

Received: 31.01.2026

Revised: 02.04.2026



Accepted: 24.04.2026



DOI: 10.17804/2410-9908.2026.2.006-018



STUDYING THE EFFECT OF PRINT ORIENTATION ON THE POISSON RATIO OF ADDITIVELY MANUFACTURED BIOCOMPATIBLE POLYMER SAMPLES

I. V. Vindokurov^a, D. I. Sporysheva^{b,*}, and M. A. Tashkinov^c

*Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolskiy Ave., Perm, 614990, Russia*

^a  <https://orcid.org/0000-0002-1885-0404>  ivv@pstu.ru;

^b  <https://orcid.org/0009-0009-0166-2384>  disporysheva@pstu.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-4660-0020>  m.tashkinov@pstu.ru

*Corresponding author. Email: disporysheva@pstu.ru

Address for correspondence: ul. Prof. Pozdeeva, 13, Perm, 614013, Russia
Tel. +7 (342) 219-8763

The paper studies the effect of filament orientation in Fused Deposition Modeling (FDM) additive manufacturing on the Poisson ratio and mechanical properties of biocompatible polymers, namely polylactide, polyamide 12, polyetheretherketone, polysulfone, and polyetherimide. Tensile tests are carried out at two orientations of the layers (deposited at 0 and 90° relative to the direction of loading). The Poisson ratio is determined by two contactless methods, namely digital image correlation and video extensometer measurements, which allows the reproducibility and measurement accuracy to be evaluated. Additionally, the values of ultimate strength, elastic modulus, and relative elongation after rupture have been obtained. It is shown that the 0° orientation provides higher strength characteristics compared to the 90° one, which is due to the directed load perception along the printed filaments. At the same time, the influence of orientation on the Poisson ratio is found to be insignificant, with differences recorded only in the third decimal place. The maximum relative deviation between the results of the two measurement methods does not exceed 1.59 %, and it is less than 0.6 % for most materials. The data obtained refine the reference values of the Poisson ratio for additively manufactured polymers, and they can be used in numerical simulation of the stress-strain state of medical devices manufactured by FDM.

Keywords: additive manufacturing, biocompatible polymers, Poisson ratio, contactless measurements, digital image correlation, video extensometer measurements

Acknowledgment

The results were obtained under the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education for conducting fundamental research (project FSNM-2025-0001).

References

1. Available at: <https://xray.greyb.com/articles/advances-in-high-accuracy-3d-printing>
2. Vindokurov, I., Pirogova, Yu., Tashkinov, M., and Silberschmidt, V.V. Effect of heat treatment on elastic properties and fracture toughness of fused filament fabricated PEEK for biomedical applications. *Polymers*, 2022, 14 (24), 5521. DOI: 10.3390/polym14245521.

3. Vindokurov, I., Pirogova, Yu., Tashkinov, M., and Silberschmidt, V.V. Compression of additively manufactured PLA for biomedical applications: effects of test conditions on properties of solid samples. *Polymer Testing*, 2024, 130, 108320. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2023.108320.
4. Elenskaya, N., Tashkinov, M., Vindokurov, I., Pirogova, Yu., and Silberschmidt, V.V. Understanding of trabecular-cortical transition zone: numerical and experimental assessment of multi-morphology scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, 147, 106146. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2023.106146.
5. Vidakis, N., Petousis, M., Velidakis, E., Korlos, A., Kechagias, J.D., Tsikritzis, D., and Mountakis, N. Medical-grade polyamide 12 nanocomposite materials for enhanced mechanical and antibacterial performance in 3D printing applications. *Polymers (Basel)*, 2022, 14 (3), 440. DOI: 10.3390/polym14030440.
6. Ortega-Martínez, J. Polyetheretherketone (PEEK) as a medical and dental material. A literature review. *Medical Research Archives*, 2017, 5 (4). DOI: 10.18103/mra.v5i4.1209.
7. Panayotov, I.V., Orti, V., Cuisinier, F., and Yachouh, J. Polyetheretherketone (PEEK) for medical applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2016, 27 (7), 118. DOI: 10.1007/s10856-016-5731-4.
8. DeStefano, V., Khan, S., and Tabada, A. Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration*, 2020, 1 (5), 76–87. DOI: 10.1016/j.engreg.2020.08.002.
9. Chen, Z., Lv, Z., Sun, Y., Chi, Z., and Qing, G. Recent advancements in polyethyleneimine-based materials and their biomedical, biotechnology, and biomaterial applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 2020, 8 (15). DOI: 10.1039/C9TB02271F.
10. Puppi, D., Braccini, S., Battisti, A., Manariti, A., Pecorini, G., and Samal, S.K. Additive manufacturing of wet-spun polysulfone medical implants. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 2023, 9 (9), 5418–5429. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.3c00711.
11. Tsiangou, E., Kupski, J., Teixeira de Freitas, S., Benedictus, R., and Villegas, I.F. On the sensitivity of ultrasonic welding of epoxy- to polyetheretherketone (PEEK)-based composites to the heating time during the welding process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 144, 106334. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106334.
12. Cuccarollo, P., Pontefisso, A., Carraro, P.A., and Quaresimin, M. Characterization and modelling of the microstructural and mechanical properties of additively manufactured continuous fiber polymer composites. *Composites Science and Technology*, 2025, 260, 110986. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110986.
13. Giannopoulos, G.I. Linking MD and FEM to predict the mechanical behaviour of fullerene reinforced nylon-12. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 161, 455–463. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.110.
14. Isaac, C.W., Duddeck, F., and Ha, N.S. Axial crushing response of novel toothed gear bio-inspired 3D printed energy absorbing structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 288, 110033. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.110033.
15. Delbé, K., Doumeng, M., Denape, J., Mérian, T., Berthet, F., Marsan, O., and Chabert, F. Contribution of Raman analysis on tribological study of PEEK reinforced with micro or nano SiC particles. *Wear*, 2025, 570, 205927. DOI: 10.1016/j.wear.2025.205927.
16. Darwish, Y. and ElGawady, M.A. Numerical and experimental investigation of negative stiffness beams and honeycomb structures. *Engineering Structures*, 2024, 301, 117163. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117163.
17. Xu, H., Liu, H.-T., and Li, G.-F. In-plane characteristics of a multi-arc re-entrant auxetic honeycomb with enhanced negative Poisson's ratio effect and energy absorption. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2025, 109, 105473. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2024.105473.
18. Mrówka, M., Machoczek, T., Jureczko, P., Jozsko, K., Gzik, M., Wolański, W., and Wilk, K. Mechanical, chemical, and processing properties of specimens manufactured from poly-ether-etherketone (PEEK) using 3D printing. *Materials*, 2021, 14 (11), 2717. DOI: 10.3390/ma14112717.

19. Yap, Y.L., Toh, W., Giam, A., Yong, F.R., Chan, K. I., Tay, J.W.S., Teong, S.S., Lin, R., and Ng, T. Topology optimization and 3D printing of micro-drone: numerical design with experimental testing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 237, 107771. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107771.
20. Lu, Z., Reitschuster, S., Tobie, Th., Stahl, K., Liu, H., and Hu, X. Contact fatigue life prediction of PEEK gears based on CTAB-GAN data augmentation. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 312, 110639. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110639.
21. Pisani, W.A., Radue, M.S., Chinkanjanarot, S., Bednarczyk, B.A., Pineda, E.J., Waters, K., Pandey, R., King, J.A., and Odegard, G.M. Multiscale modeling of PEEK using reactive molecular dynamics modeling and micromechanics. *Polymer*, 2019, 163. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.12.052.
22. Zhou, Q., Zhao, A., Wang, H., and Liu, C. Machine learning guided design of mechanically efficient metamaterials with auxeticity. *Materials Today Communications*, 2024, 39. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.108944.
23. Gazzola, C., Caverni, S., and Corigliano, A. From mechanics to acoustics: critical assessment of a robust metamaterial for acoustic insulation application. *Applied Acoustics*, 2021, 183, 108311. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108311.
24. Pinto, V.C., Ramos, T., Alves, A.S., Xavier, J., Tavares, P., Moreira, P.M.G.P., and Guedes, R.M. Dispersion and failure analysis of PLA, PLA/GNP and PLA/CNT-COOH biodegradable nanocomposites by SEM and DIC inspection. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 71, 63–71. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.06.009.
25. Peña-Bahamonde, J., San Miguel, V., Baselga, J., Fernández-Blázquez, J.P., Gedler, G., Ozisik, R., and Cabanelas, J.C. Effect of polysulfone brush functionalization on thermo-mechanical properties of melt extruded graphene/polysulfone nanocomposites. *Carbon*, 2019, 151, 84–93. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.05.072.
26. Ferreira, R.T.L., Amatte, I.C., Dutra, T.A., and Bürger, D. Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 124, 88–100. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013.
27. León, N., Martínez, A.B., and MasPOCH, M. Notch effect on the linear elastic fracture mechanics values of a polysulfone thermoplastic polymer. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021, 114, 102995. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.102995.
28. Zehir, B., Boga, C., and Seyedzavvar, M. Molecular dynamics simulation and experimental investigation of mechanical properties of calcium carbonate and graphene reinforced polylactic acid nanocomposites. *Journal of Molecular Modeling*, 2023, 29, 187. DOI: 10.1007/s00894-023-05598-1.
29. Boersma, A., Cangialosi, D., and Picken, S.J. Mobility and solubility of antioxidants and oxygen in glassy polymers. III. Influence of deformation and orientation on oxygen permeability. *Polymer*, 2003, 44, 2463–2471. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00039-9.
30. Forés-Garriga, A., Pérez, M.A., Gómez-Gras, G., and Reyes, G. Role of infill parameters on the mechanical performance and weight reduction of PEI Ultem processed by FFF. *Materials & Design*, 2020, 193, 108810. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108810.
31. Torabi, A.R., Shahbaz, S., and Ayatollahi, M.R. Tensile fracture prediction of 3D-printed V-notched PLA specimens: application of VIMC-MEMC in conjunction with brittle fracture criteria. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 310, 110497. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110497.
32. Annanto, G.P., Ismail, R., Haryanto, I., Ariyanto, M., Pambudi, K.A., and Pranoto, K.A. Numerical analysis of stress and displacement on the index finger of the prosthetic hand due to hook position. In: *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2114 (1), 050017. DOI: 10.1063/1.5112461.
33. He, L., Kurita, H., Wang, Z., and Narita, F. Structural optimization of PVDF cellular resonators for energy-harvesting enhancement based on backpropagation neural network and NSGA-II algorithm. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 376, 115608. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115608.

Подана в журнал: 31.01.2026



УДК 539.32



DOI: 10.17804/2410-9908.2026.2.006-018



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ПЕЧАТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ БИОСОВМЕСТИМЫХ ПОЛИМЕРОВ

И. В. Виндокуров^а, Д. И. Спорышева^{б, *}, М. А. Ташкинов^в

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Комсомольский пр-кт, 29, г. Пермь, 614990, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-1885-0404>  ivv@pstu.ru;

^б  <https://orcid.org/0009-0009-0166-2384>  disporysheva@pstu.ru;

^в  <https://orcid.org/0000-0003-4660-0020>  m.tashkinov@pstu.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: disporysheva@pstu.ru
Адрес для переписки: ул. Проф. Поздеева, д. 13, Пермь, 614013, Россия
Тел. +7 (342) 219-87-63

В работе исследовано влияние ориентации укладки филамента при печати с использованием технологии послойного наплавления филамента (FDM – *fused deposition modeling*) на коэффициент Пуассона и механические характеристики биосовместимых полимеров: полилактида, полиамида-12, полиэфирэфиркетона, полисульфона и полиэфиримида. Испытания на растяжение проводили при двух ориентациях слоев (0 и 90° относительно направления нагружения). Коэффициент Пуассона определяли двумя бесконтактными методами: с использованием техники корреляции цифровых изображений и видеоэкстензометрии, что позволило оценить воспроизводимость и точность измерений. Дополнительно были получены значения предела прочности, модуля упругости и относительного удлинения после разрыва. Показано, что ориентация 0° обеспечивает более высокие прочностные характеристики по сравнению с ориентацией 90°, что связано с направленным восприятием нагрузки вдоль напечатанных нитей. При этом влияние ориентации на коэффициент Пуассона оказалось незначительным: различия фиксируются лишь в третьем знаке после запятой. Максимальное относительное отклонение между результатами двух методов измерения не превышает 1,59 %, а для большинства материалов составляет менее 0,6 %. Полученные данные уточняют справочные значения коэффициента Пуассона для аддитивно изготовленных полимеров и могут быть использованы при численном моделировании напряженно-деформированного состояния медицинских изделий, изготовленных методом FDM.

Ключевые слова: аддитивное производство, биосовместимые полимеры, коэффициент Пуассона, бесконтактные измерения, корреляция цифровых изображений, видеоэкстензометрия

1. Введение

В современном мире аддитивные технологии занимают значительную долю производства. Эти технологии достигли высокого уровня точности благодаря интегрированным алгоритмам, обеспечивающим готовность изделий к эксплуатации без дополнительной обработки [1]. Такие явные продвижения в аддитивных технологиях уже позволяют использовать их в точных отраслях, таких как производство медицинского оборудования, имплантов и устройств, что вносит значительный вклад в персонализацию медицинских устройств. Однако немаловажным остается прогнозирование длительности работы и характеристики разрушения таких напечатанных объектов.

Коэффициент Пуассона – важная механическая характеристика, отражающая способность материала изменять свои поперечные размеры при продольном растяжении или сжатии. Неправильное значение коэффициента Пуассона приводит к неверному прогнозированию усталостной прочности и зон концентрации напряжений под циклической нагрузкой. Знание данного параметра для широкого спектра биомедицинских пластиков позволяет избегать затрат времени и средств на изготовление и экспериментальное исследование поведения медицинских устройств посредством использования математического моделирования [2–4].

Для данного исследования была выделена группа наиболее часто используемых биомедицинских полимеров, используемых для аддитивного производства. В их число вошли: полиамид-12 (ПА12), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полилактид (ПЛА), полисульфон (ПСФ), полиэфиримид (ПЭИ). Эти материалы широко используются в медицине благодаря биосовместимости и механическим свойствам. Благодаря биосовместимости и механической прочности ПА12 используют в протезировании, при изготовлении хирургических инструментов [5]; ПЭЭК, обладающий высокой термостойкостью и биосовместимостью, применяют в стоматологии, при производстве хирургического оборудования и высокотехнологичных имплантов [6, 7]; ПЛА применяется при разработке биоразлагаемых каркасов и шовных материалов [8]; ПЭИ ограничено применяется для изготовления инструментов и изделий, не контактирующих напрямую с биотканями [9]; ПСФ используется при изготовлении корпусов медицинских приборов, стерилизуемых инструментов, оптических изделий, мембран, лабораторного оборудования, деталей, выдерживающих многократную стерилизацию паром [10]. Для данных полимеров в литературе встречаются диапазоны значений или разные значения коэффициента Пуассона одного материала, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты Пуассона, приведенные в источниках

Полимер	ν	Ссылка	Полимер	ν	Ссылка
ПЭЭК	Продольный 0,27 Поперечный 0,30	[11]	ПА12	0,38	[12–14]
	0,35	[15]		0,33	[16, 17]
	0,35–0,38	[18]		0,38 0,41	[19]
	0,4	[20, 21]		0,42	[22]
ПЛА	0,33	[14, 24]		0,40	[23]
	0,349 0,336	[26]		ПСФ	0,34
	0,429	[28]	0,37		[27]
	0,33	[24]	0,41	[29]	
	0,27–0,28	[31]	ПЭИ	0,36	[11]
	0,36	[32, 33]		0,297–0,392	[30]

Цель работы – с помощью двух методов, видеоэкстензометрии и техники корреляции цифровых изображений, выявить влияние ориентации волокон (0 и 90° относительно направления нагружения) при 3D-печати на коэффициент Пуассона биосовместимых полимеров, измеряемый двумя методами, а также оценить напряженно-деформированное состояние образцов.

Дополнительно представлены определенные предел прочности, модуль упругости и относительное удлинение после разрыва для каждого полимера.

2. Материал и методика

2.1. Подготовка образцов

Для изготовления образцов полимеров использовали два 3D-принтера: Raise3D Pro3 (Raise3D, США) для ПЛА и ПА12; F2 Lite (F2 Innovations, Россия) для ПЭЭК, ПСФ, ПЭИ. Данные принтеры подобрали исходя из специфики материалов: для ПЭЭК, ПСФ, ПЭИ характерны высокие температуры плавления, а максимальное соединение слоев возможно при определенной поддерживаемой температуре воздуха в камере. Для печати были выбраны филаменты диаметром 1,75 мм (REC, Россия), предварительно высушенные при температуре, рекомендованной производителем, экструзия производилась через сопла диаметром 0,4 мм при высоте слоя 0,2 мм. Часть образцов из ПЭЭК подвергалась термообработке, принцип которой описан в статье [2], для улучшения механических свойств. Параметры процесса печати, использованные в этом исследовании, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры печати для полимеров

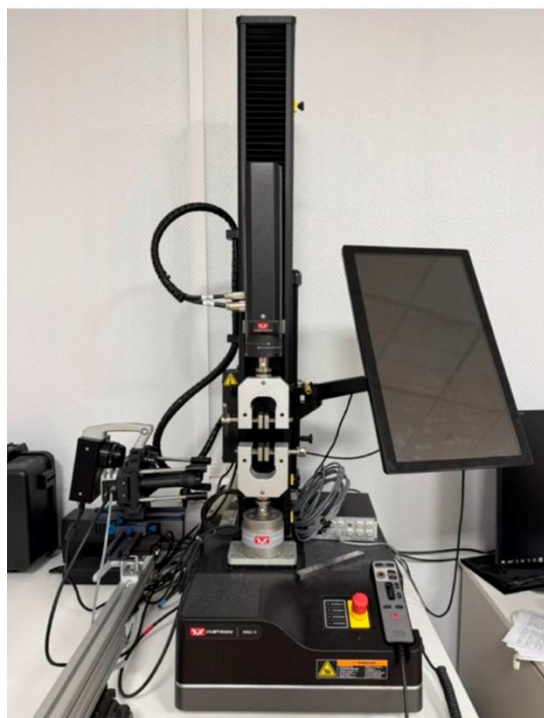
Параметры печати	Значение				
	ПЛА	ПА12	ПЭИ	ПСФ	ПЭЭК
Скорость перемещения сопла, мм/мин	4200	4200	1500	1500	1500
Температура сопла, °С	225	265	390	390	430
Температура стола, °С	65	80	150	150	145
Температура камеры, °С	22	22	80	80	80
Высота слоя, мм	0,2				
Ширина экструзии, мм	0,4				
Заполнение	Линейное				
Плотность заполнения, %	100				
Обдув, %	100	50	–	–	100

2.2. Определение коэффициента Пуассона

Испытания на растяжение образцов проводили на универсальной разрывной машине Instron 68SC-5 с датчиком усилий 5 кН (рис. 1 а, б). Коэффициент Пуассона определяли с помощью метода корреляции цифровых изображений (КЦИ, или DIC – *digital image correlation*) и видеоэкстензометрии во время механического нагружения образцов [2, 3]. Для этого в системе DIC измеряли перемещения отдельных случайных элементов поверхности на разных этапах деформации, а в видеоэкстензометре – перемещения черных контрастных точек (рис. 2 а, б).

Первый метод измерений основывался на бесконтактной системе VIC-3D Micro-DIC (США), предназначенной для анализа деформаций. Система включала две цифровые камеры разрешением 5 Мп, снимающие с частотой 5 Гц, калибровка которых выполнялась калибровочными пластинами через ПО VIC-Snap с точностью 0,05 пикселя. Обработку изображений проводили в VIC-3D 9, обеспечивая разрешение по деформации 0,001 % (10 мк).

При реализации второго метода использовали видеоэкстензометр Instron AVE 2 (США) для бесконтактного определения деформаций. Калибровка осуществлялась специализированными мишенями с помощью ПО Instron Bluehill Universal.



a

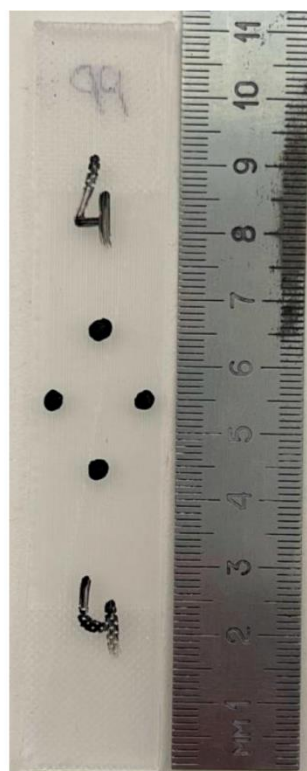


б

Рис. 1. Универсальная разрывная машина с системой корреляции цифровых изображений (*a*) и с видеоэкстензометром (*б*)



a



б

Рис. 2. Образцы для системы корреляции цифровых изображений (*a*) и видеоэкстензиометрии (*б*)

3. Результаты и обсуждение

3.1. Оценка напряженно-деформированного состояния материалов

Для всех полимеров характерна более выраженная упругая зона при угле укладки филамента в 0° (рис. 3). Данное явление логично и обусловлено растяжением волокон вдоль направления приложения силы. Наиболее близкое совпадение упругих участков диаграмм при укладке 0 и 90° наблюдается для ПЭЭК и ПСФ. Предел прочности при укладке филамента под 0° также всегда выше, чем при 90° .

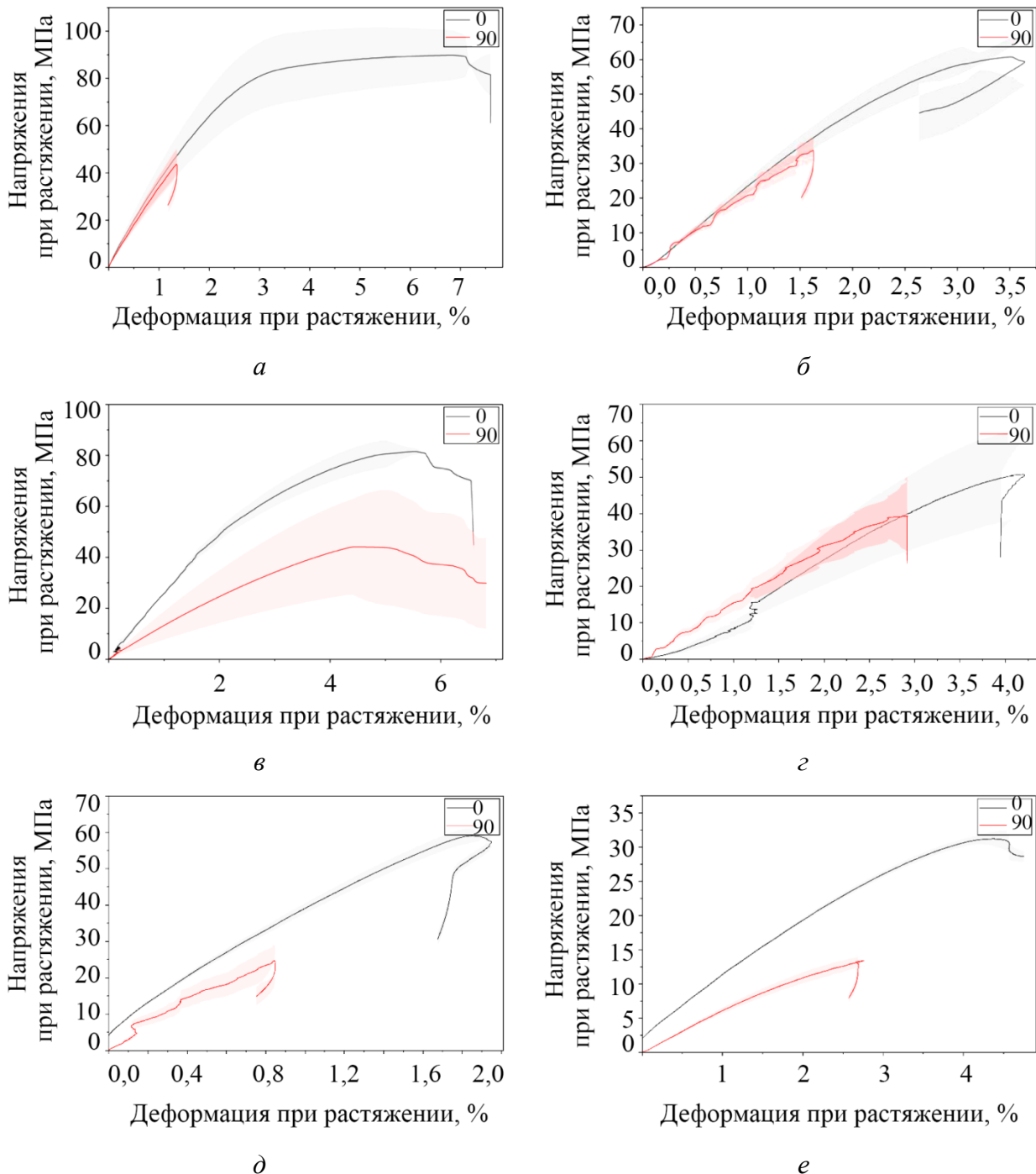


Рис. 3. Диаграммы зависимости напряжения от деформации полимеров: ПЭЭК с термообработкой (а); ПЭЭК без термообработки (б); ПЭИ (в); ПСФ (г); ПЛА (д); ПА12 (е)

Стоит отметить, что кривые приведены для образцов, исследованных на видеоэкстензометре Instron AVE 2. Для данного метода характерно получение негладких кривых. Для получения гладкости данные результаты можно пересчитать по перемещениям.

Значения предела прочности, модуля упругости и относительного удлинения после разрыва, представленные в табл. 3, рассчитывались по обработанным кривым. Полученные значения имеют широкий диапазон измерений, позволяющий подобрать биополимер с необходимыми свойствами для конкретной прочностной функции. Например, наибольший модуль упругости имеет ПЭЭК с обработкой, а наименьший – ПА12 для обоих направлений укладки филамента. Для пределов прочности наблюдается тенденция уменьшения значения для образцов с углом укладки филаментов 90°. Также данные значения позволяют правильнее моделировать процессы, протекающие в конструкциях, напечатанных технологией FDM.

Таблица 3

Свойства при растяжении для полимеров при угле кладки филамента $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$

Параметр	Предел прочности, МПа		Модуль упругости, ГПа		Относительное удлинение после разрыва, %	
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
ПЛА	56,67±3,5	25,17±3,53	2,98±0,11	2,81±0,21	5,04±0,46	1,61±0,23
ПЭЭК без обработки	67,42±3,51	36,56±3,97	4,04±0,40	4,54±0,74	6,48±0,71	2,49±0,06
ПЭЭК с обработкой	93,14±4,89	41,05±9,23	4,80±0,76	4,66±0,25	11,19±4,20	2,31±0,41
ПСФ	49,02±11,39	40,78±7,07	1,59±0,26	1,44±0,29	5,36±1,43	3,69±0,72
ПЭИ	70,93±14,45	36,25±4,65	2,92±0,31	1,50±0,07	9,06±1,57	3,15±0,40
ПА12	30,74±1,41	11,95±1,78	0,81±0,05	0,5±0,08	9,96±0,75	4,08±0,61

3.2. Коэффициент Пуассона

Значения коэффициента Пуассона были получены для двух углов укладки филамента двумя методами (рис. 4). Наибольший коэффициент имеет термообработанный ПЭЭК, который на 15,79 % больше значения для образцов без термообработки, а наименьший – ПЛА. Наименьшую разницу в значениях коэффициента при сравнении углов укладки филамента и методов исследования имеет ПА12.

Чаще всего в литературе приводится коэффициент Пуассона до второго знака после запятой. Используемые нами методы позволяют оценить данные значения с точностью до тысячных, что может быть необходимо для высокоточных инженерных расчетов. Это также актуально для задач, где малые различия влияют на результат, в прецизионных симуляциях методом конечных элементов (МКЭ) для анализа напряжений в сложных конструкциях, таких как аэрокосмические детали или микроэлектроника, а также при расчете композитов или анизотропных материалов, где пренебрежение тысячными долями приводит к ошибкам свыше 5 % (табл. 4). Однако при округлении значений до двух знаков после запятой мы получаем равные (с учетом погрешности) значения для каждого материала вне зависимости от используемого метода и угла укладки филамента (табл. 4).

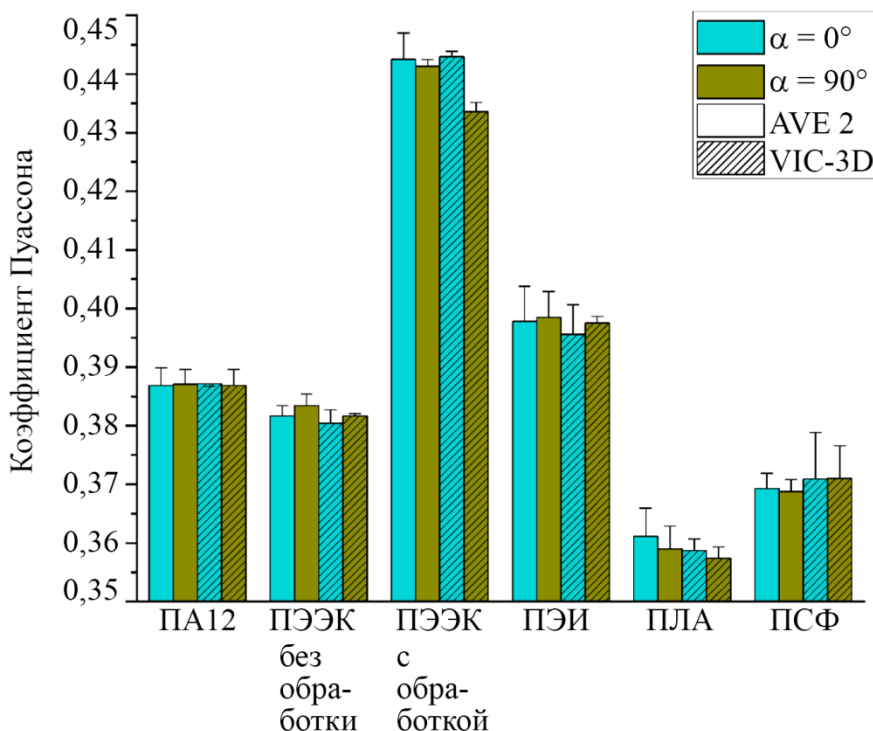


Рис. 4. Значения коэффициента Пуассона для полимеров, применяемых в биомедицине

Таблица 4

Сравнение методов измерения коэффициентов Пуассона для образцов

Метод	Видеоэкстензометрия		Корреляция цифровых изображений		Приближенное значение коэффициента Пуассона
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	
ПЛА	0,361±0,004	0,359±0,003	0,359±0,002	0,357±0,002	0,36
ПЭЭК без обработки	0,382±0,003	0,383±0,002	0,38±0,002	0,382±0,000	0,38
ПЭЭК с обработкой	0,443±0,006	0,441±0,001	0,443±0,001	0,434±0,001	0,44
ПСФ	0,369±0,003	0,369±0,003	0,371±0,011	0,371±0,005	0,37
ПЭИ	0,398±0,005	0,398±0,006	0,396±0,005	0,398±0,002	0,40
ПА12	0,387±0,003	0,387±0,002	0,387±0,002	0,387±0,002	0,39

Было рассчитано относительное отклонение для данных, полученных AVE и VIC-3D (табл. 5). При угле 0° максимальное отклонение находится в диапазоне от 0,5 до 0,55 % для ПЛА, ПЭЭК без термообработки, ПСФ, ПЭИ, а для ПЭЭК с термообработкой и ПА12 разница составляет 0 %. Максимальное отклонение для угла 90° составляет 1,59 %, но для ПЛА, ПЭЭК без термообработки, ПСФ она не превышает 0,56 %, а для ПЭИ и ПА12 составляет 0 %.

Таблица 5

Значения относительного отклонения для образцов

Ориентация слоев	Относительное отклонение данных, %	
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
ПЛА	0,55	0,56
ПЭЭК без обработки	0,52	0,26
ПЭЭК с обработкой	0,00	1,59
ПСФ	0,54	0,54
ПЭИ	0,50	0,00
ПА12	0,00	0,00

4. Заключение

В работе был определен коэффициент Пуассона пяти биосовместимых полимеров методами видеоэкстензометрии и техники корреляции цифровых изображений при двух разных углах укладки филамента. Дополнительно в работе были определены значения сопутствующих определению коэффициента Пуассона параметров: предела прочности, модуля упругости и относительного удлинения после разрыва. Было определено, что оба метода дают достаточно точный (с учетом погрешности) результат. Максимальное относительное отклонение между найденными коэффициентами Пуассона составляет 1,59 %, но для большей части материалов не превышает 0,6 %. Полученные значения коэффициента Пуассона отличаются только в третьем знаке после запятой, что не вносит значительного вклада при его использовании в математическом моделировании, так как наиболее часто используемым является формат с двумя знаками после запятой. Угол ориентации филамента не вносит вклад в изменение коэффициента Пуассона. Данный вывод очевиден для материалов, которые изготавливаются без пор, литьем (например, металлов, пластмасс), но это нелогично для конструкций, изготовленных 3D-печатью, обладающих своими порами, вносящими нюансы в определение данных параметров.

Были определены прочностные характеристики каждого биосовместимого материала, позволяющие подобрать конкретный полимер для необходимого типа воздействия и нагружения в персонализированной медицинской задаче.

Благодарность

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2025-0001).

Литература

1. URL: <https://xray.greyb.com/articles/advances-in-high-accuracy-3d-printing>
2. Effect of heat treatment on elastic properties and fracture toughness of fused filament fabricated PEEK for biomedical applications / I. Vindokurov, Yu. Pirogova, M. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14 (24). – P. 5521. – DOI: 10.3390/polym14245521.
3. Compression of additively manufactured PLA for biomedical applications: Effects of test conditions on properties of solid samples / I. V. Vindokurov, Yu. Pirogova, M. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // *Polymer Testing*. – 2024. – Vol. 130. – P. 108320. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108320.
4. Understanding of trabecular-cortical transition zone: numerical and experimental assessment of multi-morphology scaffolds / N. Elenskaya, M. Tashkinov, I. Vindokurov, Y. Pirogova,

- V. V. Silberschmidt // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2023. – Vol. 147. – P. 106146. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2023.106146.
5. Medical-grade polyamide 12 nanocomposite materials for enhanced mechanical and antibacterial performance in 3D printing applications / N. Vidakis, M. Petousis, E. Velidakis, A. Korlos, J. D. Kechagias, D. Tsikritzis, N. Mountakis // *Polymers (Basel)*. – 2022. – Vol. 14 (3). – P. 440. – DOI: 10.3390/polym14030440.
 6. Ortega-Martínez J. Polyetheretherketone (PEEK) as a medical and dental material. A literature review // *Medical Research Archives*. – 2017. – Vol. 5 (4). – DOI: 10.18103/mra.v5i4.1209.
 7. Polyetheretherketone (PEEK) for medical applications / I. V. Panayotov, V. Orti, F. Cuisinier, J. Yachouh // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. – 2016. – Vol. 27 (7). – P. 118. – DOI: 10.1007/s10856-016-5731-4.
 8. DeStefano V., Khan S., Tabada A. Applications of PLA in modern medicine // *Engineered Regeneration*. – 2020. – Vol. 1 (5). – P. 76–87. – DOI: 10.1016/j.engreg.2020.08.002.
 9. Recent advancements in polyethyleneimine-based materials and their biomedical, biotechnology, and biomaterial applications / Z. Chen, Z. Lv, Y. Sun, Z. Chi, G. Qing // *Journal of Materials Chemistry B*. – 2020. – Vol. 8 (15). – P. 2951–2973. – DOI: 10.1039/C9TB02271F.
 10. Additive manufacturing of wet-spun polysulfone medical implants / D. Puppi, S. Braccini, A. Battisti, A. Manariti, G. Pecorini, S. K. Samal // *ACS Biomaterials Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 9 (9). – P. 5418–5429. – DOI:10.1021/acsbmaterials.3c00711.
 11. On the sensitivity of ultrasonic welding of epoxy- to polyetheretherketone (PEEK)-based composites to the heating time during the welding process / E. Tsiangou, J. Kupski, S. Teixeira de Freitas, R. Benedictus, I. F. Villegas // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2021. – Vol. 144. – P. 106334. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106334.
 12. Characterization and modelling of the microstructural and mechanical properties of additively manufactured continuous fiber polymer composites / P. Cuccarollo, A. Pontefisso, P. A. Carraro, M. Quaresimin // *Composites Science and Technology*. – 2025. – Vol. 260. – P. 110986. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110986.
 13. Giannopoulos G. I. Linking MD and FEM to predict the mechanical behaviour of fullerene reinforced nylon-12 // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 161. – P. 455–463. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.110.
 14. Isaac C. W., Duddeck F., Ha N. S. Axial crushing response of novel toothed gear bio-inspired 3D printed energy absorbing structures // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2025. – Vol. 288. – P. 110033. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.110033.
 15. Contribution of Raman analysis on tribological study of PEEK reinforced with micro or nano SiC particles / K. Delbé, M. Doumeng, J. Denape, T. Mérian, F. Berthet, O. Marsan, F. Chabert // *Wear*. – 2025. – Vol. 570. – P. 205927. – DOI: 10.1016/j.wear.2025.205927.
 16. Darwish Y., ElGawady M. A. Numerical and experimental investigation of negative stiffness beams and honeycomb structures // *Engineering Structures*. – 2024. – Vol. 301. – P. 117163. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117163.
 17. Xu H., Liu H. T., Li G. F. In-plane characteristics of a multi-arc re-entrant auxetic honeycomb with enhanced negative Poisson's ratio effect and energy absorption // *Journal of Mechanics – A/Solids*. – 2025. – Vol. 109. – P. 105473. – DOI: 10.1016/j.euromechsol.2024.105473.
 18. Mechanical, chemical, and processing properties of specimens manufactured from polyether-ether-ketone (PEEK) using 3d printing / M. Mrówka, T. Machoczek, P. Jureczko, K. Jozsko, M. Gzik, W. Wolański, K. Wilk // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (11). – P. 2717. – DOI: 10.3390/ma14112717.
 19. Topology optimization and 3D printing of micro-drone: Numerical design with experimental testing / Y. L. Yap, W. Toh, A. Giam, F. R. Yong, K. I. Chan, J. W. S. Tay, S. S. Teong, R. Lin, T. Ng // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2023. – Vol. 237. – P. 107771. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107771.

20. Contact fatigue life prediction of PEEK gears based on CTAB-GAN data augmentation / Z. Lu, S. Reitschuster, Th. Tobie, K. Stahl, H. Liu, X. Hu // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2024. – Vol. 312. – P. 110639. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110639.
21. Multiscale modeling of PEEK using reactive molecular dynamics modeling and micromechanics / W. A. Pisani, M. S. Radue, S. Chinkanjanarot, B. A. Bednarcyk, E. J. Pineda, K. Waters, R. Pandey, J. A. King, G. M. Odegard // *Polymer*. – 2019. – Vol. 163. – DOI: 10.1016/j.polymer.2018.12.052.
22. Machine learning guided design of mechanically efficient metamaterials with auxeticity / Q. Zhou, A. Zhao, H. Wang, C. Liu // *Materials Today Communications*. – 2024. – Vol. 39. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.108944.
23. Gazzola C., Caverni S., Corigliano A. From mechanics to acoustics: Critical assessment of a robust metamaterial for acoustic insulation application // *Applied Acoustics*. – 2021. – Vol. 183. – DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108311.
24. Dispersion and failure analysis of PLA, PLA/GNP and PLA/CNT-COOH biodegradable nanocomposites by SEM and DIC inspection / V. C. Pinto, T. Ramos, A. S. F. Alves, J. Xavier, P. J. Tavares, P. M. G. P. Moreira, R. M. Guede // *Engineering Failure Analysis*. – 2017. – Vol. 71. – P. 63–71. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.06.009.
25. Effect of polysulfone brush functionalization on thermo-mechanical properties of melt extruded graphene/polysulfone nanocomposites / J. Peña-Bahamonde, V. San-Miguel, J. Baselga, J. P. Fernández-Blázquez, G. Gedler, R. Ozisik, J. C. Cabanelas // *Carbon*. – 2019. – Vol. 151. – P. 84–93. – DOI: 10.1016/j.carbon.2019.05.072.
26. Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers / R. T. L. Ferreira, I. C. Amatte, T. A. Dutra, D. Bürger // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 124. – P. 88–100. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013.
27. León N., Martínez A. B., Maspoch M. Notch effect on the linear elastic fracture mechanics values of a polysulfone thermoplastic polymer // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2021. – Vol. 114. – P. 102995. – DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.102995.
28. Zehir B., Boga C., Seyedzavvar M. Molecular dynamics simulation and experimental investigation of mechanical properties of calcium carbonate and graphene reinforced polylactic acid nanocomposites // *Journal of Molecular Modeling*. – 2023. – Vol. 29. – 187. – DOI: 10.1007/s00894-023-05598-1.
29. Boersma A., Cangialosi D., Picken S. J. Mobility and solubility of antioxidants and oxygen in glassy polymers. III. Influence of deformation and orientation on oxygen permeability // *Polymer*. – 2003. – Vol. 44. – P. 2463–2471. – DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00039-9.
30. Role of infill parameters on the mechanical performance and weight reduction of PEI Ultem processed by FFF / A. Forés-Garriga, M. A. Pérez, G. Gómez-Gras, G. Reyes-Pozo // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 193. – P. 108810. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108810.
31. Torabi A. R., Shahbaz S., Ayatollahi M. R. Tensile fracture prediction of 3D-printed V-notched PLA specimens: application of VIMC-MEMC in conjunction with brittle fracture criteria // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2024. – 310. – P. 110497. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110497.
32. Numerical analysis of stress and displacement on the index finger of the prosthetic hand due to hook position / G. P. Annanto, R. Ismail, I. Haryanto, M. Ariyanto, Kh. A. Pambudi, K. A. Pranoto // *AIP Conference Proceedings*. – Vol. 2114 (1). – P. 50017. – DOI: 10.1063/1.5112461.
33. Structural optimization of PVDF cellular resonators for energy-harvesting enhancement based on backpropagation neural network and NSGA-II algorithm / L. He, H. Kurita, Z. Wang, F. Narita // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2024. – Vol. 376. – P. 115608. – DOI: 10.1016/j.sna.2024.115608.