

УДК 004.942: 614.894.3

DOI 10.47367/0021-3497_2024_1_5

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ТЕКСТИЛЬ:
ОБЗОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ**

ELECTRONIC TEXTILES: A REVIEW OF MAIN RESEARCH AREAS

И.Н. ТЮРИН¹, В.В. ГЕТМАНЦЕВА¹, Е.Г. АНДРЕЕВА¹, С.Ш. ТАШПУЛАТОВ^{2,3}

I.N. TYURIN¹, V.V. GETMANTSEVA¹, E.G. ANDREEVA¹, S.SH. TASHPULATOV^{2,3}

¹Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство),

²Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,
³Джизакский политехнический институт, Узбекистан)

(¹Kosygin University, Russia

²Tashkent Institute of Textile and Apparel Industry, Uzbekistan,

³Jizzakh Polytechnic Institute, Uzbekistan)

E-mail: tyurin-in@rguk.ru, ssht61@mail.ru

Работа посвящена рассмотрению вопросов проектирования электронного текстиля (e-textile) как основы разработки высокофункциональной одежды различного назначения. Современное состояние мировой экономики, широкое внедрение искусственного интеллекта требуют более взвешенного подхода к разработке ассортиментных матриц, выбору материалов и маркетинговым стратегиям продвижения товаров легкой промышленности. Развитие технического прогресса и разнообразие nano- и микроэлектроники дает широкие возможности для использования текстильных материалов в качестве подложки при разработке интеллектуальных сенсорных платформ на текстильной основе. Нами рассмотрены основные направления проектирования электронного текстиля (e-textile), обладающего широким спектром интеллектуальных свойств. Внедрение данных направлений в процесс проектирования новых моделей одежды может оказать существенное влияние на рынок одежды специального, гражданского и двойного назначения.

The work is devoted to consideration of issues of designing electronic textiles (e-textile) as the basis for the development of highly functional clothing for various purposes. The current state of the global economy and the widespread introduction of artificial intelligence require a more balanced approach to the development of

assortment matrices, the selection of materials and marketing strategies for promoting light industry goods. The development of technological progress and the diversity of nano- and microelectronics provide wide opportunities for the use of textile materials as a substrate in developing of textile-based smart sensor platforms. We have reviewed the main directions of designing electronic textiles (e-textile), which has a wide range of intellectual properties. The introduction of these areas into the design process of new clothing models can have a significant impact on the market for special, civilian and dual-use clothing.

Ключевые слова: электронный текстиль, умная одежда, сенсорные платформы на текстильной основе, устойчивая мода.

Keywords: e-textile, smart clothing, textile-based sensor platforms, sustainable fashion.

В настоящее время в области проектирования одежды особое внимание уделяется исследованиям, которые ориентированы на обеспечение высокого уровня качества жизни человека [1, 2].

При этом, принимая во внимание проблемное состояние текстильной и легкой промышленности, существующей в условиях высокой конкуренции с иностранными производителями, для повышения инвестиционной привлекательности российских разработок в области проектирования одежды необходимо предложить инновационные подходы к процессу проектирования изделий широкого спектра применения: от военной отрасли и медицинской сферы до областей повседневного использования [3...5].

К изделиям, наделенным интеллектуальными функциями, обычно применяется термин "умная" одежда.

"Умная" одежда обладает рядом преимуществ и недостатков. К преимуществам обычно относят выполняемые ею мониторинговые и коммуникационные функции, например [6]:

- отслеживание данных о состоянии человека, таких как частота сердечных сокращений, количество пройденных шагов и потраченных за это время калорий;
- мониторинг осанки, характера дыхания и мышечной активности;
- возможность подключения к мобильному приложению или другому устройству, чтобы обеспечить обратную связь в режиме

реального времени и анализ производительности.

Многие варианты смарт-одежды разработаны так, чтобы быть удобными и стильными, поэтому их можно носить весь день, не чувствуя громоздкость изделия или неудобство ношения.

К основным недостаткам "умной" одежды относятся:

- высокая стоимость – она часто дороже, чем традиционная тренировочная одежда;
- необходимость использования батареи или зарядки, что может быть неудобно;
- недостаточная точность некоторых датчиков и функций отслеживания по сравнению с автономными фитнес-трекерами или медицинскими устройствами;
- недоступность некоторых вариантов смарт-одежды в широком диапазоне размеров и стилей.

В разработке "умной" одежды и текстиля ряд исследователей [7...9] выделяют два основных направления: *электронный текстиль* и *биотекстиль*. Принцип действия электронного текстиля (e-textile) основан на применении физических, химических, электрофизиологических сенсорных функций, а также электронных дисплеев.

Физические сенсорные функции основаны на детекции продольных (растяжение полотна) и поперечных (давление по нормали) деформаций в структуре текстильного полотна. Корейские ученые из *School of Electrical and Electronic Engineering* [10] представили датчики продольных деформа-

ций волокна с высокой степенью растяжения путем внедрения наночастиц Ag в растяжимое волокно с мультифиламентной структурой. Разработанные учеными волокнистые тензодатчики одновременно демонстрируют сверхвысокие коэффициенты тензочувствительности ($\sim 9,3 \times 10^5$ и ~ 659 при первом растяжении и последующем соответственно), очень широкий диапазон растяжения (450 и 200 % при первом и последующем растяжении соответственно) и высокую износостойкость (более 10 000 циклов растяжения).

В работах [11...13] исследуются вопросы использования деформаций электропроводящего текстиля для мониторинга многочисленных движений тела человека. Учеными разработан ряд тензодатчиков из полимерных нанокомпозитов, состоящих из полиуретановой основы и графитсодержащего наполнителя, предназначенных для распознавания биомеханических фазовых схем верхних конечностей [14]: угла пальцев, запястий и локтевого сустава. По итогам исследований определены существенные недостатки данной технологии: низкая точность и недолговечность, сложность калибровки, наличие шумов (помех) электрического сигнала, высокая стоимость, проблемы совместимости с управляющим микроконтроллером. Решение данных проблем поможет существенно ускорить внедрение тензодатчиков на текстильной основе, обладающих высоким уровнем точности и широким спектром чувствительности, в производство.

В другой своей работе научный коллектив уже представил разработки по измерению поперечных деформаций полотен (давления) с использованием волокон с высокой проводимостью, покрытых диэлектрическими резиновыми материалами. Предложенный датчик давления можно применять для изготовления "умных" перчаток и одежды, которые могут управлять машинами по беспроводной сети в качестве человеко-машинных интерфейсов [15].

Китайские ученые из Chongqing University и Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems [16] представили образцы "умных" текстильных материалов, основанных

на массиве трибоэлектрических полностью текстильных датчиков (TATSA) с высокой чувствительностью к давлению ($7,84 \text{ мВ Па}^{-1}$), малым временем отклика (20 мс), стабильностью ($> 100\,000$ циклов), широким диапазоном рабочих частот (до 20 Гц) и возможностью машинной стирки (> 40 стирок) (рис. 1).



Рис. 1

Произведенные в лабораторных условиях TATSA внедрены в конструкцию опытного образца одежды для одновременного мониторинга пульса и респираторных сигналов. Данная система открывает возможности долгосрочной и неинвазивной оценки сердечно-сосудистой и дыхательной систем для профилактики и лечения некоторых хронических заболеваний, синдрома апноэ сна.

Химические сенсорные функции основаны на немедленном обнаружении опасных биологических и химических веществ в окружающей среде [17]. При этом выделяют разработки по наделению "умного" текстиля биомаркерной функцией или функцией по обнаружению токсичных химических веществ. Для выделения биомаркеров (например, глюкозы [18...20], лактата [21, 22], pH [23, 24], гемоглобина) из пота используют методы электрохимического зондирования (например, амперометрию, потенциометрию, вольтамперометрию) либо зондирования с помощью органических электрохимических транзисторов (ОЭТ).

Ученые Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина [25] изобрели текстильные индикаторы, которые меняют цвет при высоких концентрациях кислотных или щелочных паров в воздухе. Такие датчики можно использовать при изготовлении спецодежды и средств индивидуальной защиты для предотвращения химических ожогов.

Группа исследователей из *Fudan University* [26] разработала функционализированные многостенные углеродные нанотрубки, скрученные в спиральные пучки волокон (рис. 2), которые имитируют иерархическую структуру мышц и могут отслеживать биомаркеры множества заболеваний. Такие пучки волокон имеют низкую жесткость на изгиб и демонстрируют сверхнизкое напряжение при сжатии. По итогам проведенных исследований разработанных образцов нанотрубок подтверждена универсальность пучков спиральных волокон в качестве электрохимических сенсоров.

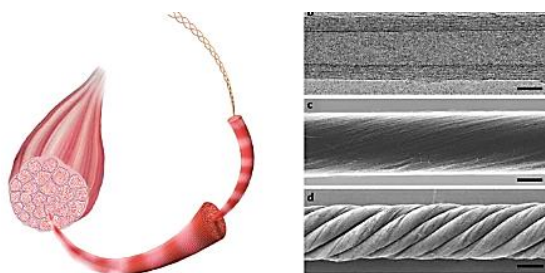


Рис. 2

Разработки итальянских ученых из *Università di Bologna* [27] предназначены для селективного обнаружения дофамина в присутствии мешающих соединений (аскорбиновой кислоты и мочевой кислоты) и заключаются в применении полностью органического электрохимического транзистора.

Имеется целый ряд разработок в области "умного" текстиля на основе электрофизиологической сенсорной функции. Электрофизиологические сигналы, такие как электрокардиограмма (ЭКГ), электромиограмма (ЭМГ) и электроэнцефалограмма (ЭЭГ), являются результатом измеримой разницы биопотенциалов в результате поляризации ионных каналов в клеточной мембране во время потребления энергии (т. е. клеточной поляризации). Электрофизиологические сигналы могут быть захвачены на коже неинвазивным способом и использованы во многих приложениях, таких как ежедневный мониторинг здоровья, реабилитация после травм, протезирование и интерфейсы мозг-компьютер.

В области создания "умных" текстильных материалов с функцией ЭКГ ученые из *Rice University* [28] создали сшиваемые электроды и провода для передачи сигналов из нитей углеродных нанотрубок (рис. 3). Эти нити мягкие, как стандартные швейные нитки, но имеют проводимость на уровне металла и низкий импеданс на границе раздела с кожей. Их также можно использовать в качестве проводов для передачи сигналов к другим частям одежды [29].

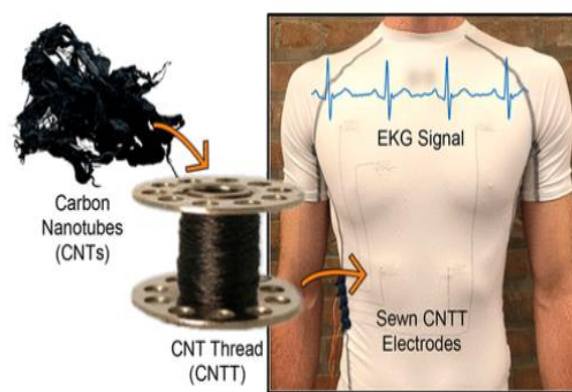


Рис. 3

Работы, проводимые японскими учеными из *University of Tokyo* [30], посвящены разработке токопроводящих чернил, наносимых на текстильные подложки. Проблемой является растрескивание чернил из-за деформируемой и пористой структуры текстиля. Ученые разработали механически и электрически прочную проводку, контролируя проникновение чернил в структуру ткани путем регулировки растворителя чернил (рис. 4).

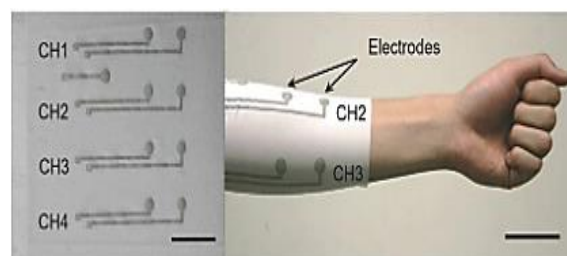


Рис. 4

Поверхностное сопротивление разработанного материала изначально составляет 0,06 Ом и увеличивается только в 70 раз после растяжения до 450% деформации.

Наконец, продемонстрирован прототип одежды с нанесенным четырехканальным контуром гибкой печатной платы для мониторинга электромиограммы [31].

Совершенно новое применение электронного текстиля представлено в работах [32...34], посвященных разработке новых интеллектуальных материалов с *электрофизиологическими функциями*. Сочетая традиционные методы вязания с программированием искусственных мышечных волокон, ученые создали динамический текстиль (рис. 5), приводимый в движение жидкостью и позволяющий воспроизводить множество мультимодальных движений: удлинение (до 65%), расширение площади (до 108%), радиальное расширение (до 25%) и изгиб.

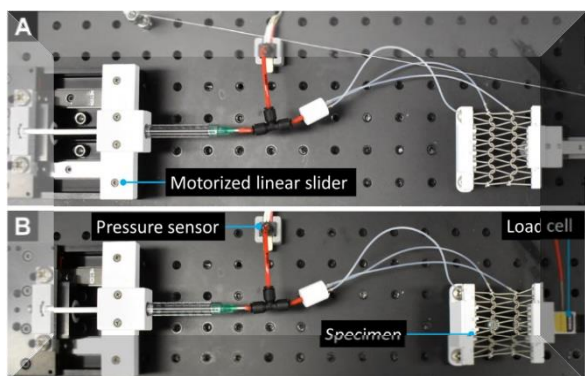


Рис. 5

Канадские ученые из University of Alberta [35] разработали двухслойные покрытия для электронного текстиля путем контролируемого проникновения композиционных чернил из частиц серебра/фторполимера в пористую ткань. Чернила образуют нанопокрывтие волокон текстильной подложки, что благоприятно сказывается на механических и электрических свойствах электронного текстиля. Печатный электронный текстиль имеет проводимость $\approx 3200 \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$, при этом 1000 циклов 30%-ного одноосного растяжения вызывают увеличение сопротивления только в ≈ 5 раз, что является приемлемым для многих областей применения. Контроль глубины проникновения позволяет создать двухслойную конструкцию электронного текстиля, в которой чувствительные электроды и про-

водящие дорожки напечатаны на противоположных сторонах подложки. С помощью специально разработанных электронных схем учеными была продемонстрирована система поверхностной электромиографии с беспроводной передачей данных. Кроме того, установлено, что пластырь из электронной ткани собирает электроэнцефалограммы с качеством сигнала, сравнимым с коммерческими гелевыми электродами.

В области гибких дисплеев с применением текстильных технологий известен ряд работ. Так, южнокорейскими исследователями из *Korea Advanced Institute of Science and Technology* [36] разработаны тканые и высокоэффективные органические светоизлучающие диоды (оптоволоконные OLED). Значения, полученные для волоконных OLED, включая эффективность и срок службы, близки к значениям для обычных аналогов на основе стекла. Волоконные OLED выдерживают растяжение до 4,3 % при радиусе 3,5 мм, и подтверждено, что их можно вплетать в текстиль, трикотаж, а следовательно, и в одежду (рис. 6).

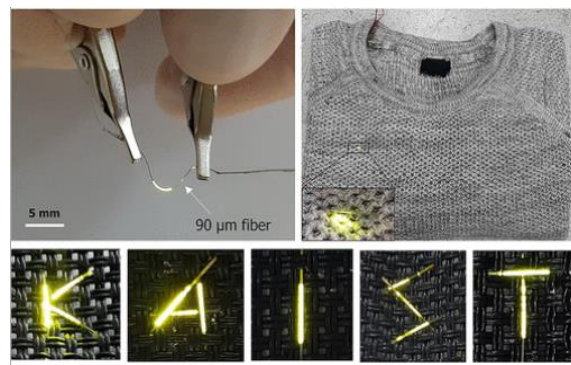


Рис. 6

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного анализа демонстрируют многообещающие перспективы применения текстильных датчиков и электронной ткани с тактильными, визуальными и прочими органолептическими ощущениями, присущими стандартной одежде и текстилю.

Среди основных областей исследований и разработок электронного текстиля (*e-textile*) можно выделить следующие:

- проектирование электронного текстиля, основанного на применении физических сенсорных функций: растяжения, деформации, изгиба токопроводящего текстильного полотна;

- проектирование электронного текстиля, основанного на применении химических сенсорных функций: обнаружении токсичных химических соединений в окружающей среде, детекции различных биомаркеров, позволяющих на ранней стадии обнаружить изменение состояния здоровья человека;

- проектирование электронного текстиля, основанного на применении электрофизиологических сенсорных функций, целью которого является не только непрерывный мониторинг состояния здоровья человека, но и использование образцов электронного текстиля в качестве комплексов, заменяющих биологические ткани человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Balkis M. et al.* Design for health and wellbeing: innovative medical garment design // *Advances in Design, Music and Arts*. 2020. P. 343...353. – DOI: 10.1007/978-3-030-55700-3_24.
2. *Тюрин И.Н., Яковлев А.М., Андреева Е.Г., Ташпулатов С.Ш., Белгородский В.С.* Численное моделирование компрессионного воздействия фильтрующей полумаски на мягкие ткани человека // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2020. № 6 (390). С. 179...183.
3. *Tyurin I., Tashpulatov S., Belgorodsky V., Andreeva E.* E3S Web Conf. 2023. 371, 02055. – DOI: 10.1051/e3sconf/202337102055.
4. *Тюрин И.Н., Гетманцева В.В., Ташпулатов С.Ш. и др.* Численное моделирование давления компрессионной оболочки спортивного назначения // *Химические волокна*. 2023. № 5. С. 58...60. – <https://doi.org/10.1007/s10692-023-10403-z>
5. *Тюрин И.Н., Зуфарова З.У., Ташпулатов С.Ш. и др.* Вычислительное моделирование и анализ изображений компрессионных свойств неопрена гетерогенной структуры // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2023. № 5(407). С. 175...183. – DOI 10.47367/0021-3497_2023_5_175. – EDN FTLSUD.
6. *Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreeva E.G.* *Fibre Chemistry* 2019. 51(2). P. 139...146.
7. *Cho S., Chang T., Yu T., Lee C.H.* *Smart Electronic Textiles for Wearable Sensing and Display*. *Biosensors* 2022, 12, 222. – <https://doi.org/10.3390/bios12040222>

8. *Heo J.S., Eom J., Kim Y.-H., Park S.K.* Recent Progress of Textile-Based Wearable Electronics: A Comprehensive Review of Materials, Devices, and Applications. *Small* 2017, 14, 1703034.

9. *Wang L., Fu X., He J., Shi X., Chen T., Chen P., Wang B., Peng H.* Application Challenges in Fiber and Textile Electronics. *Adv. Mater.* 2019, 32, 1901971.

10. *Lee J., Shin S., Lee S., Song J., Kang S., Han H., Kim S., Kim S., Seo J., Kim D. et al.* Highly Sensitive Multifilament Fiber Strain Sensors with Ultrabroad Sensing Range for Textile Electronics. *ACS Nano* 2018, 12, 4259–4268.

11. *Liza L. et al.* The technology of wearable flexible textile-based strain sensors for monitoring multiple human motions: construction, patterning and performance. *Sens. Diagn.* 2023, 2, 1414-1436

12. *Alam T. et al.* Smart-textile strain sensor for human joint monitoring, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 341, 2022, 113587. – <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113587>.

13. *Raji R.K., Miao X., Wan A., Zhang S., Li Y., Frimpong C.* Progress on the Fabrication of Smart Textiles Based on Soft Strain Sensors. *AATCC Journal of Research*. 2019; 6(6): 1-12. – doi:10.14504/ajr.6.6.1.

14. *Tyurin I.N., Tashpulatov S.Sh., Akhmedova Z.M.* Biomechanics of the human upper limb for sustainable approach to design smart clothing. *E3S Web Conf.*, 460 (2023) 10050. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346010050>.

15. *Lee J., Kwon H., Seo J., Shin S., Koo J.H., Pang C., Son S., Kim J.H., Jang Y.H., Kim D.E. et al.* Conductive Fiber-Based Ultrasensitive Textile Pressure Sensor for Wearable Electronics. *Adv. Mater.* 2015, 27, 2433–2439.

16. *Fan W., He Q., Meng K., Tan X., Zhou Z., Zhang G., Yang J., Wang Z.L.* Machine-Knitted Washable Sensor Array Textile for Precise Epidermal Physiological Signal Monitoring. *Sci. Adv.* 2020, 6, e2840.

17. *Tessarolo M., Gualandi I., Fraboni B.* Recent Progress in Wearable Fully Textile Chemical Sensors. *Adv. Mater. Technol.* 2018, 3, 1700310.

18. *Piper A., Månsson I.Ö., Khaliliazar S., Landin R., Hamed M.M.* A Disposable, Wearable, Flexible, Stitched Textile Electrochemical Biosensing Platform. *Biosens. Bioelectron.* 2021, 194, 113604.

19. *Liu X., Lillehoj P.B.* Embroidered Electrochemical Sensors for Biomolecular Detection. *Lab Chip* 2016, 16, 2093–2098.

20. *Xu W., Lu J., Huo W., Li J., Wang X., Zhang C., Gu X., Hu C.* Direct Growth of CuCo₂S₄ Nanosheets on Carbon Fiber Textile with Enhanced Electrochemical Pseudocapacitive Properties and Electrocatalytic Properties Towards Glucose Oxidation. *Nanoscale* 2018, 10, 14304–14313.

21. *Wang R., Zhai Q., An T., Gong S., Cheng W.* Stretchable Gold Fiber-Based Wearable Textile Electrochemical Biosensor for Lactate Monitoring in Sweat. *Talanta* 2021, 222, 121484.

22. *Yin L., Kim K.N., Lv J., Tehrani F., Li M., Lin Z., Moon J.-M., Ma J., Yu J., Xu S. et al.* A Self-Sustainable

Wearable Multi-Modular E-Textile Bioenergy Microgrid System. *Nat. Commun.* 2021, 12, 1542.

23. *Possanzini L., Decataldo F., Mariani F., Gualandi I., Tessarolo M., Scavetta E., Fraboni B.* Textile Sensors Platform for the Selective and Simultaneous Detection of Chloride Ion and pH in Sweat. *Sci. Rep.* 2020, 10, 17180.

24. *Мелешенкова В.В., Кузнецов Д.Н.* Текстильные PH-индуцируемые датчики как индикаторные элементы в средствах индивидуальной защиты человека // *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2022)*. Иваново: ИВГПУ, 2022. С. 254...257. – DOI 10.47367/2413-6514_2022_1_254. – EDN CИHVHE.

25. *Мелешенкова В.В., Кузнецов Д.Н., Караваева Е.Б., Кобраков К.И.* Новые азокрасители на основе 2-метилрезорцина для поликапроамидных волокон // *Химическая технология*. 2023. Т. 24, № 5. С. 165-170. – DOI 10.31044/1684-5811-2023-24-5-165-170. – EDN AXRDEG.

26. *Wang L., Xie S., Wang Z., Liu F., Yang Y., Tang C., Wu X., Liu P., Li Y., Saiyin H. et al.* Functionalized Helical Fibre Bundles of Carbon Nanotubes as Electrochemical Sensors for Long-Term in Vivo Monitoring of Multiple Disease Biomarkers. *Nat. Biomed. Eng.* 2020, 4, 159–171.

27. *Gualandi I., Marzocchi M., Achilli A., Cavedale D., Bonfiglio A., Fraboni B.* Textile Organic Electrochemical Transistors as a Platform for Wearable Biosensors. *Sci. Rep.* 2016, 6, 35419.

28. *Taylor L.W., Williams S.M., Yan J.S., Dewey O.S., Vitale F., Pasquali M.* Washable, Sewable, All-Carbon Electrodes and Signal Wires for Electronic Clothing. *Nano Lett.* 2021, 21, 7093–7099.

29. *Jin H., Matsuhisa N., Lee S., Abbas M., Yokota T., Someya T.* Enhancing the Performance of Stretchable Conductors for E-Textiles by Controlled Ink Permeation. *Adv. Mater.* 2017, 29, 201605848.

30. *Jin H., Matsuhisa N., Lee S., Abbas M., Yokota T., Someya T.* Enhancing the Performance of Stretchable Conductors for E-Textiles by Controlled Ink Permeation. *Adv. Mater.* 2017, 29, 1605848.

31. *Phan P.T., Thai M.T., Hoang T.T. et al.* Smart textiles using fluid-driven artificial muscle fibers. *Sci Rep* 12, 11067 (2022). – <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15369-2>

32. *Phan P.T. et al.* Twisting and braiding fluid-driven soft artificial muscle fibers for robotic applications. *Soft Robot.* 2021.

33. *Xiong J., Chen J. & Lee P.S.* Functional fibers and fabrics for soft robotics, wearables, and human-robot interface. *Adv. Mater.* 2021. 33, e2002640. – <https://doi.org/10.1002/adma.202002640>

34. *Kanakaraj P. & Rajagopalan Ramachandran.* Active knit fabrics - functional needs of sportswear application. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*. 2015

35. *La T.-G., Qiu S., Scott D.K., Bakhtiari R., Kuziek J.W.P., Mathewson K.E., Rieger J., Chung H.-J.* Two-Layered and Stretchable e-Textile Patches for

Wearable Healthcare Electronics. *Adv. Healthcare Mater.* 2018, 7, 1801033.

36. *Kwon S., Kim H., Choi S., Jeong E.G., Kim D., Lee S., Lee H.S., Seo Y.C., Choi K.C.* Weavable and Highly Efficient Organic Light-Emitting Fibers for Wearable Electronics: A Scalable, Low-Temperature Process. *Nano Lett.* 2018, 18, 347–356.

REFERENCES

1. *Balkis M. et al.* Design for health and wellbeing: innovative medical garment design // *Advances in Design, Music and Arts, 7th Meeting of Research in Music, Arts and Design, EIMAD 2020, May 14–15, 2020* (pp.343-353). – DOI:10.1007/978-3-030-55700-3_24.

2. *Tyurin I.N., Yakovlev A.M., Andreeva E.G., Tashpulatov S.S.H., Belgorodsky V.S.* Numerical simulation of the compression influence of the filtering half mask on the soft human tissues // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2020, (6), pp. 179...183.

3. *Tyurin I., Tashpulatov S., Belgorodsky V., Andreeva E.* E3S Web Conf. 371, 02055 (2023) DOI: 10.1051/e3sconf/202337102055.

4. *Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Tashpulatov S.S. et al.* Numerical Simulation of the Pressure of a Compression Shell for Sports Purposes. *Fiber Chem* (2023). – <https://doi.org/10.1007/s10692-023-10403-z>

5. *Tyurjn I.N., Zufarova Z.U., Tashpulatov S.Sh. et al.* Numerical simulation and image analysis of compression properties of heterogeneous neoprene material // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2023, No. 5(407). pp. 175...183. – DOI 10.47367/0021-3497_2023_5_175. – EDN FTLSUD.

6. *Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreeva E.G.* *Fiber Chemistry* 51(2), 139-146 (2019). – DOI: 10.1007/s10692-018-9918-y

7. *Cho S., Chang T., Yu T., Lee C.H.* Smart Electronic Textiles for Wearable Sensing and Display. *Biosensors* 2022, 12, 222. – <https://doi.org/10.3390/bios12040222>

8. *Heo J.S., Eom J., Kim Y.-H., Park S.K.* Recent Progress of Textile-Based Wearable Electronics: A Comprehensive Review of Materials, Devices, and Applications. *Small* 2017, 14, 1703034.

9. *Wang L., Fu X., He J., Shi X., Chen T., Chen P., Wang B., Peng H.* Application Challenges in Fiber and Textile Electronics. *Adv. Mater.* 2019, 32, 1901971.

10. *Lee J., Shin S., Lee S., Song J., Kang S., Han H., Kim S., Kim S., Seo J., Kim D. et al.* Highly Sensitive Multifilament Fiber Strain Sensors with Ultrabroad Sensing Range for Textile Electronics. *ACS Nano* 2018, 12, 4259–4268.

11. *Liza L. et al.* The technology of wearable flexible textile-based strain sensors for monitoring multiple human motions: construction, patterning and performance. *Sens. Diagn.*, 2023,2, 1414-1436

12. *Alam T. et al.* Smart-textile strain sensor for human joint monitoring, *Sensors and Actuators A: Physi-*

cal, Volume 341, 2022, 113587, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113587>.

13. Raji R.K., Miao X., Wan A., Zhang S., Li Y., Frimpong C. Progress on the Fabrication of Smart Textiles Based on Soft Strain Sensors. AATCC Journal of Research. 2019;6(6):1-12. doi:10.14504/ajr.6.6.1.

14. Tyurin I.N., Tashpulatov S.Sh., Akhmedova Z.M. Biomechanics of the human upper limb for sustainable approach to design smart clothing. E3S Web Conf., 460 (2023) 10050. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346010050>

15. Lee J., Kwon H., Seo J., Shin S., Koo J.H., Pang C., Son S., Kim J.H., Jang Y.H., Kim D.E. et al. Conductive Fiber-Based Ultrasensitive Textile Pressure Sensor for Wearable Electronics. Adv. Mater. 2015, 27, 2433–2439.

16. Fan W., He Q., Meng K., Tan X., Zhou Z., Zhang G., Yang J., Wang Z.L. Machine-Knitted Washable Sensor Array Textile for Precise Epidermal Physiological Signal Monitoring. Sci. Adv. 2020, 6, e2840.

17. Tessarolo M., Gualandi I., Fraboni B. Recent Progress in Wearable Fully Textile Chemical Sensors. Adv. Mater. Technol. 2018, 3, 1700310.

18. Piper A., Månsson I.Ö., Khaliliazar S., Landin R., Hamed M.M. A Disposable, Wearable, Flexible, Stitched Textile Electrochemical Biosensing Platform. Biosens. Bioelectron. 2021, 194, 113604.

19. Liu X., Lillehoj P.B. Embroidered Electrochemical Sensors for Biomolecular Detection. Lab Chip 2016, 16, 2093–2098.

20. Xu W., Lu J., Huo W., Li J., Wang X., Zhang C., Gu X., Hu C. Direct Growth of CuCo₂S₄ Nanosheets on Carbon Fiber Textiles with Enhanced Electrochemical Pseudocapacitive Properties and Electrocatalytic Properties Towards Glucose Oxidation. Nanoscale 2018, 10, 14304–14313.

21. Wang R., Zhai Q., An T., Gong S., Cheng W. Stretchable Gold Fiber-Based Wearable Textile Electrochemical Biosensor for Lactate Monitoring in Sweat. Talanta 2021, 222, 121484.

22. Yin L., Kim K.N., Lv J., Tehrani F., Li M., Lin Z., Moon J.-M., Ma J., Yu J., Xu S. et al. A Self-Sustainable Wearable Multi-Modular E-Textile Bioenergy Microgrid System. Nat. Commun. 2021, 12, 1542.

23. Possanzini L., Decataldo F., Mariani F., Gualandi I., Tessarolo M., Scavetta E., Fraboni B. Textile Sensors Platform for the Selective and Simultaneous Detection of Chloride Ion and pH in Sweat. Sci. Rep. 2020, 10, 17180.

24. Meleshenkova V.V., Kuznetsov D.N. Textile PH-induced sensors as indicator elements in personal protective equipment // Physics fibrous materials: structure, properties, high technology and materials (SMARTEX-2022). Ivanovo: IVGPU, 2022. P. 254..257. – DOI 10.47367/2413-6514_2022_1_254. – EDN CIHVHE.

25. Meleshenkova V.V., Kuznetsov D.N., Karavaeva E.B., Kobrakov K.I. New azo dyes based on 2-methylresorcinol for polycapraamide fibers // Chemical technology. 2023. T. 24, No. 5. P. 165...170. – DOI 10.31044/1684-5811-2023-24-5-165-170. – EDN AXRDEG.

26. Wang L., Xie S., Wang Z., Liu F., Yang Y., Tang C., Wu X., Liu P., Li Y., Saiyin H. et al. Functionalized Helical Fiber Bundles of Carbon Nanotubes as Electrochemical Sensors for Long-Term in Vivo Monitoring of Multiple Disease Biomarkers. Nat. Biomed. Eng. 2020, 4, 159–171.

27. Gualandi I., Marzocchi M., Achilli A., Cavedale D., Bonfiglio A., Fraboni B. Textile Organic Electrochemical Transistors as a Platform for Wearable Biosensors. Sci. Rep. 2016, 6, 35419.

28. Taylor L.W., Williams S.M., Yan J.S., Dewey O.S., Vitale F., Pasquali M. Washable, Sewable, All-Carbon Electrodes and Signal Wires for Electronic Clothing. Nano Lett. 2021, 21, 7093–7099.

29. Jin H., Matsuhisa N., Lee S., Abbas M., Yokota T., Someya T. Enhancing the Performance of Stretchable Conductors for E-Textiles by Controlled Ink Permeation. Adv. Mater. 2017, 29, 201605848.

30. Jin H., Matsuhisa N., Lee S., Abbas M., Yokota T., Someya T. Enhancing the Performance of Stretchable Conductors for E-Textiles by Controlled Ink Permeation. Adv. Mater. 2017, 29, 1605848.

31. Phan P.T., Thai M.T., Hoang T.T. et al. Smart textiles using fluid-driven artificial muscle fibers. Sci Rep 12, 11067 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15369-2>

32. Phan P.T. et al. Twisting and braiding fluid-driven soft artificial muscle fibers for robotic applications. Soft Robot. (2021).

33. Xiong J., Chen J. & Lee P.S. Functional fibers and fabrics for soft robotics, wearables, and human-robot interface. Adv. Mater. 33, e2002640. <https://doi.org/10.1002/adma.202002640> (2021).

34. Kanakaraj P. & Rajagopalan Ramachandran. (2015). Active knit fabrics - functional needs of sportswear application. Journal of Textile and Apparel, Technology and Management.

35. La T.-G., Qiu S., Scott D.K., Bakhtiari R., Kuziek J.W.P., Mathewson K.E., Rieger J., Chung H.-J. Two-Layered and Stretchable e-Textile Patches for Wearable Healthcare Electronics. Adv. Healthcare Mater. 2018, 7, 1801033.

36. Kwon S., Kim H., Choi S., Jeong E.G., Kim D., Lee S., Lee H.S., Seo Y.C., Choi K.C. Weavable and Highly Efficient Organic Light-Emitting Fibers for Wearable Electronics: A Scalable, Low-Temperature Process. Nano Lett. 2018, 18, 347–356.

Рекомендована кафедрой дизайна костюма ТИТЛП. Поступила 23.07.23.