

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-22-30>

УДК 62-278:678.7

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНЫХ МЕМБРАН ДВУХСЛОЙНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГИБКИХ ДАТЧИКОВ

Г. Б. МЕЛЬНИКОВА¹⁺, А. С. БАРАНОВА¹, Д. В. САПСАЛЁВ¹, Т. Н. ТОЛСТАЯ¹, С. А. ЧИЖИК¹,
И. В. КОРОЛЬКОВ^{2,3}, Н. Н. ЖУМАНАЗАР², М. В. ЗДОРОВЕЦ^{2,3,4}

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск, Беларусь

²Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, 050032, г. Алматы, Казахстан

³Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, 010008, г. Астана, Казахстан

⁴Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, 620002, г. Екатеринбург, Россия

Цель работы — функционализация полиэтилентерефталатных трековых мембран (ПЭТ ТМ) двухслойными полимерными покрытиями для создания гибких сенсоров, анализ изменения структурно-механических свойств поверхности.

В последние годы наблюдается ускоренное развитие микроэлектроники, которое открывает новые возможности для создания новых функциональных материалов и технологий. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка гибкой электроники, способной адаптироваться к различным формам и условиям эксплуатации. Гибкие датчики на основе нанопористых мембран представляют особый интерес для медицинских, биотехнологических и промышленных приложений. В работе в качестве подложки использовали ПЭТ ТМ с диаметром пор 50 нм, 100 нм и 200 нм. Чувствительные слои перфтороктадекановой кислоты (ПФОДК) и поливинилкарбазола (ПВК) формировали методами спин-коатинга и Ленгмюра – Блоджетт на предварительно модифицированные ПЭТ ТМ слоем полиэлектролита — полиэтиленимина (ПЭИ), повышающего адгезию модификатора к подложке. Методом атомно-силовой микроскопии изучена структура, изменение параметров шероховатости модифицированных ПЭТ ТМ, продемонстрирована возможность получения плотных однородных покрытий. На основании данных силовой спектроскопии установлено снижение локальных значений модуля упругости до значений: ПЭТ ТМ/ПЭИ⁺/ПФОДК — 152,1 МПа, ПЭТ ТМ/ПЭИ⁺/ПВК — 190,7 МПа, полученных методом Ленгмюра – Блоджетт и 219,6 МПа, полученных методом спин-коатинга. Отмечено увеличение гидрофобности поверхности для всех типов модифицированных мембран. Разработанные подходы функционализации поверхности могут быть рекомендованы для модифицирования пористых поверхностей, а также для создания гибких датчиков на основе ПЭТ ТМ.

Ключевые слова: трековые мембраны, полиэтиленимин, подивинилкарбазол, перфтороктадекановая кислота, атомно-силовая микроскопия, метод Ленгмюра – Блоджетт, спин-коатинг, смачиваемость.

MODIFICATION OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE MEMBRANES WITH BILAYER POLYMER COATINGS FOR CREATION OF FLEXIBLE SENSORS

G. B. MELNIKOVA¹⁺, A. S. BARANOVA¹, D. V. SAPSALIOU¹, T. N. TOLSTAYA¹, S. A. CHIZHIK¹,
I. V. KOROLKOV^{2,3}, N. N. ZHUMANAZAR², M. V. ZDOROVETS^{2,3,4}

¹A. V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovka St., 15, 220072, Minsk, Belarus

²The Institute of Nuclear Physics, Ibragimov St., 1, 050032, Almaty, Kazakhstan

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: galachka@gmail.com

³L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpaev St., 5, 010008, Astana, Kazakhstan

⁴Ural Federal University, Mira St., 19, 620002, Ekaterinburg, Russia

Aim of the work is the functionalization of polyethylene terephthalate track etched membranes (PET TM) with two-layer polymer coatings to create flexible sensors, the analysis of structural and mechanical surface properties.

In recent years, the rapid development of microelectronics has opened new opportunities for the creation of functional materials and technologies. One of the most promising directions is the development of flexible electronics capable of adapting to various shapes and operating conditions. Flexible sensors based on nanoporous membranes are of particular interest for medical, biotechnological, and industrial applications. In this study, PET TM with pore diameters of 50, 100, and 200 nm were used as substrates. The sensitive layers of perfluorooctadecanoic acid (PFOA) and polyvinylcarbazole (PVC) were formed using spin-coating and the Langmuir – Blodgett technique on PET TM membranes pre-modified with a polyelectrolyte layer — polyethylenimine (PEI), which enhances the adhesion of the modifier to the substrate. Atomic force microscopy was used to study the structure and changes in the nanoscale roughness parameters of the modified membranes, demonstrating the possibility of obtaining dense and uniform bilayer coatings. Force spectroscopy data revealed a reduction in local elastic modulus values to: PET TM/PEI⁺/PFOA — 152.1 MPa, PET TM/PEI⁺/PVC — 190.7 MPa (Langmuir – Blodgett) and 219.6 MPa (spin-coating). An increase in surface hydrophobicity was observed for all types of modified membranes. The developed surface functionalization approaches can be recommended for the modification of porous surfaces as well as for the creation of flexible sensors based on track-etched membranes.

Keywords: track membranes, polyethylenimine, polyvinylcarbazole, perfluorooctadecanoic acid, atomic force microscopy, Langmuir – Blodgett technique, spin-coating, wettability.

Поступила в редакцию 12.03.2025

© Г. Б. Мельникова, А. С. Баранова, Д. В. Сапсалёв, Т. Н. Толстая, С. А. Чижик, И. В. Корольков, Н. Н. Жуманазар, М. В. Здоровец, 2025

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: polmattex@gmail.com
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Мельникова Г. Б., Баранова А. С., Сапсалёв Д. В., Толстая Т. Н., Чижик С. А., Корольков И. В., Жуманазар Н. Н., Здоровец М. В. Модифицирование полиэтилентерефталатных мембран двухслойными полимерными покрытиями для создания гибких датчиков // Полимерные материалы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 22–30. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-22-30>

Citation sample:

Mel'nikova G. B., Baranova A. S., Sapsalev D. V., Tolstaya T. N., Chizhik S. A., Korol'kov I. V., Zhumanazar N. N., Zdorovets M. V. Modifitsirovanie polietilentereftalatnykh membran dvukhsloynymi polimernymi pokrytiyami dlya sozdaniya gibkikh datchikov [Modification of polyethylene terephthalate membranes with bilayer polymer coatings for creation of flexible sensors]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2025, vol. 11, no. 2, pp. 22–30. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-22-30>

Литература

1. Siwy Z., Kosińska I. D., Fuliński A., Martin C. R. Asymmetric Diffusion through Synthetic Nanopores // *Physical Review Letters*, 2005, vol. 94, no. 4. doi: 10.1103/PhysRevLett.94.048102

2. Venkatesan B. M., Dorvel B., Yemenicioglu S., Watkins N., Petrov I., Bashir R. Highly Sensitive, Mechanically Stable Nanopore Sensors for DNA Analysis // *Advanced Materials*, 2009, vol. 21, no. 27, pp. 2771–2776. doi: 10.1002/adma.200803786
3. Nuryanthi N., Yamaki T., Koshikawa H., Asano M., Enomoto K., Sawada S.-I., Maekawa Y., Voss K.-O., Trautmann C., Neumann R. Poly(vinylidene fluoride)-Based Ion Track Membranes with Different Pore Diameters and Shapes. SEM Observations and Conductometric Analysis // *Electrochemistry*, 2010, vol. 78, is. 2, pp. 146–149. doi: 10.5796/electrochemistry.78.146
4. Barsbay M., Güven O., Bessbousse H., Wade T. L., Beuneu F., Clochard M.-C. Nanopore size tuning of polymeric membranes using the RAFT-mediated radical polymerization // *J. Membr. Sci.*, 2013, vol. 445, pp. 135–145. doi: 10.1016/j.memsci.2013.05.029
5. Matsuguchi M., Horio K., Uchida A., Kakunaka R., Shiba S. A Flexible Ammonia Gas Sensor Based on a Grafted Polyaniline Grown on a Polyethylene Terephthalate Film // *Sensors*, 2024, vol. 24, is. 11. doi: 10.3390/s24113695
6. Lee J. S., Peng B., Sabuncu A. C., Nam S., Ahn C. V., Kim M. J., Kim M. J. Multiple consecutive recapture of rigid nanoparticles using a solid-state nanopore sensor // *Electrophoresis*, 2018, vol. 39, no. 5-6, pp. 833–843. doi: 10.1002/elps.201700329
7. Kaya D., Dinler A., San N., Kececi K. Effect of Pore Geometry on Resistive-Pulse Sensing of DNA Using Track-Etched PET Nanopore Membrane // *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 202, pp. 157–165. doi: 10.1016/j.electacta.2016.04.014
8. Zhai Q., Wang J., Jiang H., Wei Q., Wang E. Bare conical nanopore embedded in polymer membrane for Cr (III) sensing // *Talanta*, 2015, vol. 140, pp. 219–225. doi: 10.1016/j.talanta.2015.03.035
9. Belardinelli R., Sharma H., Peske F., Rodnina M. V. Perturbation of ribosomal subunit dynamics by inhibitors of tRNA translocation // *RNA*, 2021, vol. 27, pp. 981–990. doi: 10.1261/rna.078758.121
10. Darvish A., Lee J. S., Peng B., Saharia J., Sundaram R. V. K., Goyal G., Bandara N., Ahn C. W., Kim J., Dutta P., Chaiken I., Kim M. J. Mechanical characterization of HIV-1 with a solid-state nanopore sensor // *Electrophoresis*, 2019, vol. 40, is. 5, pp. 776–783. doi: 10.1002/elps.201800311
11. Plesa C., Kowalczyk S. W., Zinsmeister R., Grosberg A. Y., Rabin Y., Dekker C. Fast translocation of proteins through solid state nanopores // *Nano Letters*, 2013, vol. 13, is. 2, pp. 658–663. doi: 10.1021/nl3042678
12. Traversi F., Raillon C., Benameur S. M., Liu K., Khlybov S., Tosun M., Krasnozhan D., Kis A., Radenovic A. Detecting the translocation of DNA through a nanopore using graphene nanoribbons // *Nature Nanotechnology*, 2013, vol. 8, pp. 939–945. doi: 10.1038/nnano.2013.240
13. Venta K., Shemer G., Puster M., Rodríguez-Manzo J. A., Balan A., Rosenstein J. K., Shepard K., Drndic M. Differentiation of short, single-stranded DNA homopolymers in solid-state nanopores // *Acs Nano*, 2013, vol. 7, no. 5, pp. 4629–4636. doi: 10.1021/nn4014388
14. Blanco S., Vargas R., Mostany J., Borrás C., Scharifker B. R. Modeling the growth of nanowire arrays in porous membrane templates // *Journal of the Electrochemical Society*, 2014, vol. 161, is. 8, pp. E3341–E3347. doi: 10.1149/2.039408jes
15. Puy-Llovera J., Pérez-Ráfols C., Serrano N., Díaz-Cruz J. M., Ariño C., Esteban M. Selenocystine modified screen-printed electrode as an alternative sensor for the voltammetric determination of metal ions // *Talanta*, 2017, vol. 175, pp. 501–506. doi: 10.1016/j.talanta.2017.07.089
16. Жуманазар Н. Н., Корольков И. В., Есжанов А. Б., Шакаева А. Х., Ташенов А. К., Здоровец М. В. Сенсоры на основе трековых мембран для электрохимического детектирования ионов кадмия // *Вестник НЯЦ РК*. 2021. № 1. С. 4–8. doi: 10.52676/1729-7885-2021-1-5-8
17. Hadjichristov G. B., Marinov Y., Vlahov T. E., Scaramuzza N. Chapter Five - Phospholipid Langmuir-Blodgett nano-thin monolayers: Electrical response to cadmium ions and harmful volatile organic compounds // *Advances in Biomembranes and Lipid Self-Assembly*, 2021, vol. 34, p. 129–172. doi: 10.1016/bs.abl.2021.11.005
18. Zdorovets M. V., Korolkov I. V., Yeszhanov A. B., Gorin Y. G. Functionalization of PET Track-Etched Membranes by UV-Induced Graft (co)Polymerization for Detection of Heavy Metal Ions in Water // *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 11. doi: 10.3390/polym11111876
19. Pinaeva U., Dietz T. C., Al Sheikhly M., Balanzat E., Castellino M., Wade T. L., Clochard M. C. Bis[2-(methacryloyloxy)ethyl] phosphate radiografted into track-etched PVDF for uranium (VI) determination by means of cathodic stripping voltammetry // *Reactive and Functional Polymers*, 2019, vol. 142, pp. 77–86. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2019.06.006
20. Wu S., Hao J., Yang S., Sun Y., Wang Y., Zhang W., Mao H., Song X.-M. Layer-by-Layer Self-Assembly Film of PEI-Reduced Graphene Oxide Composites and Cholesterol Oxidase for Ultrasensitive Cholesterol Biosensing // *Sens. Actuators B: Chem.*, 2019, vol. 298. doi: 10.1016/j.snb.2019.126856
21. Mashentseva A. A., Barsbay M., Aimanova N. A., Zdorovets M. V. Application of Silver-Loaded Composite Track-Etched Membranes for Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue under Visible Light // *Membranes*, 2021, vol. 11, is. 1. doi: 10.3390/membranes11010060
22. Jaiswal S., Singh R., Singh K., Fatma S., Prasad B. B. Enantioselective Analysis of D-and L-Serine on a Layer-by-Layer Imprinted Electrochemical Sensor // *Biosens. Bioelectron.*, 2019, vol. 124-125, pp. 176–183. doi: 10.1016/j.bios.2018.09.090
23. Scheepers D., Chatillon B., Nijmeijer K., Borneman Z. Asymmetric Layer-by-Layer Polyelectrolyte Nanofiltration Membranes with Tunable Retention // *J. Polym. Sci.*, 2021, vol. 59, pp. 1293–1304. doi: 10.1002/pol.20210166
24. Ling H., Liu L., Lee P. S., Mandler D., Lu X. Layer-by-Layer Assembly of PEDOT:PSS and WO₃ Nanoparticles: Enhanced Electrochromic Coloration Efficiency and Mechanism Studies by Scanning Electrochemical Microscopy // *Electrochim. Acta*, 2015, vol. 174, pp. 57–65. doi: 10.1016/j.electacta.2015.05.147
25. Lu Y., Wu Y., Liang J., Libera M. R., Sukhishvili S. A. Self-Defensive Antibacterial Layer-by-Layer Hydrogel Coatings with pH-Triggered Hydrophobicity // *Biomaterials* 2015, vol. 45, pp. 64–71. doi: 10.1016/j.biomaterials.2014.12.048
26. Ma S., Yuan Q., Zhang X., Yang S., Xu J. Solvent Effect on Hydrogen-Bonded Thin Film of Poly(Vinylpyrrolidone) and Poly(Acrylic Acid) Prepared by Layer-by-Layer Assembly // *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2015, vol. 471, pp. 11–18. doi: 10.1016/j.colsurfa.2015.01.057
27. Li P., Chen K., Zhao L., Zhang H., Sun H., Yang X., Kim N. H., Lee J. H., Niu Q. J. Preparation of Modified Graphene Oxide/Polyethyleneimine Film with Enhanced Hydrogen Barrier Properties by Reactive Layer-by-Layer Self-Assembly // *Compos. Part B: Eng.*, 2019, vol. 166, pp. 663–672. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.02.058
28. Skorb E. V., Volkova A. V., Andreeva D. V. Layer-by-Layer Approach for Design of Chemical Sensors and Biosensors // *Curr. Org. Chem*, 2015, vol. 19, is. 12, pp. 1097–1116. doi: 10.2174/1385272819666150318221914
29. Korolkov I. V., Mashentseva A. A., Güven O., Zdorovets M. V., Taltenov A. A. Enhancing hydrophilicity and water permeability of PET track-etched membranes by advanced oxidation process // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2015, vol. 365, pp. 651–655. doi: 10.1016/j.nimb.2015.10.031
30. Kutuzau M., Kozlovskiy A., Borgekov D., Kenzhina I., Zdorovets M., Chernik A., Alisienok O., Shumskaya A., Kaniukov E. Optimization of PET ion-track membranes parameters // *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 7, Part 3, pp. 866–871. doi: 10.1016/j.matpr.2018.12.086
31. Мельникова Г. Б., Сапсалёв Д. В., Толстая Т. Н., Корольков И. В., Чижик С. А., Жуманазар Н. Н., Баранова А. С., Здоровец М. В. Наноструктурированные покрытия на основе Ленгмюра – Блоджетт пленок перфтороктадекановой кислоты для гибких дат-

чиков анализа ионов свинца в воде // Полимерные материалы и технологии. 2024. Т. 10, № 1. С. 36–44. doi: 10.32864/polymmattech-2024-10-1-36-44

32. Сапсальёв Д. В., Мельникова Г. Б., Толстая Т. Н., Чижик С. А. Особенности формирования, структура и свойства Ленгмюра–Блоджетт пленок поливинилкарбазола с неорганическими наночастицами // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2025. Т. 69, № 2. С. 150–158. doi:10.29235/1561-8323-2025-69-2-150-158

References

- Siwy Z., Kosińska I. D., Fuliński A., Martin C. R. Asymmetric Diffusion through Synthetic Nanopores. *Physical Review Letters*, 2005, vol. 94, no. 4. doi: 10.1103/PhysRevLett.94.048102
- Venkatesan B. M., Dorvel B., Yemenicioglu S., Watkins N., Petrov I., Bashir R. Highly Sensitive, Mechanically Stable Nanopore Sensors for DNA Analysis. *Advanced Materials*, 2009, vol. 21, no. 27, pp. 2771–2776. doi: 10.1002/adma.200803786
- Nuryanthi N., Yamaki T., Koshikawa H., Asano M., Enomoto K., Sawada S.-I., Maekawa Y., Voss K.-O., Trautmann C., Neumann R. Poly(vinylidene fluoride)-Based Ion Track Membranes with Different Pore Diameters and Shapes. SEM Observations and Conductometric Analysis. *Electrochemistry*, 2010, vol. 78, is. 2, pp. 146–149. doi: 10.5796/electrochemistry.78.146
- Barsbay M., Güven O., Bessbousse H., Wade T. L., Beuneu F., Clochard M.-C. Nanopore size tuning of polymeric membranes using the RAFT-mediated radical polymerization. *J. Membr. Sci.*, 2013, vol. 445, pp. 135–145. doi: 10.1016/j.memsci.2013.05.029
- Matsuguchi M., Horio K., Uchida A., Kakunaka R., Shiba S. A Flexible Ammonia Gas Sensor Based on a Grafted Polyaniline Grown on a Polyethylene Terephthalate Film. *Sensors*, 2024, vol. 24, is. 11. doi: 10.3390/s24113695
- Lee J. S., Peng B., Sabuncu A. C., Nam S., Ahn C. V., Kim M. J., Kim M. J. Multiple consecutive recapture of rigid nanoparticles using a solid-state nanopore sensor. *Electrophoresis*, 2018, vol. 39, no. 5-6, pp. 833–843. doi: 10.1002/elps.201700329
- Kaya D., Dinler A., San N., Kececi K. Effect of Pore Geometry on Resistive-Pulse Sensing of DNA Using Track-Etched PET Nanopore Membrane. *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 202, pp. 157–165. doi: 10.1016/j.electacta.2016.04.014
- Zhai Q., Wang J., Jiang H., Wei Q., Wang E. Bare conical nanopore embedded in polymer membrane for Cr (III) sensing. *Talanta*, 2015, vol. 140, pp. 219–225. doi: 10.1016/j.talanta.2015.03.035
- Belardinelli R., Sharma H., Peske F., Rodnina M. V. Perturbation of ribosomal subunit dynamics by inhibitors of tRNA translocation. *RNA*, 2021, vol. 27, pp. 981–990. doi: 10.1261/rna.078758.121
- Darvish A. Lee J. S., Peng B., Saharia J., Sundaram R. V. K., Goyal G., Bandara N., Ahn C. W., Kim J., Dutta P., Chaiken I., Kim M. J. Mechanical characterization of HIV-1 with a solid-state nanopore sensor. *Electrophoresis*, 2019, vol. 40, is. 5, pp. 776–783. doi: 10.1002/elps.201800311
- Plesa C., Kowalczyk S. W., Zinsmeister R., Grosberg A. Y., Rabin Y., Dekker C. Fast translocation of proteins through solid state nanopores. *Nano Letters*, 2013, vol. 13, is. 2, pp. 658–663. doi: 10.1021/nl3042678
- Traversi F., Raillon C., Benameur S. M., Liu K., Khlybov S., Tosun M., Krasnozhan D., Kis A., Radenovic A. Detecting the translocation of DNA through a nanopore using graphene nanoribbons. *Nature Nanotechnology*, 2013, vol. 8, pp. 939–945. doi: 10.1038/nnano.2013.240
- Venta K., Shemer G., Puster M., Rodríguez-Manzo J. A., Balan A., Rosenstein J. K., Shepard K., Drndic M. Differentiation of short, single-stranded DNA homopolymers in solid-state nanopores. *ACS Nano*, 2013, vol. 7, no. 5, pp. 4629–4636. doi: 10.1021/nn4014388
- Blanco S., Vargas R., Mostany J., Borrás C., Scharifker B. R. Modeling the growth of nanowire arrays in porous membrane templates. *Journal of the Electrochemical Society*, 2014, vol. 161, is. 8, pp. E3341–E3347. doi: 10.1149/2.039408jes
- Puy-Llovera J., Pérez-Ràfols C., Serrano N., Díaz-Cruz J. M., Ariño C., Esteban M. Selenocystine modified screen-printed electrode as an alternative sensor for the voltammetric determination of metal ions. *Talanta*, 2017, vol. 175, pp. 501–506. doi: 10.1016/j.talanta.2017.07.089
- Zhunanazar N. N., Korolkov I. V., Eszhanov A. B., Shakaeva A. Kh., Tashenov A. K., Zdorovets M. V. Sensory na osnove trekovykh membran dlya elektrokhimicheskogo detek-tirovaniya ionov kadmiya [Sensors based on track-etched membranes for electrochemical detection of cadmium ions]. *Vestnik NYaTs RK* [NNC RK Bulletin], 2021, no. 1, pp. 4–8. doi: 10.52676/1729-7885-2021-1-5-8
- Hadjichristov G. B., Marinov Y., Vlakhov T. E., Scaramuzza N. Chapter Five - Phospholipid Langmuir-Blodgett nano-thin monolayers: Electrical response to cadmium ions and harmful volatile organic compounds. *Advances in Biomembranes and Lipid Self-Assembly*, 2021, vol. 34, p. 129–172. doi: 10.1016/bs.abl.2021.11.005
- Zdorovets M. V., Korolkov I. V., Yeszhanov A. B., Gorin Y. G. Functionalization of PET Track-Etched Membranes by UV-Induced Graft (co)Polymerization for Detection of Heavy Metal Ions in Water. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 11. doi: 10.3390/polym11111876
- Pinaeva U., Dietz T. C., Al Sheikhy M., Balanzat E., Castellino M., Wade T. L., Clochard M. C. Bis[2-(methacryloyloxy)ethyl] phosphate radiografted into track-etched PVDF for uranium (VI) determination by means of cathodic stripping voltammetry. *Reactive and Functional Polymers*, 2019, vol. 142, pp. 77–86. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2019.06.006
- Wu S., Hao J., Yang S., Sun Y., Wang Y., Zhang W., Mao H., Song X.-M. Layer-by-Layer Self-Assembly Film of PEI-Reduced Graphene Oxide Composites and Cholesterol Oxidase for Ultrasensitive Cholesterol Biosensing. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2019, vol. 298. doi: 10.1016/j.snb.2019.126856
- Mashentseva A. A., Barsbay M., Aimanova N. A., Zdorovets M. V. Application of Silver-Loaded Composite Track-Etched Membranes for Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue under Visible Light. *Membranes*, 2021, vol. 11, is. 1. doi: 10.3390/membranes11010060
- Jaiswal S., Singh R., Singh K., Fatma S., Prasad B. B. Enantioselective Analysis of D-and L-Serine on a Layer-by-Layer Imprinted Electrochemical Sensor. *Biosens. Bioelectron.*, 2019, vol. 124-125, pp. 176–183. doi: 10.1016/j.bios.2018.09.090
- Scheepers D., Chatillon B., Nijmeijer K., Borneman Z. Asymmetric Layer-by-Layer Polyelectrolyte Nanofiltration Membranes with Tunable Retention. *J. Polym. Sci.*, 2021, vol. 59, pp. 1293–1304. doi: 10.1002/pol.20210166
- Ling H., Liu L., Lee P. S., Mandler D., Lu X. Layer-by-Layer Assembly of PEDOT:PSS and WO₃ Nanoparticles: Enhanced Electrochromic Coloration Efficiency and Mechanism Studies by Scanning Electrochemical Microscopy. *Electrochim. Acta*, 2015, vol. 174, pp. 57–65. doi: 10.1016/j.electacta.2015.05.147
- Lu Y., Wu Y., Liang J., Libera M. R., Sukhishvili S. A. Self-Defensive Antibacterial Layer-by-Layer Hydrogel Coatings with pH-Triggered Hydrophobicity. *Biomaterials*, 2015, vol. 45, pp. 64–71. doi: 10.1016/j.biomaterials.2014.12.048
- Ma S., Yuan Q., Zhang X., Yang S., Xu J. Solvent Effect on Hydrogen-Bonded Thin Film of Poly(Vinylpyrrolidone) and Poly(Acrylic Acid) Prepared by Layer-by-Layer Assembly. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2015, vol. 471, pp. 11–18. doi: 10.1016/j.colsurfa.2015.01.057
- Li P., Chen K., Zhao L., Zhang H., Sun H., Yang X., Kim N. H., Lee J. H., Niu Q. J. Preparation of Modified Graphene Oxide/Polyethyleneimine Film with Enhanced Hydrogen Barrier Properties by Reactive Layer-by-Layer Self-Assembly. *Compos. Part B: Eng.*, 2019, vol. 166, pp. 663–672. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.02.058
- Skorb E. V., Volkova A. V., Andreeva D. V. Layer-by-Layer Approach for Design of Chemical Sensors and Biosensors. *Curr. Org. Chem.*, 2015, vol. 19, is. 12, pp. 1097–1116. doi: 10.2174/1385272819666150318221914

29. Korolkov I. V., Mashentseva A. A., Güven O., Zdorovets M. V., Taltenov A. A. Enhancing hydrophilicity and water permeability of PET track-etched membranes by advanced oxidation process. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2015, vol. 365, pp. 651–655. doi: 10.1016/j.nimb.2015.10.031
 30. Kutuzau M., Kozlovskiy A., Borgekov D., Kenzhina I., Zdorovets M., Chernik A., Alisienok O., Shumskaya A., Kaniukov E. Optimization of PET ion-track membranes parameters. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 7, Part 3, pp. 866–871. doi: 10.1016/j.matpr.2018.12.086
 31. Mel'nikova G. B., Sapsalev D. V., Tolstaya T. N., Korol'kov I. V., Chizhik S. A., Zhumanazar N. N., Baranova A. S., Zdorovets M. V. Nanos-trukturirovannyye pokrytiya na osnove Lengmyura – Blodzhett plenok perfloroktadekanovoy kisloty dlya gibkikh datchikov analiza ionov svintsya v vode [Nanostructured Langmuir–Blodgett based coatings of perfluorooctadecanoic acid films for flexible sensors for the analysis of lead ions in water]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2024, vol. 10, no. 1, pp. 36–44. doi: 10.32864/polymmattech-2024-10-1-36-44
 32. Sapsalev D. V., Mel'nikova G. B., Tolstaya T. N., Chizhik S. A. Osobennosti formirovaniya, struktura i svoystva Lengmyura–Blodzhett plenok polivinikarbazola s neoragnicheskimi nanochastitsami [Features of formation, structure and properties of Langmuir–Blodgett films of poly(vinyl carbazole) with inorganic nanoparticles]. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Reports of the National Academy of Sciences of Belarus], 2025, vol. 69, no. 2, pp. 150–158. doi:10.29235/1561-8323-2025-69-2-150-158
-