






## Создание электропроводящего композита с полимерными материалами для 3D-печати на основе поверхностной модификации






Антонина А. Филимонова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:aachichirova@mail.ru">aachichirova@mail.ru</a>	 0000-0001-6238-188X
Алена Ю. Власова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vlasovaay@mail.ru">vlasovaay@mail.ru</a>	 0000-0001-8520-5432
Рузина Ф. Камалиева	<sup>1</sup>	<a href="mailto:rruzzi@yandex.ru">rruzzi@yandex.ru</a>	 0009-0001-0427-9358
Егор С. Майоров	<sup>1</sup>	<a href="mailto:mes.tegatu@gmail.com">mes.tegatu@gmail.com</a>	 0009-0006-3925-1458
Андрей А. Филимонов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vip.jokermigel@m.ru">vip.jokermigel@m.ru</a>	 0009-0000-8251-5267

<sup>1</sup> Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия

**Аннотация.** В работе рассмотрена задача придания электропроводящих свойств стандартным полимерным материалам для 3D-печати методом поверхностной модификации. Объектами исследования являлись полилактид, полиэтилентерефталатгликоль и термопластичный полиуретан. В качестве модификатора использован проводящий полимерный комплекс поли(3,4-этилендиокситиофен) поли(стиролсульфонат) (PEDOT:PSS). Метод модификации включал пропитку образцов водной дисперсией PEDOT:PSS с последующей термообработкой. Электрические характеристики композитов определяли путем измерения сопротивления и расчета удельной электропроводности. Установлено, что поверхностная модификация приводит к увеличению электропроводности полимеров на 12–14 порядков по сравнению с исходными диэлектрическими материалами. Максимальная удельная электропроводность достигнута для композита полиэтилентерефталатгликоль + PEDOT:PSS и составила  $9.26 \times 10^{-2}$  См/м. Для полилактида значение электропроводности равно  $2.73 \times 10^{-3}$  См/м, для термопластичного полиуретана –  $3.97 \times 10^{-6}$  См/м, что связано с особенностями структуры и смачиваемости поверхности. Определены оптимальные технологические параметры процесса: время ультразвуковой обработки 30 минут и температура сушки 100 °С. Показано, что разбавление дисперсии водой снижает проводимость, а введение органических растворителей в модификатор неэффективно. Выявлен синергетический эффект при сочетании объемного наполнения полилактида многостенными углеродными нанотрубками и поверхностной модификации PEDOT:PSS, при этом максимальная проводимость наблюдается при содержании 7 % нанотрубок. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенного метода для создания функциональных электропроводящих элементов аддитивного производства.

**Ключевые слова:** электропроводящий композит, 3D-печать, PEDOT:PSS, удельная проводимость, полимерная матрица, поверхностная модификация.

## Creation of an electrically conductive composite with polymer materials for 3D-printing based on surface modification

Antonina A. Filimonova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:aachichirova@mail.ru">aachichirova@mail.ru</a>	 0000-0001-6238-188X
Alyona Yu. Vlasova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vlasovaay@mail.ru">vlasovaay@mail.ru</a>	 0000-0001-8520-5432
Ruzina F. Kamalieva	<sup>1</sup>	<a href="mailto:rruzzi@yandex.ru">rruzzi@yandex.ru</a>	 0009-0001-0427-9358
Egor S. Mayorov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:mes.tegatu@gmail.com">mes.tegatu@gmail.com</a>	 0009-0006-3925-1458
Andrey A. Filimonov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vip.jokermigel@m.ru">vip.jokermigel@m.ru</a>	 0009-0000-8251-5267

<sup>1</sup> Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia

**Abstract.** The study addresses the problem of imparting electrical conductivity to conventional polymer materials for 3D printing by means of surface modification. Polylactide, polyethylene terephthalate glycol, and thermoplastic polyurethane were used as the polymer matrices. The conductive polymer complex poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) was applied as a surface modifier. The modification procedure consisted of impregnating polymer samples with an aqueous PEDOT:PSS dispersion followed by thermal treatment. Electrical properties of the obtained composites were evaluated by measuring resistance and calculating specific electrical conductivity. Surface modification was shown to increase the conductivity of the polymers by 12–14 orders of magnitude compared to the initial dielectric materials. The highest specific conductivity was achieved for the polyethylene terephthalate glycol + PEDOT:PSS composite and reached  $9.26 \times 10^{-2}$  S/m. The conductivity of the polylactide-based composite was  $2.73 \times 10^{-3}$  S/m, while thermoplastic polyurethane exhibited the lowest value of  $3.97 \times 10^{-6}$  S/m, which is attributed to the structural features and reduced wettability of the elastomer surface. Optimal processing parameters were established as 30 minutes of ultrasonic treatment and a drying temperature of 100 °C. Dispersion dilution with water was found to reduce electrical conductivity, whereas the addition of organic solvents to the modifier was ineffective. A synergistic effect was revealed when combining bulk filling of polylactide with multiwalled carbon nanotubes and subsequent surface modification with PEDOT:PSS, with maximum conductivity observed at a nanotube content of 7 %. The results demonstrate the practical potential of the proposed method for manufacturing electrically conductive functional components using additive manufacturing technologies.

**Keywords:** electrically conductive composite, 3D-printing, PEDOT:PSS, specific conductivity, polymer matrix, surface modification.

### Для цитирования

Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф., Майоров Е.С., Филимонов А.А. Создание электропроводящего композита с полимерными материалами для 3D-печати на основе поверхностной модификации // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 241–248. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-241-248

### For citation

Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Kamalieva R.F., Mayorov E.S., Filimonov A.A. Creation of an electrically conductive composite with polymer materials for 3D-printing based on surface modification. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 241–248. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-241-248

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

## Введение

Внедрение аддитивных технологий в промышленность стимулирует поиск простых и эффективных методов функционализации полимерных материалов, в частности придания им электропроводящих свойств.

Традиционные подходы, рассмотренные в предыдущих исследованиях, включают введение в полимерную матрицу углеродных наполнителей (графит, графен, углеродные нанотрубки) или металлических порошков. Однако эти методы часто сопряжены с технологическими сложностями, такими как необходимость обеспечения равномерного распределения наполнителя, агрегация частиц и ухудшения механических свойств при высоких концентрациях.

Альтернативным перспективным направлением является использование проводящих полимеров, которые могут формировать проводящие слои на поверхности или в объёме материала. Одним из наиболее стабильных и технологичных проводящих полимеров является комплекс PEDOT:PSS, обладающий высокой проводимостью, прозрачностью в видимом диапазоне и хорошей адгезией к различным подложкам.

**Цель работы** – оценка эффективности поверхностной модификации стандартных полимеров для 3D-печати (PLA, PETG, TPU) проводящим комплексом PEDOT:PSS.

Основная задача заключалась в сравнительном анализе удельной электропроводности полученных композитов и демонстрации значительного улучшения их электропроводящих свойств по сравнению с исходными диэлектрическими материалами.

## Материалы и методы

В работе исследовались образцы полимерных материалов, широко используемых в 3D-печати: полилактид (PLA) белого цвета, полиэтилентерефталатгликоль (PETG) красного цвета и термопластичный полиуретан (TPU) чёрного цвета. Также изучались пластины на основе PLA с 10; 7; 5; 2 и 0,5% содержанием многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), полученные методом литья из раствора. Геометрические параметры всех образцов, включая толщину и диаметр, контролировались с помощью микрометра «Mechanic 150 PRO» с точностью  $\pm 0,001$  мм. Площадь поперечного сечения рассчитывалась стандартными методами на основе измеренных геометрических параметров.

В таблице 1 представлены характеристики используемых образцов для поверхностной модификации.

Таблица 1.  
Характеристики используемых в работе полимеров

Table 1.

Characteristics of polymers used in work

Полимер Polymer	Толщина, мм Thickness, mm	Диаметр, мм Diameter, mm	Площадь сечения, мм <sup>2</sup> Cross-sectional area, mm <sup>2</sup>
PETG	4.40	1.78	2.796
TPU	5.78	1.69	2.654
PLA	4.80	1.76	2.764
PLA + % МУНТ	0.10	-	105.307

В качестве модификатора использовалась коммерческая водная дисперсия проводящего полимерного комплекса PEDOT:PSS. Процесс модификации включал две последовательные стадии: перемешивания и термообработку. Пропитка проводилась путём полного погружения образцов в 20 мл дисперсии PEDOT:PSS на 30 минут при постоянном перемешивании ультразвуковым гомогенизатором «Санслар». Термообработка осуществлялась в сушильном шкафу при температуре 100 °C в течение 60 минут.

Электрические характеристики полученных композитов исследовались с помощью измерителя иммитанса E7–20 и универсального мультиметра APPA 501. По следующей методике образец размещали в ячейку, представляющую собой керамический каркас с резьбой, на которую накручивали проводники, образец зажимали между проводниками, тем самым замыкая цепь, проводники при помощи клемм присоединяли к рабочим разъёмам измерителя иммитанса, в результате чего определяли комплексное сопротивление образца. Определение комплексной проводимости производили при частоте 1 кГц. Для каждого образца проводилась серия из 5 измерений в различных точках с последующим расчётом среднего арифметического значения.

Удельное сопротивление  $\rho$  определялось по формуле

$$\rho = RS/l, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом×см;  $R$  – измеренное сопротивление, Ом;  $S$  – площадь контакта образца с проводниками, м<sup>2</sup>;  $l$  – толщина образца.

Удельная электропроводность рассчитывалась по формуле

$$\sigma = 1/\rho, \quad (2)$$

Для определения влияния ключевых технологических параметров на конечную электропроводность композитов был проведён ряд дополнительных серий экспериментов.

Влияние времени перемешивания – образцы каждого полимера погружались в дисперсию PEDOT:PSS и обрабатывались ультразвуковым гомогенизатором в течение 0; 5; 15; 30; 60 и 120 минут с последующей сушкой при 100 °С.

Влияние температуры сушки – образцы, обработанные в дисперсии в течение 30 минут, подвергались сушке при температурах 60; 80 и 100 °С.

Влияние разбавления дисперсии – исходная дисперсия PEDOT:PSS разбавлялась деионизированной водой в объёмных соотношениях 1:1, 1:2 и 1:4. Обработка образцов в полученных растворах проводилась в течение 30 минут с сушкой при 100 °С.

Влияние добавок в состав поверхностного модификатора – были проведены испытания по добавлению в дисперсию PEDOT:PSS по 5% растворителей, таких как диметилсульфоксид, этиленгликоль и глицерин.

Также было проведено исследование образцов, включающих МУНТ. Исследовались образцы композита PLA с объёмным содержанием МУНТ (0,5; 2; 5; 7 и 10%), дополнительно модифицированные PEDOT:PSS по стандартной методике (30 минут перемешивания, сушка при 100°C).

### Результаты

После проведения поверхностной модификации стандартных полимерных материалов (PLA, PETG, TPU) по базовой методике (30 минут перемешивания и сушка при 100 °С) были получены следующие значения удельного сопротивления и проводимости (таблица 2).

Таблица 2.

Электрические характеристики композитов после модификации PEDOT:PSS при условиях 30 мин перемешивания и сушки при 100 °С

Table 2.

Electrical characteristics of composites after PEDOT:PSS modification under 30 min of stirring and drying at 100 °C

Материал Material	Сопротивление, Ом Resistance, Ом	Удельная проводимость, См/м Specific conductivity, S/m
PETG + PEDOT : PSS	$1.70 \times 10^4$	$9.26 \times 10^{-2}$
PLA + PEDOT : PSS	$6.35 \times 10^5$	$2.73 \times 10^{-3}$
TPU + PEDOT : PSS	$5.49 \times 10^8$	$3.97 \times 10^{-6}$
PLA + 10.0% + PEDOT : PSS	$1.63 \times 10^3$	$5.84 \times 10^{-4}$
PLA + 7.0% МУНТ + PEDOT : PSS	$1.51 \times 10^3$	$6.82 \times 10^{-4}$
PLA + 5.0% МУНТ + PEDOT : PSS	$1.49 \times 10^3$	$6.02 \times 10^{-4}$
PLA + 2.0% МУНТ + PEDOT : PSS	$2.30 \times 10^3$	$1.29 \times 10^{-4}$
PLA + 0.5% МУНТ + PEDOT : PSS	$4.8 \times 10^6$	$3.16 \times 10^{-6}$

Результаты измерения удельной проводимости в зависимости от времени ультразвукового перемешивания представлены в таблице 3. Для всех полимеров наблюдается значительный рост проводимости при увеличении времени обработки от 0 до 30 минут с последующей стабилизацией показателей.

Таблица 3.

Зависимость удельной проводимости от времени перемешивания

Table 3.

Dependence of specific conductivity on mixing time

Время перемешивания, мин Mixing time, min	Удельная проводимость, См/м Specific conductivity, S/m		
	PLA	PETG	TPU
0	$4.10 \times 10^{-7}$	$5.16 \times 10^{-3}$	$1.47 \times 10^{-8}$
5	$5.20 \times 10^{-6}$	$2.15 \times 10^{-4}$	$2.32 \times 10^{-7}$
15	$1.53 \times 10^{-5}$	$6.89 \times 10^{-3}$	$3.01 \times 10^{-6}$
30	$4.80 \times 10^{-5}$	$9.26 \times 10^{-2}$	$3.97 \times 10^{-6}$
60	$4.96 \times 10^{-5}$	$9.14 \times 10^{-2}$	$3.50 \times 10^{-6}$
120	$4.95 \times 10^{-5}$	$9.30 \times 10^{-2}$	$3.84 \times 10^{-6}$

Измерения электропроводности после сушки при различных температурах показали выраженную зависимость данного параметра от термического режима (таблица 4). Для PLA и PETG наблюдается монотонный рост проводимости с повышением температуры, тогда как для TPU оптимальной является температура 80 °С.

Таблица 4.

Влияние температуры сушки на удельную проводимость

Table 4.

Effect of drying temperature on specific conductivity

Сушка, °С Drying	Удельная проводимость, См/м Specific conductivity, S/m		
	PLA	PETG	TPU
60	$3.34 \times 10^{-6}$	$8.30 \times 10^{-2}$	$2.36 \times 10^{-7}$
80	$4.68 \times 10^{-6}$	$9.16 \times 10^{-2}$	$3.97 \times 10^{-6}$
100	$4.80 \times 10^{-5}$	$9.26 \times 10^{-2}$	$3.80 \times 10^{-6}$

Разбавление исходной дисперсии деионизированной водой в различных соотношениях продемонстрировало обратную зависимость между степенью разбавления и удельной проводимостью полученных композитов. (Таблица 5). Нужно отметить, что добавка растворителей в дисперсию не дала положительных результатов, удельная проводимость образцов резко снизилась до значений обычных пластиков.

Таблица 5.

Влияние разбавления дисперсии на удельную проводимость

Table 5.

Effect of dispersion dilution on specific conductivity

Концентрация воды к PEDOT:PSS Water concentration to PEDOT:PSS	Удельная проводимость, См/м Specific conductivity, S/m		
	PLA	PETG	TPU
1:4	$1.24 \times 10^{-5}$	$3.69 \times 10^{-2}$	$2.71 \times 10^{-6}$
1:2	$4.68 \times 10^{-6}$	$8.34 \times 10^{-2}$	$7.64 \times 10^{-7}$
1:1	$5.38 \times 10^{-7}$	$6.36 \times 10^{-3}$	$6.32 \times 10^{-8}$

## Обсуждение

Исследование композитов PLA с различным содержанием мУНТ, дополнительно модифицированных PEDOT:PSS, выявило нелинейную зависимость удельной проводимости от концентрации углеродных нанотрубок (рисунок 1). Максимальное значение проводимости зафиксировано при содержании 7% мУНТ.

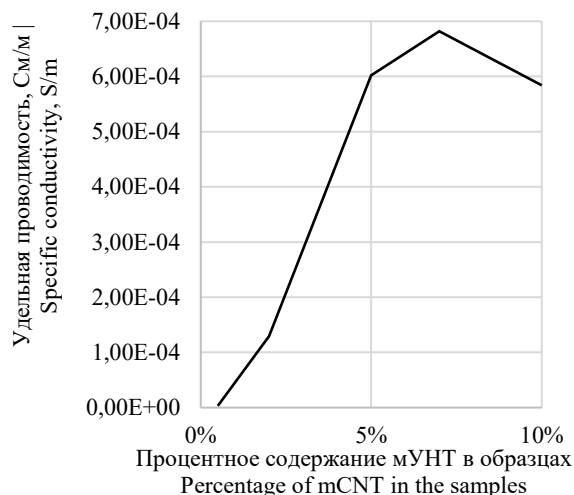


Рисунок 1. Зависимость удельной проводимости образцов от содержания мУНТ

Figure 1. Dependence of the specific conductivity of samples on the content of multi-walled carbon nanotubes

Также стоит отметить, что добавки растворителей в дисперсию не дали положительного результата, свойства проводимости образцов приблизились к начальным значениям.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность поверхностной модификации PEDOT:PSS для придания электропроводящих свойств полимерным материалам. Наибольшая удельная проводимость зафиксирована для композита PETG + PEDOT : PSS ( $9,26 \times 10^{-2}$  См/м), что на 12–14 порядков превышает проводимость исходного диэлектрика. Столь значительное улучшение электрофизических характеристик связано с формированием непрерывного проводящего слоя на поверхности полимера после коалесценции части PEDOT:PSS в процессе сушки [1–2].

Сравнительно низкая проводимость TPU ( $3,97 \times 10^{-6}$  См/м) объясняется гидрофобной природой эластомера, затрудняющей смачивание и адсорбцию водной дисперсии [3].

Зависимость проводимости от времени перемешивания (рисунок 2) имеет характерный вид с выходом на насыщение после 30 минут обработки. Начальный рост обусловлен улучшением смачивания поверхности и диффузией дисперсии в поверхностный слой полимера. Достижение плато свидетельствует о завершении формирования равномерного проводящего слоя, при этом дальнейшая обработка не приводит к существенному улучшению характеристик [4–5].

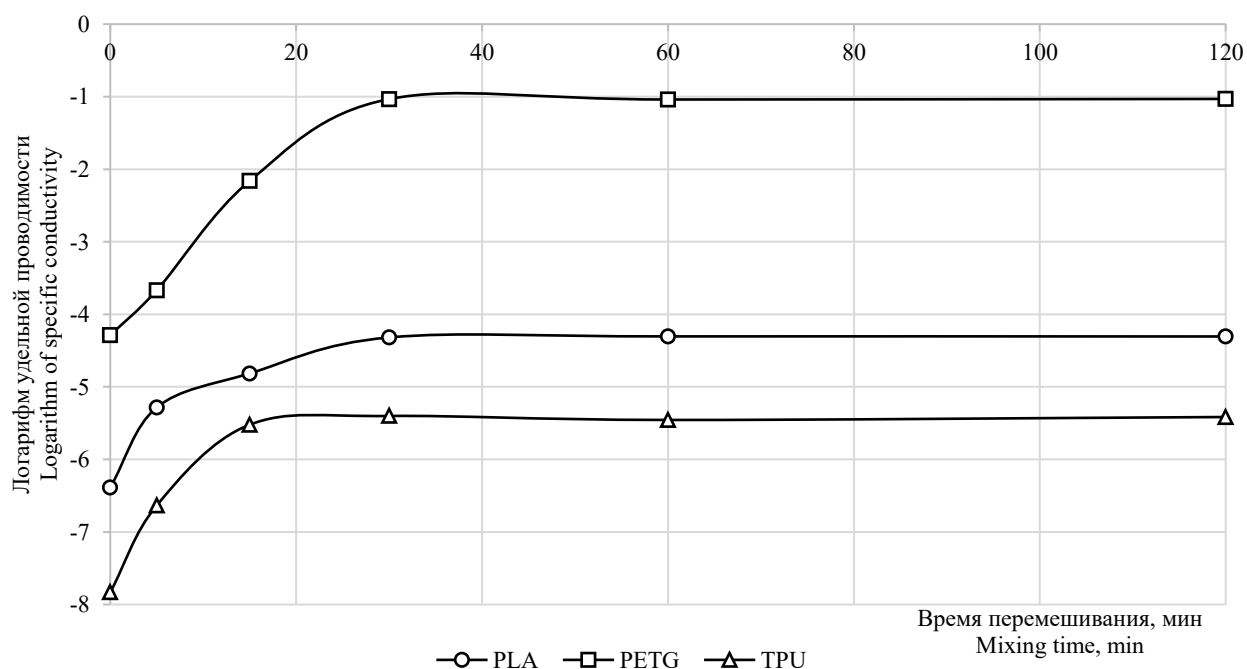


Рисунок 2. Зависимость логарифма удельной проводимости от времени перемешивания

Figure 2. Dependence of the logarithm of specific conductivity on mixing time

Температурный режим сушки оказался критическим параметром (рисунок 3). Рост проводимости при повышении температуры до 100 °С для PLA и PETG связан с более полным удалением воды и улучшением морфологии проводящего слоя [6–7]. Для TPU оптимальной является температура 80 °С, что, вероятно, обусловлено ограниченной термостабильностью эластомера и возможной деградацией проводящего слоя при более высоких температурах [8].

Разбавление дисперсии водой приводит к ожидаемому снижению проводимости (рисунок 4) вследствие уменьшения концентрации проводящей фазы. Однако при умеренном разбавлении (1:4) для PETG сохраняется достаточно высокая проводимость ( $3,69 \times 10^{-2}$  См/м), что может быть использовано для оптимизации расхода реагента в практических приложениях [9].

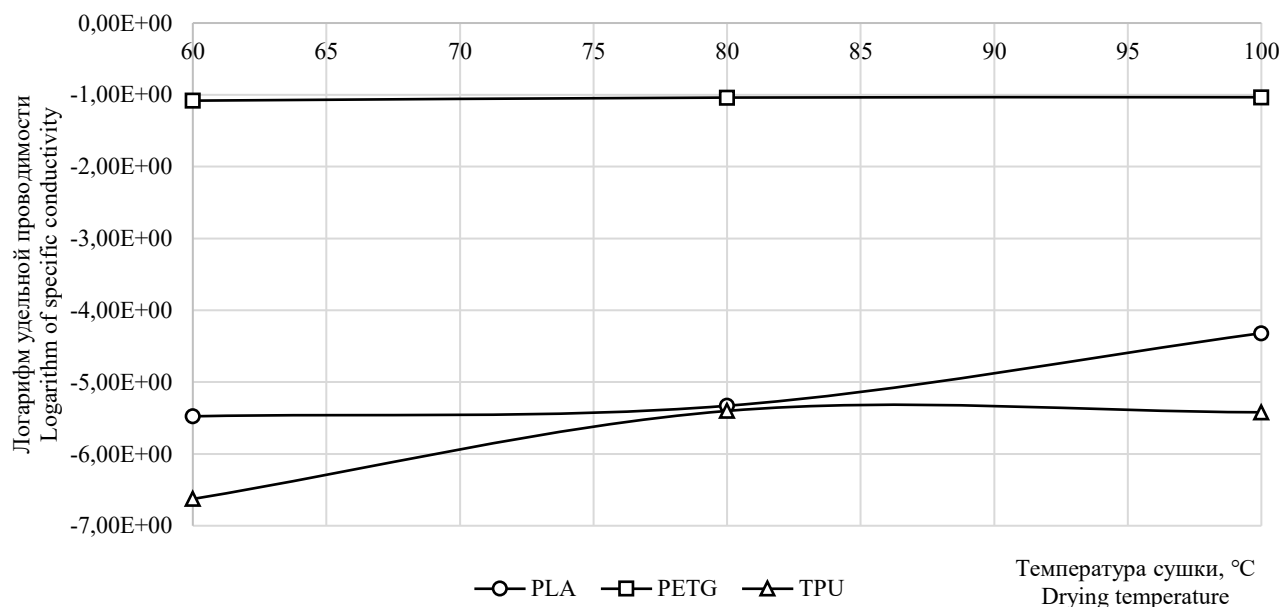


Рисунок 3. Зависимость логарифма удельной проводимости от температуры сушки

Figure 3. Dependence of the logarithm of specific conductivity on the drying temperature

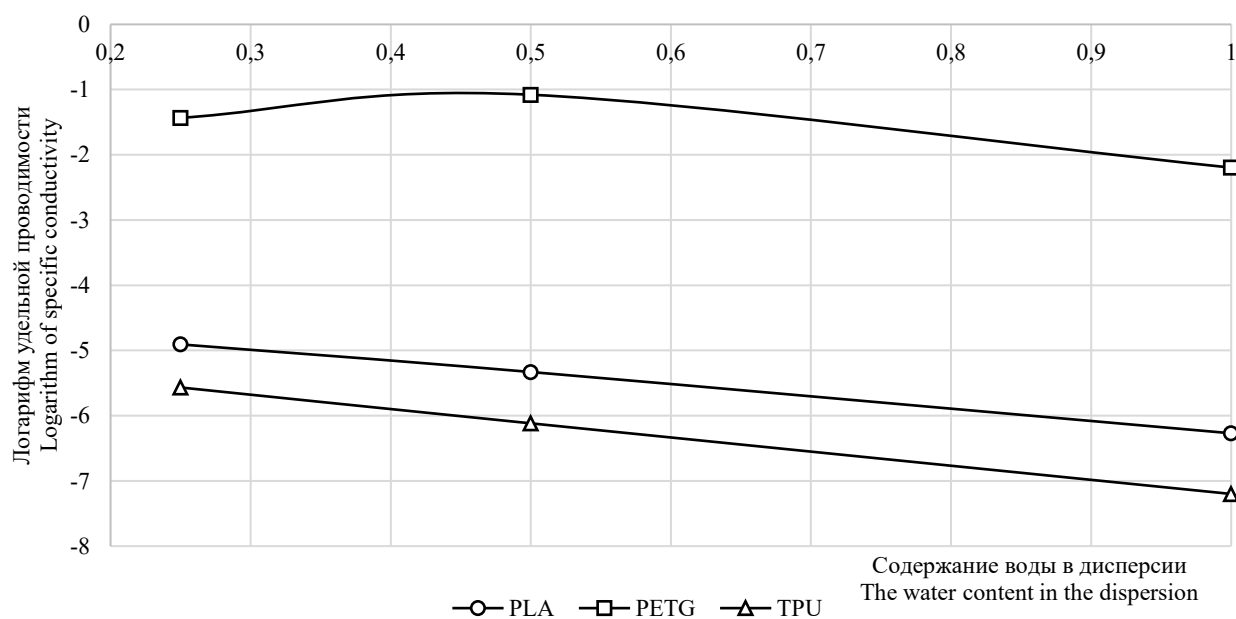


Рисунок 4. Зависимость логарифма удельной проводимости от содержания воды в дисперсии

Figure 4. Dependence of the logarithm of specific conductivity on the water content in the dispersion

Исследование гибридных композитов PLA + мУНТ + PEDOT : PSS выявило наличие синергетического эффекта (график 1). Максимальная проводимость достигается при содержании 7% мУНТ, что на два порядка превышает проводимость образца PLA + PEDOT : PSS. Полученная зависимость носит немонотонный характер со снижением проводимости при дальнейшем увеличении содержания нанотрубок. Наблюдаемый эффект может быть объяснён формированием гибридной проводящей сети, где PEDOT:PSS выполняет функцию проводящих мостиков между агломератами и мУНТ [10]. Снижение проводимости при содержании 10% мУНТ возможно связано с образованием изолирующих прослоек полимера между объёмной и поверхностной проводящими фазами, а также с увеличением вязкости системы, затрудняющей формирование непрерывной проводящей сети.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности комбинированного подхода, сочетающего объёмное и поверхностное наполнение для создания высокоэффективных электропроводящих полимерных композитов [11–12].

### Заключение

В ходе комплексного исследования установлена высокая эффективность поверхностной модификации полимеров PLA, PETG и TPU дисперсией PEDOT:PSS для создания электропроводящих композитов. Метод позволяет увеличить удельную электропроводность материалов на 12–14 порядков по сравнению с исходными диэлектриками.

Определены оптимальные параметры процесса, обеспечивающие максимальную проводимость: время ультразвуковой обработки в дисперсии – 30 минут, (0.0926 См/м). Для эластомера TPU метод показал наименьшую эффективность, что связано с особенностями его поверхности. температура сушки – 100°C. Показано, что разбавление дисперсии водой приводит к снижению проводимости, однако может быть использовано для экономии реагентов.

Наибольшая удельная проводимость достигнута для композита PETG + PEDOT : PSS.

Выявлен синергетический эффект при совместном использовании объёмного наполнителя (мУНТ) и поверхностного покрытия (PEDOT:PSS). Максимальная проводимость гибридного материала PLA + 7% мУНТ + PEDOT : PSS (0.000682 См/м) значительно превосходит проводимость композитов только с мУНТ или только с PEDOT:PSS.

Полученные результаты и оптимизированные технологические параметры открывают широкие возможности для практического применения метода в быстром прототипировании гибкой электроники, сенсоров и функциональных элементов устройств с использованием стандартных материалов для 3D-печати.

### Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-00306, <https://rscf.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. № 43. 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 Решетиллов 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., Krennek 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 Dipalo M., Amin H., Lovato L. et al. Intracellular and extracellular recording of spontaneous action potentials in mammalian neurons and cardiac cells with 3D plasmonic nanoelectrodes // *Nano Letters*. 2017. V. 17. P. 3932–3939. doi: 10.1021/acs.nanolett.7b01523
- 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. Фотоэлектроника на основе квазиульмерных структур (обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2021. Т. 9. № 1. С. 25–67.
- 10 Бадьин А.В., Сидоренко С.В., Григорьев В.П. и др. Полимерные электропроводящие материалы для применения в технологии 3D-печати изделий СВЧ и КВЧ техники. [Город]: [Издательство], 2023. 25 с. (Примечание редактора: Необходимо уточнить тип издания (монография, отчет), город и издательство).

- 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. [Город]: [Издательство], 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 Фархутдинов М.М., Фетисов Л.В. Материалы, применяемые для 3D печати в электротехнических устройствах // Современные инновации. 2024. № 2 (45). С. 11–14.
- 14 Лоцицкая А.В., Утехин А.Н., Кондратов А.П. Электропроводящие полимерные композиты на эластичной волокнистой основе // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85. № 2. С. 237–246.
- 15 Кондратова В.М., Орлов А.С., Кузнецова Е.Д. и др. Особенности электропроводности изделий, изготовленных с помощью 3D-печати методом FFF из саженаполненной полимерной композиции // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 688–693.
- 16 Каблов Е.Н., Антипов В.В., Алексеев А.А. и др. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). С. 32–51.
- 17 Mahato S.K., Patel D., Kumar R. et al. Material selection considerations for 3D printing of electrically conductive polymer composites: A review // Materials Today: Proceedings. 2024. V. 113. P. 25–32.
- 18 Yuk H., Lu B., Lin S. et al. 3D printing of conducting polymers // Nature Communications. 2020. V. 11. P. 1604.
- 19 Tran C.M., Yue Z., Qin C. et al. 3D Printing of Conducting Polymer Hydrogels for Electrostimulation-Assisted Tissue Engineering // Advanced Materials. 2025. V. 37. № 36. P. 2507779.
- 20 Distler T., Boccaccini A.R. 3D printing of electrically conductive hydrogels for tissue engineering and biosensors – A review // Acta Biomaterialia. 2020. V. 101. P. 1–13.
- 21 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., Xie M., Duan X. PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors. Nanotechnology and Precision Engineering. 2021. vol. 4. no. 4. p. 045004. doi: 10.1063/1.50006866
- 2 Huang H., Zhao Y., Cong T., Li C., Wen N., Zuo X., Guo Y., Zhang H., Fan Z., Pan L. 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. no. 18. p. 2110777. doi: 10.1002/adfm.202110777
- 3 Cui Y., Zhang F., Chen G., Yao L., Zhang N., Liu Z., Li Q., Zhang F., Cui Z., Zhang K., Li P., Cheng Y., Zhang S., Chen X. 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. 2100221. 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., Plekhanova Yu.V., Bykov A.G., Sandramorti A.K., Kuznetsova I.E., Kolesov V.V., Gotovtsev P.M. Highly conductive polymer PEDOT:PSS – application in biomedical and bioelectrochemical systems. RENSIT. 2020. no. 4. (in Russian)
- 6 Abbott J., Ye T., Krenek K., Gertner R.S., Ban S., Kim Y. et al. A nanoelectrode array for obtaining intracellular recordings from thousands of connected neurons. Nature Biomedical Engineering. 2019. vol. 4. no. 2. pp. 232–241. doi: 10.1038/s41551-019-0455-7
- 7 Dipalo M., Amin H., Lovato L., Moia F., Caprettini V., Messina G.C. et al. Intracellular and extracellular recording of spontaneous action potentials in mammalian neurons and cardiac cells with 3D plasmonic nanoelectrodes. Nano Letters. 2017. vol. 17. no. 6. pp. 3932–3939. doi: 10.1021/acs.nanolett.7b01523
- 8 Rozhkova K.S. et al. The effect of structural features of PEDOT:PSS on charge carrier transport. Advanced technologies and materials of the future: proceedings 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 Badin A.V. et al. Polymer electrically conductive materials for use in 3D printing technology for products of microwave and EHF equipment. 2023. (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. 2021. pp. 45–48. (in Russian)
- 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. vol. 79. no. 12. pp. 11493–11509. doi: 10.1007/s00289-021-04028-7
- 13 Farkhutdinov M.M., Fetisov L.V. Materials used for 3D printing in electrical devices. Modern Innovations. 2024. no. 2 (45). pp. 11–14. (in Russian)
- 14 Lozitskaya A.V., Utekhin A.N., Kondratov A.P. Electrically conductive polymer composites on an elastic fibrous base. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2023. vol. 85. no. 2. pp. 237–246. (in Russian)
- 15 Kondratova V.M. et al. Features of electrical conductivity of products manufactured using 3D printing by FFF method from carbon black-filled polymer composite. Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. 2023. no. 11. pp. 688–693. (in Russian)


- 16 Kablov E.N. et al. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Proceedings of VIAM*. 2022. no. 2 (108). pp. 32–51. (in Russian)
- 17 Mahato S.K. et al. Material selection considerations for 3D printing of electrically conductive polymer composites: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2024. vol. 113. pp. 25–32.
- 18 Yuk H., Lu B., Lin S. et al. 3D printing of conducting polymers. *Nature Communications*. 2020. vol. 11. no. 1. p. 1604.
- 19 Tran C.M., Yue Z., Qin C. et al. 3D Printing of Conducting Polymer Hydrogels for Electrostimulation-Assisted Tissue Engineering. *Advanced Materials*. 2025. vol. 37. no. 36. p. 2507779.
- 20 Distler T., Boccaccini A.R. 3D printing of electrically conductive hydrogels for tissue engineering and biosensors—A review. *Acta Biomaterialia*. 2020. vol. 101. pp. 1–13.
- 21 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, ruzzi@yandex.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, лаборат.-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 плагиат

#### 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, ruzzi@yandex.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