

Исследование функциональных свойств пьезорезистивного эффекта и джоулема нагрева электропроводящих композитов на основе 3D-печати полимеров с поверхностным слоем PEDOT:PSS

Антонина А. Филимонова	¹	aachichirova@mail.ru	0000-0001-6238-188X
Алена Ю. Власова	¹	vlasovaay@mail.ru	0000-0001-8520-5432
Рузина Ф. Камалиева	¹	rruzzi@ya.ru	0009-0001-0427-9358
Егор С. Майоров	¹	mes.tegatu@gmail.com	0009-0006-3925-1458
Андрей А. Филимонов	¹	vip.jokermigel@m.ru	0009-0000-8251-5267

1 Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного исследования функциональных свойств электропроводящих композитов, полученных методом поверхностной модификации полимерных материалов для 3D-печати – полилактата (PLA), полиэтилентерефталатгликола (PETG) и термопластичного полиуретана (TPU) – проводящим полимерным комплексом поли(3,4- этилендиоксиофиен):поли(стиролсульфонат) (PEDOT:PSS). Исследован пьезорезистивный отклик образцов при механической деформации на изгиб в диапазоне 0–2%. Проведен расчет коэффициента тензочувствительности (Gauge Factor, GF). Наибольшую чувствительность продемонстрировал композит PETG + PEDOT:PSS с максимальным GF ≈ 47, что связано с формированием жесткого и хорошо адгезированного проводящего слоя, подверженного растрескиванию при деформации. Для композитов PLA + PEDOT:PSS и TPU + PEDOT:PSS максимальные значения GF составили ≈19.5 и ≈13.5 соответственно. Исследование эффекта Джоулема нагрева при подаче постоянного напряжения 70 В выявило незначительный рост температуры образцов ($\Delta T = 0.5\text{--}1.9^\circ\text{C}$), что обусловлено высоким удельным сопротивлением поверхностного слоя. Показано, что, несмотря на ограниченную эффективность для целей активного нагрева, материалы демонстрируют стабильность при прохождении тока. Результаты работы подтверждают перспективность применения разработанных композитов для создания пассивных датчиков деформации и гибких электронных компонентов методами аддитивных технологий на атомных электростанциях (АЭС).

Ключевые слова: электропроводящий композит, 3D-печать, PEDOT:PSS, пьезорезистивный эффект, тензочувствительность, Gauge Factor, деформация, Джоулем нагрев, атомная электростанция.

Study of the functional properties of the piezoresistive effect and Joule heating of electrically conductive composites based on 3D-printed polymers with a PEDOT:PSS surface layer

Antonina A. Filimonova	¹	aachichirova@mail.ru	0000-0001-6238-188X
Alyona Yu. Vlasova	¹	vlasovaay@mail.ru	0000-0001-8520-5432
Ruzina F. Kamalieva	¹	rruzzi@ya.ru	0009-0001-0427-9358
Egor S. Mayorov	¹	mes.tegatu@gmail.com	0009-0006-3925-1458
Andrey A. Filimonov	¹	vip.jokermigel@m.ru	0009-0000-8251-5267

1 Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive study of the functional properties of electrically conductive composites obtained by surface modification of polymer materials for 3D printing – polylactide (PLA), polyethylene terephthalate glycol (PETG), and thermoplastic polyurethane (TPU) – with a conducting polymer complex of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS). The piezoresistive response of the samples was studied under mechanical bending deformation in the range of 0–2%. The gauge factor (GF) was calculated. The PETG + PEDOT:PSS composite demonstrated the highest sensitivity with a maximum GF of ≈ 47 , which is due to the formation of a rigid and well-adhered conductive layer that is prone to cracking during deformation. For the PLA + PEDOT:PSS and TPU + PEDOT:PSS composites, the maximum GF values were ≈ 19.5 and ≈ 13.5 , respectively. A study of the Joule heating effect under a constant voltage of 70 V revealed a slight increase in the sample temperature ($\Delta T = 0.5\text{--}1.9^\circ\text{C}$), which is due to the high resistivity of the surface layer. It was shown that, despite their limited effectiveness for active heating purposes, the materials exhibit stability when subjected to current flow. These findings demonstrate the potential of these composites for the development of passive strain sensors and flexible electronic components using additive manufacturing techniques in nuclear power plants (NPPs).

Keywords: electrically conductive composite, 3D printing, PEDOT:PSS, piezoresistive effect, strain sensitivity, Gauge Factor, deformation, Joule heating, nuclear power plant.

Для цитирования

Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф., Майоров Е.С., Филимонов А.А.. Исследование функциональных свойств пьезорезистивного эффекта и джоулема нагрева электропроводящих композитов на основе 3D-печати полимеров с поверхностным слоем PEDOT:PSS // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 249–254. doi:[10.20914/2310-1202-2025-3-249-254](http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-249-254)

© 2025, Филимонова А.А. и др. / Filimonova A.A. et al.

For citation

Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Kamalieva R.F., Mayorov E.S., Filimonov A.A. Study of the functional properties of the piezoresistive effect and Joule heating of electrically conductive composites based on 3D-printed polymers with a PEDOT:PSS surface layer. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 249–254. (in Russian). doi:[10.20914/2310-1202-2025-3-249-254](http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-249-254)

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Бурное развитие технологий гибкой и растяжимой электроники стимулирует интенсивный поиск новых функциональных материалов, сочетающих в себе электропроводящие свойства и способность обратимо изменять свои электрофизические характеристики под воздействием внешних стимулов, таких как механическая деформация. Особый интерес в этом контексте представляют проводящие полимеры, в частности, комплекс PEDOT:PSS, который является одним из наиболее стабильных и технологичных материалов своего класса.

В предыдущих работах была успешно продемонстрирована эффективность метода поверхностной модификации стандартных полимерных филаментов для 3D-печати (PLA, PETG, TPU) дисперсией PEDOT:PSS. Было установлено, что данный метод позволяет увеличить удельную электропроводность материалов на 12–14 порядков, достигнув максимального значения для композита PETG + PEDOT : PSS ($9,26 \cdot 10^{-2}$ См/м). Однако для практического применения созданных композитов в качестве функциональных элементов (например, датчиков или нагревателей) необходимо изучение их поведения в реальных рабочих условиях.

Настоящее исследование логически продолжает предыдущую работу и направлено на всестороннее изучение двух ключевых функциональных свойств полученных композитов: пьезорезистивного эффекта – изменения электрического сопротивления при механической деформации, что является основой для создания датчиков деформации, изгиба и давления и эффекта Джоулева нагрева – способности материала нагреваться при пропускании через него электрического тока, что определяет применимость в качестве нагревательных элементов или в системах теплового управления.

Особое внимание уделено количественной оценке тензочувствительности материалов путем расчета коэффициента тензочувствительности (Gauge Factor, GF).

Материалы и методы

Образцы из полилактида (PLA), полиэтилентерефталатгликоля (PETG) и термопластичного

полиуретана (TPU) были подвергнуты поверхностной модификации путем пропитки в коммерческой водной дисперсии PEDOT:PSS (Clevios PH 1000) в течение 30 минут с последующей термообработкой при 100°C в течение 60 минут. Использовались образцы в виде консольных балок стандартных размеров, подготовленные для механических испытаний на изгиб.

Механическая деформация образцов осуществлялась путем контролируемого изгиба с фиксацией величины прогиба. Деформация (ε) рассчитывалась по стандартным формулам для консольной балки. Значения деформации составляли 0,0; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0%. Электрическое сопротивление образцов измерялось на каждой ступени деформации с помощью высокоточного цифрового мультиметра MASTECH MAS830L по двухточечной схеме. Для обеспечения надежного контакта использовались позолоченные щупы. Для каждого образца проводилась серия из 3 измерений с последующим усреднением.

Для количественной оценки пьезорезистивной чувствительности материалов был рассчитан коэффициент тензочувствительности (GF) по формуле:

$$GF = (\Delta R / R_0) / \varepsilon = ((R - R_0) / R_0) / \varepsilon$$

$$GF = (\Delta R / R_0) / \varepsilon = ((R - R_0) / R_0) / \varepsilon, \quad (1)$$

где R_0 – исходное электрическое сопротивление образца при нулевой деформации, R – сопротивление при деформации ε , $\Delta R / R_0$ – относительное изменение сопротивления.

Образцы помещались на теплоизолирующую подложку. К их концам подводилось постоянное напряжение 70 В от источника питания. Температура поверхности в центральной части образца контролировалась с помощью бесконтактного инфракрасного пирометра МЕГЕОН 16400 с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Измерения температуры проводились до подачи напряжения и через 5 минут после подачи, когда температура образца стабилизировалась. Рассчитывался перегрев $\Delta T = T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}$.

Результаты

Результаты измерений сопротивления и рассчитанные значения относительного изменения сопротивления ($\Delta R / R_0$) в зависимости от приложенной деформации представлены в таблице 1 и графике 1.

Таблица 1.

Электрические характеристики композитов при механической деформации

Table 1.

Electrical characteristics of composites during mechanical deformation

Материал Material	R_0 , кОм	$\Delta R / R_0$ (0,5%)	$\Delta R / R_0$ (1%)	$\Delta R / R_0$ (1,5%)	$\Delta R / R_0$ (2%)
PLA + PEDOT : PSS	635	0,12	0,25	0,31	0,39
PETG + PEDOT : PSS	17	0,12	0,35	0,76	0,94
TPU + PEDOT : PSS	549000	0,08	0,11	0,23	0,27

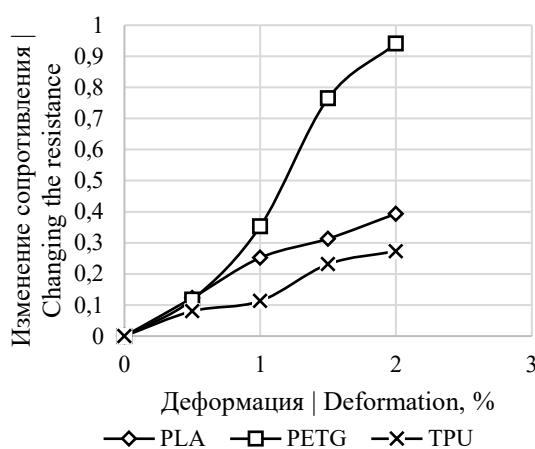


Рисунок 1. Зависимость электрического сопротивления от деформации образцов

Figure 1. Dependence of electrical resistance on deformation of samples

На основе данных Таблицы 1 были рассчитаны коэффициенты тензочувствительности (GF) для каждого материала на различных ступенях деформации. Результаты представлены в таблице 2.

Результаты измерения температуры образцов до и после подачи напряжения 70 В представлены в таблице 3.

Таблица 2.

Коэффициент тензочувствительности (GF) композитов

Table 2.

The strain sensitivity coefficient (GF) of composites

Материал Material	GF (0,5%)	GF (1%)	GF (1,5%)	GF (2%)	GF _{cp}
PLA + PEDOT : PSS	24,0	25,0	20,7	19,5	22,3
PETG + PEDOT : PSS	24,0	35,0	50,7	47,0	39,2
TPU + PEDOT : PSS	16,0	11,0	15,3	13,5	13,9

Таблица 3.

Параметры Джоуля нагрева композитов при U = 70 В

Table 3.

Joule heating parameters of composites at U = 70 V

Материал Material	R, кОм	Начальная T, °C	Конечная T, °C	ΔT, °C
TPU + PEDOT : PSS	549	23,0	24,2	+1,2
PETG + PEDOT : PSS	17	22,9	23,4	+0,5
PLA + PEDOT : PSS	635	21,3	23,2	+1,9

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют выраженный пьезорезистивный отклик всех исследованных композитов, однако его величина и характер существенно различаются в зависимости от типа полимерной матрицы [1–3].

Композит PETG + PEDOT : PSS показал наивысшую тензочувствительность со средним значением GF = 39,2 и максимальным GF ≈ 50,7 при деформации 1,5% (график 2). Столь высокие значения GF, на порядок превышающие таковые для металлических тензорезисторов (GF ≈ 2), свидетельствуют о преимущественно хрупком характере разрушения проводящего слоя PEDOT:PSS на поверхности PETG. Жесткая матрица PETG и хорошая адгезия к ней проводящего полимера приводят к тому, что при изгибе в слое PEDOT:PSS возникают микротрешины, которые эффективно разрывают проводящие пути, вызывая резкое увеличение сопротивления [4–7]. Нелинейный рост GF с увеличением деформации (с 24 при 0,5% до 50,7 при 1,5%) подтверждает этот механизм, указывая на прогрессирующее повреждение проводящей сети.

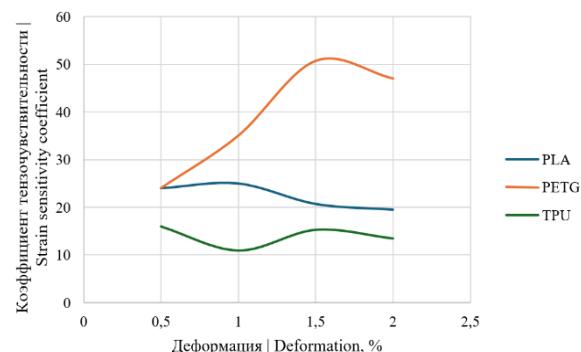


Рисунок 2. Зависимость коэффициента тензочувствительности от деформации образцов

Figure 2. Dependence of the strain sensitivity coefficient on the deformation of the samples

Композит PLA + PEDOT : PSS демонстрирует умеренную и достаточно стабильную тензочувствительность со средним GF ≈ 22,3 (график 2). Его поведение носит более линейный характер по сравнению с PETG, что может быть связано с иным характером взаимодействия PEDOT:PSS с поверхностью PLA. Возможно,

на поверхности PLA формируется менее хрупкий и более устойчивый к образованию макротрешин проводящий слой, что приводит к более плавному изменению сопротивления [8].

Композит TPU + PEDOT : PSS обладает наименьшей чувствительностью к деформации ($GF_{cp} \approx 13.9$) (график 2). Это полностью согласуется с эластомерной природой TPU. Гибкая и растяжимая матрица эффективно поглощает механическую деформацию, минимизируя передачу нагрузок на хрупкий проводящий слой PEDOT:PSS. В результате проводящая сеть испытывает меньшие повреждения, что приводит к меньшему изменению сопротивления. Стоит отметить немонотонное изменение GF для TPU ($16.0 \rightarrow 11.0 \rightarrow 15.3 \rightarrow 13.5$), что может быть связано с комплексной перестройкой как проводящего слоя, так и самой полимерной матрицы при деформации [9].

Нагрев всех образцов при подаче напряжения 70 В оказался незначительным ($\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$), что является прямым следствием их высокого удельного сопротивления. Несмотря на то, что образец PETG + PEDOT : PSS обладал наименьшим сопротивлением и, следовательно, в нем рассеивалась наибольшая мощность (~0.29 Вт), его нагрев оказался минимальным ($\Delta T = 0.5^{\circ}\text{C}$). Это может объясняться лучшей теплопроводностью материала PETG по сравнению с PLA и TPU, что способствовало более эффективному отводу тепла в держатель и окружающую среду (график 3) [10–11].

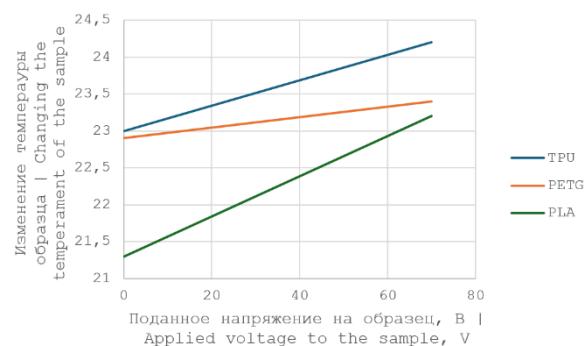


Рисунок 3. Изменение температуры образцов, °C от напряжения, В

Figure 3. Change in sample temperature, °C, with voltage, V

Наибольший нагрев наблюдался у образца PLA + PEDOT : PSS ($\Delta T = 1.9^{\circ}\text{C}$), хотя рассеиваемая мощность в нем была крайне мала (~0.008 Вт). Это указывает на очень низкую эффективность теплоотвода в данной системе, возможно, из-за особенностей контакта с держателем и низкой теплопроводности самого PLA.

Образец TPU + PEDOT : PSS показал промежуточное значение $\Delta T = 1.2^{\circ}\text{C}$ при очень

низкой рассеиваемой мощности. Низкая теплопроводность эластомера TPU способствует удержанию тепла в зоне проводящего слоя.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в текущей конфигурации композиты не могут эффективно использоваться в качестве активных нагревательных элементов, требующих значительного тепловыделения. Однако эксперимент подтвердил целостность проводящих путей и способность материалов выдерживать приложенное электрическое поле без пробоя, что важно для их применения в гибкой электронике, где возможны умеренные токовые нагрузки [12].

Заключение

В ходе комплексного исследования функциональных свойств электропроводящих композитов на основе 3D-печатных полимеров, модифицированных PEDOT:PSS, получены следующие основные результаты. Все исследованные композиты обладают выраженным пьезорезистивным эффектом. Количественно оценена их тензочувствительность путем расчета коэффициента Gauge Factor (GF). Наибольшей чувствительностью к деформации характеризуется композит PETG + PEDOT : PSS, у которого максимальное значение GF достигло ~47–51, а среднее составило 39.2. Это делает его высокоперспективным материалом для создания датчиков деформации и изгиба. Композиты PLA + PEDOT : PSS ($GF_{cp} \approx 22.3$) и TPU + PEDOT : PSS ($GF_{cp} \approx 13.9$) демонстрируют умеренную и низкую тензочувствительность соответственно, что определяется механическими свойствами полимерной матрицы и характером ее взаимодействия с проводящим слоем.

Исследование эффекта Джоулева нагрева при напряжении 70 В показало незначительный рост температуры образцов ($\Delta T = 0.5 – 1.9^{\circ}\text{C}$), что обусловлено высоким удельным сопротивлением поверхностного проводящего слоя. Прямое применение данных материалов в качестве нагревателей малоперспективно, однако подтверждена их стабильность при пропускании электрического тока. Установленные зависимости «деформация–сопротивление» и количественные значения GF являются основой для проектирования сенсорных устройств. Простота технологии получения и использования стандартных материалов 3D-печати открывает широкие возможности для быстрого прототипирования гибкой электроники и интеллектуальных структур с сенсорными функциями.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-00306, <https://tscf.ru/project/25-29-00306/>

Литература

- 1 Zhang X., Yang W., Zhang H. et al. PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors // Nanotechnology and Precision Engineering. 2021. V. 4. P. 045004. doi: 10.1063/10.0006866
- 2 Huang H., Zhao Y., Cong T. et al. Flexible and Alternately Layered High-Loading Film Electrode based on 3D Carbon Nanocoils and PEDOT:PSS for High-Energy-Density Supercapacitor // Advanced Functional Materials. 2022. V. 32. P. 2110777. doi: 10.1002/adfm.202110777
- 3 Cui Y., Zhang F., Chen G. et al. A Stretchable and Transparent Electrode Based on PEGylated Silk Fibroin for In Vivo Dual-Modal Neural-Vascular Activity Probing // Advanced Materials. 2021. V. 33. № 34. P. e2100221. doi: 10.1002/adma.202100221
- 4 Tang H. Research progress on the modification of organic highly conductive polymer PEDOT:PSS // Applied and Computational Engineering. 2023. V. 25. P. 186–191. doi: 10.54254/2755-2721/25/20230757
- 5 Решетилов А.Н., Китова А.Е., Тарасов С.Е. и др. Высокопроводящий полимер ПЭДОТ:ПСС – применение в биомедицинских и биоэлектрохимических системах // РЭНСИТ. 2020. № 4. С. 387–402.
- 6 Abbott J., Ye T., Krenek K. et al. A nanoelectrode array for obtaining intracellular recordings from thousands of connected neurons // Nature Biomedical Engineering. 2019. V. 4. P. 232–241. doi: 10.1038/s41551-019-0455-7
- 7 Melle G., Bruno U., Gallo V. et al. Intracellular recording of human cardiac action potentials on market-available multielectrode array platforms // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2020. V. 8. P. 66. doi: 10.3389/fbioe.2020.00066
- 8 Рожкова К.С., Новиков Д.В., Петрова А.А. и др. Влияние структурных особенностей PEDOT:PSS на транспорт носителей заряда // Передовые технологии и материалы будущего: сборник статей IV Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения 2021» (Минск, 9 декабря 2021 г.). В 3 т. Минск: БГТУ, 2021. Т. 2. С. 151–155.
- 9 Пономаренко В.П., Попов В.С., Попов С.В. Фотозелектроника на основе квазинульмерных структур (обзор) // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 1. С. 25–67.
- 10 Фархутдинов М.М., Фетисов Л.В. Материалы, применяемые для 3D печати в электротехнических устройствах // Современные инновации. 2024. № 2 (45). С. 11–14.
- 11 Аймуханов А.К., Рожкова К.С., Абдигалиева А.М. Влияние модификации полимера PEDOT:PSS на его оптические характеристики // Актуальные проблемы современной физики и смысловой педагогики = Actual problems of modern physics and semantic pedagogy: сборник статей, 2021. С. 45–48.
- 12 Yağci Ö., Özdemir O.K. Improving the electrical conductivity and electrochemical properties of PEDOT:PSS thin films by Ca and Mg doping // Polymer Bulletin. 2022. V. 79. P. 11493–11509. doi: 10.1007/s00289-021-04028-7
- 13 Jain N., Waidi Y.O. The Multifaceted Role of 3D Printed Conducting Polymers in Next-Generation Energy Devices: A Critical Perspective // JACS Au. 2025. V. 5. № 2. P. 411–425. doi: 10.1021/jacsau.4c00796
- 14 Saadi O.W., Khan K.A. Advancements in vat photopolymerization for piezoresistive sensors: materials, mechanisms, and applications // Virtual and Physical Prototyping. 2025. V. 20. № 1. P. e2505994. doi: 10.1080/17452759.2025.2505994
- 15 Baysal H.E., Güner S., Günsel A. et al. Omnidirectional 3D Printing of PEDOT:PSS Aerogels with Tunable Electromechanical Performance: A Playground for Unconventional Stretchable Interconnects and Thermoelectrics // Advanced Science. 2025. V. 12. № 11. P. 2412491.
- 16 Lee B.M., Nguyen Q.H., Shen W. Flexible multifunctional sensors using 3D-printed PEDOT:PSS composites // IEEE Sensors Journal. 2024. V. 24. № 6. P. 7584–7592.
- 17 Fan W., Zhang L., Chen Y. et al. All-3D-Printed PEDOT:PSS-Based Stretchable Thermoelectric Devices for Power Generation // ACS Applied Materials & Interfaces. 2025. V. 17. № 1. P. 1798–1808.
- 18 Iervolino F., Suriano R., Cavallaro M. et al. Additively Manufactured Polymers for Electronic Components // Applied Sciences. 2025. V. 15. № 15. P. 8689.
- 19 Patil I.G., Thakur K., Nath S.S. et al. 3D-printed energy harvesting devices for flexible and wearable electronics // Sustainable Energy & Fuels. 2024. V. 8. № 24. P. 5731–5767.
- 20 Li J., Cao J., Lu B. et al. 3D-printed PEDOT:PSS for soft robotics // Nature Reviews Materials. 2023. V. 8. № 9. P. 604–622.

References

- 1 Zhang X., Yang W., Zhang H. et al. PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors. Nanotechnology and Precision Engineering. 2021. vol. 4. p. 045004. doi: 10.1063/10.0006866
- 2 Huang H., Zhao Y., Cong T. et al. Flexible and Alternately Layered High-Loading Film Electrode based on 3D Carbon Nanocoils and PEDOT:PSS for High-Energy-Density Supercapacitor. Advanced Functional Materials. 2022. vol. 32. p. 2110777. doi: 10.1002/adfm.202110777
- 3 Cui Y., Zhang F., Chen G. et al. A Stretchable and Transparent Electrode Based on PEGylated Silk Fibroin for In Vivo Dual-Modal Neural-Vascular Activity Probing. Advanced Materials. 2021. vol. 33. no. 34. p. e2100221. doi: 10.1002/adma.202100221
- 4 Tang H. Research progress on the modification of organic highly conductive polymer PEDOT:PSS. Applied and Computational Engineering. 2023. vol. 25. pp. 186–191. doi: 10.54254/2755-2721/25/20230757
- 5 Reshetilov A.N., Kitova A.E., Tarasov S.E. et al. Highly conductive polymer PEDOT:PSS – application in biomedical and bioelectrochemical systems. RENSIT. 2020. no. 4. pp. 387–402. (in Russian)
- 6 Abbott J., Ye T., Krenek K. et al. A nanoelectrode array for obtaining intracellular recordings from thousands of connected neurons. Nature Biomedical Engineering. 2019. vol. 4. pp. 232–241. doi: 10.1038/s41551-019-0455-7
- 7 Melle G., Bruno U., Gallo V. et al. Intracellular recording of human cardiac action potentials on market-available multielectrode array platforms. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2020. vol. 8. p. 66. doi: 10.3389/fbioe.2020.00066
- 8 Rozhkova K.S., Novikov D.V., Petrova A.A. et al. The effect of structural features of PEDOT:PSS on charge carrier transport. Advanced technologies and materials of the future: collection of articles of the IV International Scientific and Technical Conference "Minsk Scientific Readings 2021" (Minsk, December 9, 2021). In 3 vols. Minsk: BSTU, 2021. vol. 2. pp. 151–155. (in Russian)

- 9 Ponomarenko V.P., Popov V.S., Popov S.V. Photoelectronics based on quasi-zero-dimensional structures (review). *Advances in Applied Physics*. 2021, vol. 9, no. 1, pp. 25–67. (in Russian)
- 10 Farkhtudinov M.M., Fetisov L.V. Materials used for 3D printing in electrical devices. *Modern Innovations*. 2024, no. 2 (45), pp. 11–14. (in Russian)
- 11 Aimukhanov A.K., Rozhkova K.S., Abdigaliyeva A.M. Effect of polymer PEDOT:PSS modification on its optical characteristics. *Actual problems of modern physics and semantic pedagogy: collection of articles*, 2021, pp. 45–48. (in Russian)
- 12 Yağcı Ö., Özdemir O.K. Improving the electrical conductivity and electrochemical properties of PEDOT:PSS thin films by Ca and Mg doping. *Polymer Bulletin*. 2022, vol. 79, pp. 11493–11509. doi: 10.1007/s00289-021-04028-7
- 13 Jain N., Waidi Y.O. The Multifaceted Role of 3D Printed Conducting Polymers in Next-Generation Energy Devices: A Critical Perspective. *JACS Au*. 2025, vol. 5, no. 2, pp. 411–425. doi: 10.1021/jacsau.4c00796
- 14 Saadi O.W., Khan K.A. Advancements in vat photopolymerization for piezoresistive sensors: materials, mechanisms, and applications. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025, vol. 20, no. 1, p. e2505994. doi: 10.1080/17452759.2025.2505994
- 15 Baysal H.E., Güner S., Günsel A. et al. Omnidirectional 3D Printing of PEDOT:PSS Aerogels with Tunable Electromechanical Performance: A Playground for Unconventional Stretchable Interconnects and Thermoelectrics. *Advanced Science*. 2025, vol. 12, no. 11, p. 2412491.
- 16 Lee B.M., Nguyen Q.H., Shen W. Flexible multifunctional sensors using 3D-printed PEDOT:PSS composites. *IEEE Sensors Journal*. 2024, vol. 24, no. 6, pp. 7584–7592.
- 17 Fan W., Zhang L., Chen Y. et al. All-3D-Printed PEDOT:PSS-Based Stretchable Thermoelectric Devices for Power Generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 1798–1808.
- 18 Iervolino F., Suriano R., Cavallaro M. et al. Additively Manufactured Polymers for Electronic Components. *Applied Sciences*. 2025, vol. 15, no. 15, p. 8689.
- 19 Patil I.G., Thakur K., Nath S.S. et al. 3D-printed energy harvesting devices for flexible and wearable electronics. *Sustainable Energy & Fuels*. 2024, vol. 8, no. 24, pp. 5731–5767.
- 20 Li J., Cao J., Lu B. et al. 3D-printed PEDOT: PSS for soft robotics. *Nature Reviews Materials*. 2023, vol. 8, no. 9, pp. 604–622.

Сведения об авторах

Антонина А. Филимонова д.т.н., доцент, зав. кафедрой, кафедра автономная распределённая энергетика, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, aachichirova@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6238-188X>

Алена Ю. Власова к.т.н., доцент, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, vlasovaay@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8520-5432>

Рузина Ф. Камалиева студент., инженер, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, rruzzii@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0001-0427-9358>

Егор С. Майоров студент., инженер, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, mes.tegatu@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0006-3925-1458>

Андрей А. Филимонов студент, лаборант-исследователь, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, vip.jokermigel@m.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-8251-5267>

Вклад авторов

Антонина А. Филимонова консультация в ходе исследования
Алена Ю. Власова предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

Рузина Ф. Камалиева консультация в ходе исследования
Егор С. Майоров обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Андрей А. Филимонов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за plagiat

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Antonina A. Filimonova Dr. Sci. (Engin.), assistant professor, Head of the Department of Autonomous Distributed Energy, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, aachichirova@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6238-188X>

Alyona Yu. Vlasova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, vlasovaay@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8520-5432>

Ruzina F. Kamalieva student, research engineer, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, rruzzii@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0001-0427-9358>

Egor S. Mayorov student, research engineer, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, mes.tegatu@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0006-3925-1458>

Andrey A. Filimonov student, laboratory researcher, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, vip.jokermigel@m.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-8251-5267>

Contribution

Antonina A. Filimonova consultation during the study

Alyona Yu. Vlasova proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Ruzina F. Kamalieva consultation during the study

Egor S. Mayorov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Andrey A. Filimonov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 19/08/2025	После редакции 26/08/2025	Принята в печать 04/09/2025
Received 19/08/2025	Accepted in revised 26/08/2025	Accepted 04/09/2025