9].

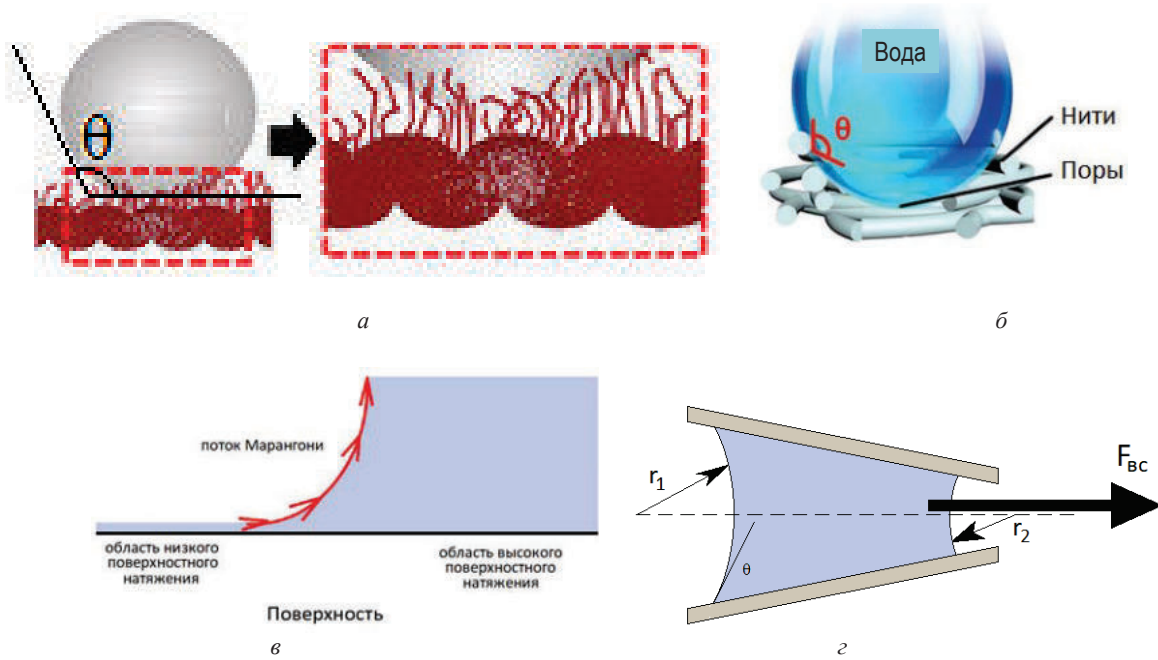


Рис. 1. Поведение влаги в структуре и на поверхности текстильных материалов:
 а, б – краевой угол смачивания на поверхности материалов;
 в – схема потока Марангони; г – поведение влаги в капиллярах

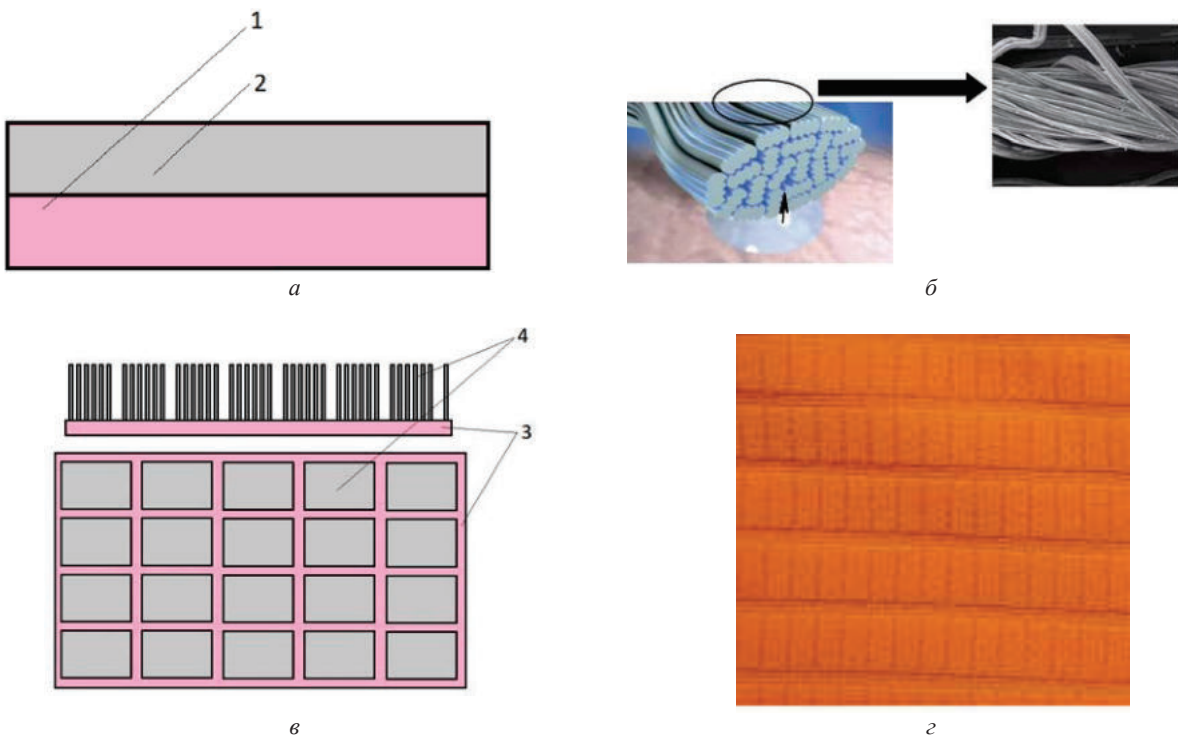


Рис. 2. Двухслойные текстильные материалы со свойством управления потоками влаги и нити для них:
 а – схема двухслойного трикотажного материала из натурального и синтетического сырья;
 б – нити из синтетических профилированных волокон марки “CoolMax”;
 в – схема и внешний вид ворсового трикотажного материала;
 г – внешний вид трикотажного полотна торговой марки “PolartechPowerDry”

При введении в структуру материала дополнительных слоев разной плотности поток влаги становится более выраженным. Например в материале фирмы “Nike” нижний слой (поз. 1, рис. 3, *a*) является самым рыхлым, а в более плотных промежуточном (поз. 2) и верхнем (поз. 3) слоях введены полости для циркуляции воздуха, что обеспечивает дополнительное охлаждение [10]. На основе этого материала раз-

работана линейка образцов спортивной одежды (см. рис. 3, *б*).

Потоки Марангони в материале можно обеспечить за счет нанесения покрытий, повышающих гидрофобность изнаночного и гидрофильность лицевого слоев (рис. 4, *a*) [11]. Продолжая эти исследования, А. Назир с соавт. установил, что наибольшая скорость потока достигается при зональном нанесении покрытий (см. рис. 4, *б*) [12].

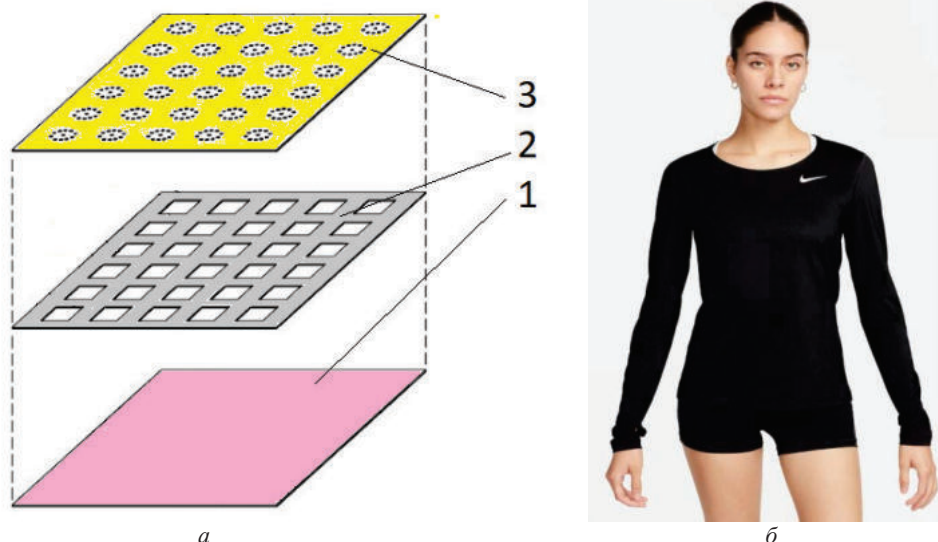
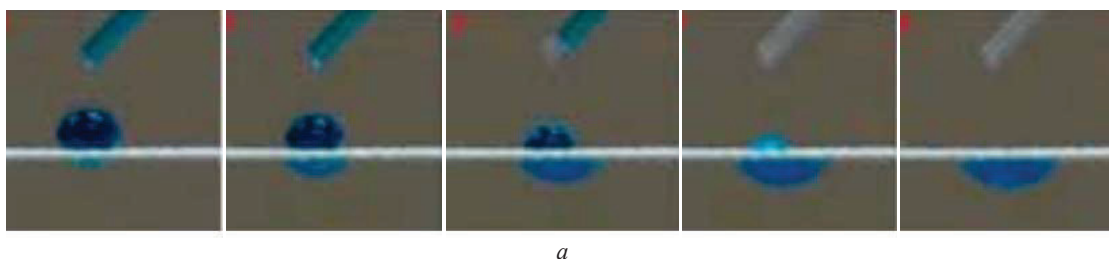
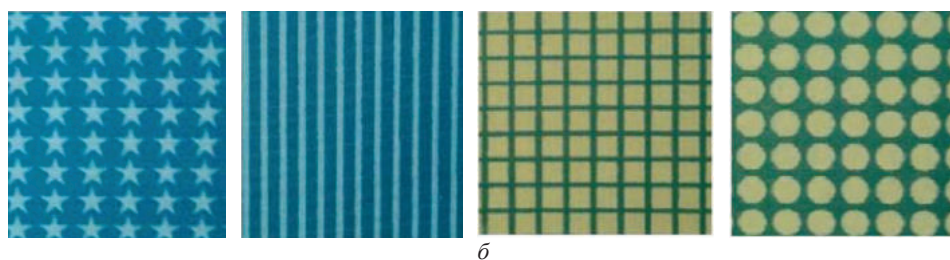


Рис. 3. Многослойные текстильные материалы со свойством управления потоками влаги и изделия из них: *a* – схема многослойного влагопроницаемого материала; *б* – комплект спортивный



a



б

Рис. 4. Поведение жидкой влаги в материалах с градиентом смачивания:

a – поведение жидкости в материале с градиентом смачивания;
б – варианты нанесения гидрофобизирующих покрытий на материал

В ряде многослойных материалов (рис. 5, *a*) градиент смачиваемости обеспечивается за счет сочетания волокон и покрытий [13]. Это решение не только обеспечивает эффективное управление потоками влаги, но и блокирует перенос водяного пара в направлении кожи.

В 2017 году зарубежными исследователями предложены природоподобные материалы (см. рис. 5, *a*), в которых на нетканое полотно из полилактидных волокон наносятся микроволокна полимолочной кислоты (см. рис. 5, *б*) [14]. Впоследствии они покрываются наноразмерным

слоем эпоксидной смолы. Покрытие закрепляется методами вакуумной сушки. В таких материалах возникают высокоинтенсивные потоки влаги согласно закону Мюррея.

Локальные зоны градиентного смачивания в структуре текстильных материалов получают методом плазменной обработки и направлены на обеспечение сочетания коэффициентов поверхностного натяжения локальных зон, ли-

цевой и изнаночной поверхностей (рис. 6, а). Такие материалы эффективно поглощают пот, обеспечивают перенос влаги на лицевую сторону. Капли скапливаются на поверхностях зон, после чего стекают с изделия [15]. Из-за сложности производства и отсутствия рекомендаций по сочетанию коэффициентов смачивания эти материалы не получили широкого распространения в спортивной и специальной одежде.

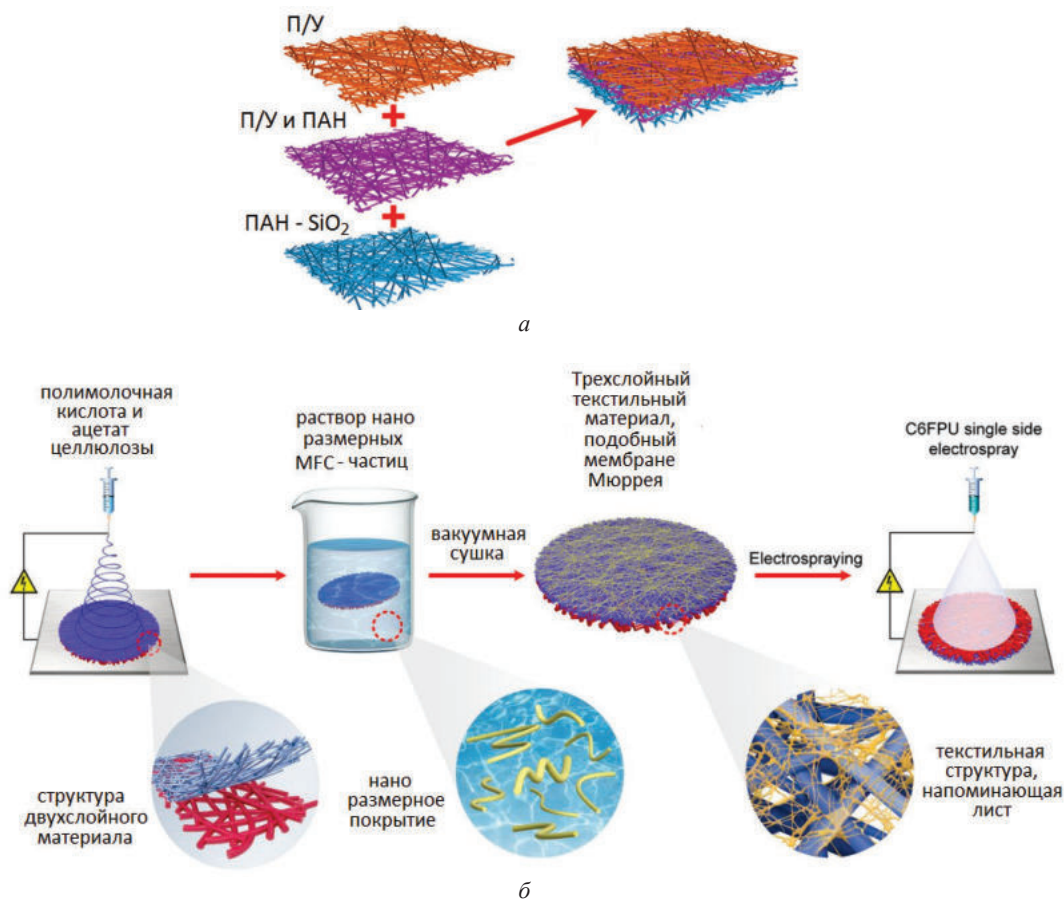


Рис. 5. Многослойные текстильные материалы: а – композитный трехслойный материал; б – технология производства природоподобного материала

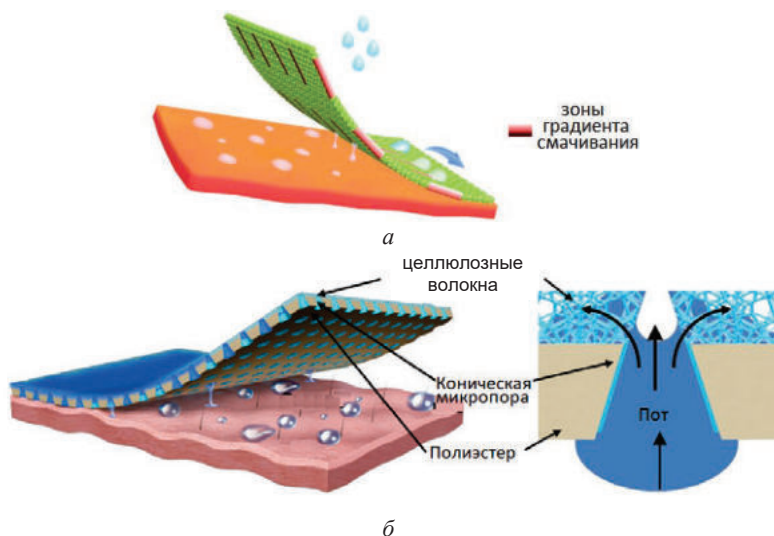


Рис. 6. Материалы с зонами градиентного смачивания (а) и мембранным покрытием (б)

Управление потоками влаги за счет мембранных слоев является эффективным методом формирования градиента смачивания в материале [16]. Однако мембраны не всегда обеспечивают требуемую интенсивность потоков влаги [17]. Для его интенсификации Б. Дай с соавт. разработал технологию получения конических пор в структуре мембраны, известную под торговой маркой “Janus” (рис. 6, б) и технологию получения текстильных материалов на ее основе (“Janustextiles”). На базе этих материалов производят спортивную одежду для различных условий окружающей среды [18].

Другим способом ускорения потоков влаги в материалах с мембранными слоями является использование явления электроосмоса [19]. В этом случае ткань верхнего слоя, как правило, из углеродных волокон (поз. 1, рис. 7) выполняет роль катода, нетканое полотно (поз. 3) – роль анода. Эти материалы соединяются с поликарбонатной мембраной (поз. 2) слоями полиуретановой сетки (поз. 4). При постоянном напряжении от 1 до 6 В пот перемещается от ткани к нетканому слою.

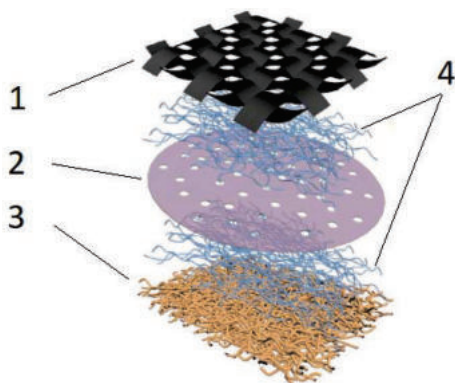


Рис. 7. Материал с организацией потоков влаги за счет электроосмоса

Испытания таких материалов в походных условиях позволяют судить об их эффективности и безопасности. Однако вследствие высокой жесткости они находят ограниченное применение при производстве одежды, но активно используются при производстве стелек обуви.

ВЫВОДЫ

Задача отведения пота от тела человека в одежде решается посредством формирования потоков влаги за счет градиента сил поверхностного натяжения или капиллярного потенциала.

Управление потоками влаги за счет профилированных синтетических волокон позволяет ускорить отведение пота. Однако в таких материалах поток является двунаправленным и при повышенной влажности окружающего воздуха наблюдается активный перенос влаги к телу человека.

Управление потоками влаги за счет градиента капиллярного потенциала посредством ворсовых трикотажных полотен рассматривается как достаточно эффективный способ отведения пота от тела человека. Введение в структуру материала дополнительных слоев позволяет организовать дополнительное охлаждение посредством испарения. В настоящее время такие материалы получили широкое распространение.

Управление потоками влаги за счет потоков Марангони связано с формированием градиента смачиваемости за счет нанесения покрытий на лицевую и изнаночную стороны материала или за счет мембранных покрытий. Технологии получения таких материалов активно развиваются и в ближайшее время можно ожидать расширения ассортимента на современном рынке материалов со свойством управления потоками влаги.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Islam R., Golovin K., Dolez P. Clothing Thermophysiological Comfort: A Textile Science Perspective // *Textiles*. 2023. Vol. 3(4). P. 353–407.
2. Recent Developments in Materials and Manufacturing Techniques Used for Sports Textiles / A. Faheem, S. Khurram, A. Wardah, M. Bushra, R. Abher et. al. // *International Journal of Polymer Science*. 2021. Vol. 2023, is. 1. P 2021622.
3. Кошечев В. С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода. М. : Медицина, 1981. 288 с.
4. Лыков А. В. Теория сушки. М. : Энергетика, 1968. 472 с.
5. Marangoni flow in micro-channels / H. Lee, D. Fermin, R. Corn, H. Girault // *Electrochemistry Communications*. 1999. Vol. 1. P. 190–193.
6. Designing textile architectures for high energy-efficiency human body sweat- and cooling-management / K. Fu, Z. Yang, Y. Pei, Y. Wang, B. Xu, Y. Wang, B. Yang, L. Hu // *Advanced Fiber Materials*. 2019. Vol. 1. P. 61–70.

7. Moisture absorption and release of profiled polyester and cotton composite knitted fabrics / C. Su, J. Fang, X. Chen, W. Wu // *Textiles Research Journal*. 2007. Vol. 77. P. 764–769.
8. US 5297296A Multi-layer moisture management elastic fabric / H. Moretz, D. Brier ; Inventor H. Moretz D. Brier. Priority to US 1992.12.17. Publication 1994.03.29. 16 p.
9. Women’s performance zip-up hoodie // Polartec. URL: <https://www.polartec.com/partners/products/nobull-womens-performance-zip-up-hoodie> (дата обращения: 08.05.2024).
10. What Is Moisture Wicking? // Nike : official site. URL: <https://www.nike.com/be/en/a/what-is-moisture-wicking> (дата обращения: 08.05.2024).
11. Directional water transport fabrics with durable ultra-high one-way transport capacity / C. Zeng, H. Wang, H. Zhou, T. Lin // *Advanced Materials Interfaces*. 2016. Vol. 3, is. 14. P. 1600036.
12. Effect of design and method of creating wicking channels on moisture management and air permeability of cotton fabrics / A. Nazir, T. Hussain, G. Abbas, A. Ahmed // *Journal Natural. Fibers*. 2015. Vol. 12. P. 232–242.
13. Continuous, Spontaneous, and Directional Water Transport in the Trilayered Fibrous Membranes for Functional Moisture Wicking / D. Miao, Z. Huang, X. Wang, J. Yu, B. Ding // *Small*. 2018. Vol. 14, is. 32. P 1801527.
14. Dou Y., Tian D. Inspired Crossflow for Efficient and Continuous Collection of Spilled Oil // *ACS Nano*. 2017. Vol. 11. P. 2477–2485.
15. Nature-inspired moisture management fabric for unidirectional liquid transport and surface repellence and resistance / C. Zou, L. Lao, Q. Chen, J. Fan, D. Shou // *Energy and Building*. 2021. Vol. 248, is. 7. P. 111203.
16. Харапудько Ю. В., Тимошина Ю. А., Вознесенский Э. Ф. Анализ структурных изменений модифицированных полиэтиленовых пленок методом дифференциальной сканирующей калориметрии // *Технологии и качество*. 2022. № 1(55). С. 5–11.
17. Панкевич Д. К., Буркин А. Н. Методология оценки свойств материалов для водонепроницаемой одежды // *Технологии и качество*. 2022. № 2(56). С. 5–10.
18. Bioinspired Janus Textile with Conical Micropores for Human Body Moisture and Thermal Management / B. Dai, K. Li, L. Shi, X. Wan, X. Liu, F. Zhang, L. Jiang, S. Wang // *Advanced Materials*. 2019. Vol. 31, is. 41. P. 1904113.
19. Flexible Janus textile-based electroosmotic pump for large-area unidirectional positive water transport / Y. Zhang, M. Tian, L. Wang, H. Zhao, L. Qu // *Advanced Materials Interface*. 2020. Vol. 7, is. 13. P. 1902133.

REFERENCES

1. Islam R., Golovin K., Dolez P. Clothing Thermophysiological Comfort: A Textile Science Perspective. *Textiles*. 2023;3(4):353–407.
2. Faheem A., Khurram S., Wardah A., Bushra M., Abher R. Sheraz A., Farooq A., Yasir N. Recent Developments in Materials and Manufacturing Techniques Used for Sports Textiles. *International Journal of Polymer Science*. 2021;2023(1):2021622.
3. Koshcheev V. S. Fiziologiya i gigiena individual’noj zashchity cheloveka ot holoda. Moscow, Meditsina Publ., 1981. 288 s. (In Russ.)
4. Lykov A. V. Teoria sushki. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 s. (In Russ.)
5. Lee H., Fermin D., Corn R., Girault H. Marangoni flow in micro-channels. *Electrochemistry Communications*. 1999;1:190–193.
6. Fu K., Yang Z., Pei Y., Wang Y., Xu B., Wang Y., Yang B., Hu L. Designing textile architectures for high energy-efficiency human body sweat- and cooling-management. *Advanced Fiber Materials*. 2019;1:61–70.
7. Su C., Fang J., Chen X., Wu W. Moisture absorption and release of profiled polyester and cotton composite knitted fabrics. *Textiles Research Journal*. 2007;77:764–769.
8. Moretz H., Brier D. Multi-layer moisture management elastic fabric. US 5297296A. Priority to US 1992.12.17. Publication 1994.03.29. 16 p.
9. Women’s performance zip-up hoodie. URL: <https://www.polartec.com/partners/products/nobull-womens-performance-zip-up-hoodie> (accessed 08.05.2024).
10. What Is Moisture Wicking? URL: <https://www.nike.com/be/en/a/what-is-moisture-wicking> (accessed 08.05.2024).

11. Zeng C., Wang H., Zhou H., Lin T. Directional water transport fabrics with durable ultra-high one-way transport capacity. *Advanced Materials Interfaces*. 2016;3(14):1600036.
12. Nazir A., Hussain T., Abbas G., Ahmed A. Effect of design and method of creating wicking channels on moisture management and air permeability of cotton fabrics. *Journal Natural Fibers*. 2015;12:232–242.
13. Miao D., Huang Z., Wang X., Yu, J., Ding B. Continuous, Spontaneous, and Directional Water Transport in the Trilayered Fibrous Membranes for Functional Moisture Wicking. *Small*. 2018;14(32):1801527.
14. Dou Y., Tian D. Inspired Crossflow for Efficient and Continuous Collection of Spilled Oil. *ACS Nano*. 2017;11:2477–2485.
15. Zou C., Lao L., Chen Q., Fan J., Shou D. Nature-inspired moisture management fabric for unidirectional liquid transport and surface repellence and resistance. *Energy Building*. 2021;248(7):111203.
16. Kharapudko Yu. V., Timoshina Yu. A., Voznesensky E. F. Analysis of structural changes of modified polyethylene films by differential scanning calorimetry. *Tehnologiii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2022;1(55):5–11. (In Russ.)
17. Pankevich D. K., Burkin A. N. Methodology for evaluating the properties of waterproof clothing materials. *Tehnologiii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2022;2(56):5–10. (In Russ.)
18. Dai B., Li K., Shi L., Wan X., Liu X., Zhang F., Jiang L., Wang S. Bioinspired Janus Textile with Conical Micropores for Human Body Moisture and Thermal Management. *Advanced Materials*. 2019;31(41):1904113.
19. Zhang Y., Tian M., Wang L., Zhao H., Qu L. Flexible Janus textile-based electroosmotic pump for large-area unidirectional positive water transport. *Advanced Materials Interface*. 2020;7(13):1902133.

Статья поступила в редакцию 19.05.2024
Принята к публикации 24.05.2024