

## ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ В ПОТОКЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ НА ГИДРОФИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИУРЕТАНОВОЙ МЕМБРАНЫ

И.Ф. Сайфутдинова, И.А. Чиклеев, А.А. Азанова

Кафедра материалы и технологии легкой промышленности, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, Российская Федерация, 420015  
E-mail: isayfutdinova@mail.ru, tred302@mail.ru, azanovaaa@corp.knrtu.ru

*В современном мире применение мембранных материалов в одежде стало неотъемлемой частью в текстильной промышленности. Об этом свидетельствует постоянный потребительский спрос, который обусловлен особенностью этого материала. Привлекательность заключается в том, что одежда из мембранного материала способна пропускать испарения тела человека наружу, при этом задерживая капли воды извне и защищая от ветра, за счет чего обеспечивается сухость и комфорт. Высокий потребительский спрос способствует разработке новых мембранных материалов и усовершенствованию уже имеющихся. Из известных методов модификации текстильных материалов все большее влияние находит обработка потоком низкоэнергетических ионов в среде плазмаобразующих газов. Данный метод обработки позволяет изменить свойства материала: физико-механические характеристики, водоупорность, смачиваемость, паропроницаемость, пористость, поверхность. Этот метод обработки также можно применять для модификации полимерных мембран. В работе приведены исследования по модификации полиуретановой (ПУ) мембраны в потоке низкоэнергетических ионов в среде воздуха. Проведенные исследования показали возможность повышения смачиваемости поверхности мембраны. Обработка в потоке низкоэнергетических ионов в среде воздуха позволяет придать полиуретановой мембране гидрофильность, снижая краевой угол смачивания при непродолжительном воздействии до 68°. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки приводит к уменьшению краевого угла смачивания и при  $t=30$  мин он составляет 56°. Эффект гидрофилизации ПУ мембраны за счет обработки может найти применение для улучшения ее технологических свойств в производстве мембранных материалов, а также для улучшения их гигиенических свойств.*

**Ключевые слова:** полиуретановая мембрана, поток низкоэнергетических ионов, плазма, краевой угол смачивания, гидрофильность

## THE EFFECT OF LOW-ENERGY ION TREATMENT ON THE HYDROPHILIC PROPERTIES OF A POLYURETHANE MEMBRANE

I.F. Sayfutdinova, I.A. Chikleev, A.A. Azanova

Department of Light Industry Technology and Materials, Kazan National Research Technological University, K. Marx St., 68, 420015, Kazan, Russian Federation  
E-mail: isayfutdinova@mail.ru, tred302@mail.ru, azanovaaa@corp.knrtu.ru

*Today, the use of membrane materials in clothing has become an integral part of the textile industry. This is evidenced by the constant consumer demand, which is due to the peculiarity of this material. The attraction lies in the fact that clothing made of membrane material is able to let the evaporation of the human body out, while trapping water droplets from outside and protecting it from the wind, thereby ensuring dryness and comfort. High consumer demand contributes to the development of new membrane materials and the improvement of existing ones. Of the known methods for modifying textile materials, treatment with a stream of low-energy ions in a plasma-forming gas environment is increasingly influential. This processing method allows you to change*

*the properties of the material: physical and mechanical characteristics, water resistance, wettability, vapor permeability, porosity, surface. This treatment method can also be used to modify polymer membranes. The work carried out studies on the modification of a polyurethane membrane in the flow of low-energy ions in the air. The conducted studies have shown the possibility of increasing the wettability of the membrane surface. Processing in a low-energy ion stream in an air environment makes the polyurethane membrane hydrophilic, reducing the contact angle to 68° during a short exposure. Further increasing the processing time leads to a decrease in the contact angle, which reaches 56° after 30 min. The hydrophilization effect of the polyurethane membrane can be used to improve its technological properties in the production of membrane materials, as well as to enhance their hygienic characteristics.*

**Keywords:** polyurethane membrane, low-energy ion flux, plasma, contact angle, hydrophilicity

**Для цитирования:**

Сайфутдинова И.Ф., Чиклеев И.А., Азанова А.А. Влияние обработки в потоке низкоэнергетических ионов на гидрофильные свойства полиуретановой мембраны. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 4. С. 88–91. DOI: 10.6060/rcj.2025694.14.

**For citation:**

Sayfutdinova I.F., Chikleev I.A., Azanova A.A. The effect of low-energy ion treatment on the hydrophilic properties of a polyurethane membrane. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 4. P. 88–91. DOI: 10.6060/rcj.2025694.14.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для улучшения эксплуатационных характеристик специальной защитной одежды активно применяются мембранные материалы [1], представляющие собой текстильную основу, ламинированную полимерной мембраной [2, 3]. Одежная мембрана способна пропускать водяной пар, отводя его от тела человека наружу, но при этом препятствует проникновению воды извне. По принципу действия мембраны разделяются на пористые, сплошные (непористые), комбинированные. Пористые мембраны обеспечивают пропускание водяных паров за счет структуры, при этом максимальный размер пор на внешней поверхности не превышает 2–3 мкм. Сплошная мембрана представляет собой пленку, которая сорбирует влагу и выводит наружу за счет гидрофильных групп в цепи полимера, по которым перемещаются молекулы водяного пара. Комбинированные мембраны объединяют оба варианта транспортировки. У каждой из мембран есть свои преимущества и недостатки. Так, пористая мембрана имеет наибольшую паропроницаемость, однако в процессе эксплуатации поры загрязняются веществами, осаждающимися в результате потоотделения или внешних воздействий и паропроницаемость постепенно снижается. Сплошная структура значительно уступает пористой в паропроницаемости, однако имеет более долговечное действие. Полимерные мембраны чаще всего изготавливаются на основе полиурета-

нов, политетрафторэтилена, полиэтилентерефталата, полиамида, различных сополимеров [4].

При эксплуатации одежды из мембранных текстильных материалов важной задачей является сохранение функциональности, которая определяется не только свойствами мембраны и текстильной подложки, но и прочностью их соединения. Поверхность мембраны является гидрофобной, что снижает ее адгезионную способность при ламинировании и приводит к ухудшению внешнего вида и защитных свойств. Существует ряд методов, которые позволяют модифицировать и активировать поверхность полимерных материалов [5–8]. Одним из перспективных направлений модификации, позволяющих направленно изменять требуемые характеристики, не ухудшая другие, является обработка низкотемпературной плазмой. Она давно и широко используется для улучшения гидрофильных, адгезионных и физико-механических характеристик материалов разной природы [9–12].

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе проведено исследование влияния потока низкоэнергетических ионов (ПНЭИ) высокочастотного ёмкостного (ВЧЕ) разряда пониженного давления на характеристики полиуретановой мембраны (18,4 г/м<sup>2</sup>) МТ-3 (ООО «Мембранные технологии», Иваново), которая применяется для изготовления мембранных материалов для аутдор-и спецодежды. Обработка ПНЭИ осуществлялась на установке, описанной в работе [13], в газообра-

зующей среде воздуха. Параметры обработки: расход газа ( $G$ ) 0,04 г/с, мощность разряда ( $W$ ) 750 Вт, давление газа ( $P$ ) 30-35 Па, время обработки ( $t$ ) 3, 5, 10, 15 и 30 мин. Краевой угол смачивания ( $\theta$ ) определялся статическим методом сидячей капли с помощью прибора Kruss Easy Drop DSA 20E (фирма KRUSS, Германия). Для исследования поверхности и среза мембран использовали метод конфокальной лазерной сканирующей микроскопии в отраженном свете (микроскоп Olympus OLS LEXT OLS-4100, Olympus, Германия).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения  $\theta$  для приведены на рис. 1. Значение  $\theta$  для контрольного образца ПУ мембраны МТ-3 составляет  $95^\circ$  (рис. 2).

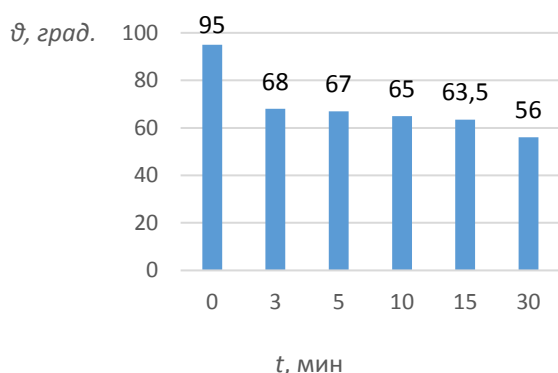


Рис. 1. Краевой угол смачивания водой  $\theta$  мембраны МТ-3 в зависимости от времени обработки ПНЭИ  $t$

Fig. 1. The water contact angle  $\theta$  of the MT-3 membrane as a function Treatment in a Low-Energy Ions Flow treatment time  $t$

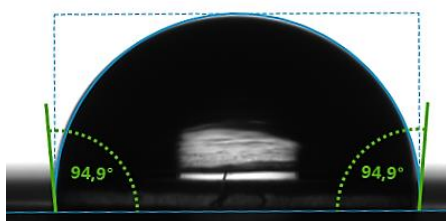


Рис. 2. Краевой угол смачивания контрольного образца ПУ мембраны МТ-3

Fig. 2. Contact angle of the control sample of the MT-3 PU membrane

Обработка мембраны МТ-3 в среде воздуха при  $W=750$  Вт и  $t=3$  мин вызывает уменьшение краевого угла смачивания водой  $\theta$  до  $68^\circ$ . Дальнейшее увеличение продолжительности экспозиции приводит к уменьшению краевого угла смачивания и при  $t=30$  мин он составляет  $56^\circ$  (рис. 3), поверхность мембраны становится еще более гидрофильной. Это объясняется образованием гидрофильных, прежде всего гидроксильных функциональных

групп в результате воздействия низкоэнергетическими ионами кислорода, содержащегося в плазмообразующем газе воздухе. При этом паропоницаемость модифицированных образцов выше, чем у исходного, на 5-20% в зависимости от режима обработки.



Рис. 3. Краевой угол смачивания обработанного образца ПУ мембраны МТ-3 в течение 30 мин

Fig. 3. Contact angle of the processed PU membrane sample MT-3 for 30 min

Воздействие ПНЭИ приводит также к изменению поверхности мембраны (рис. 4).

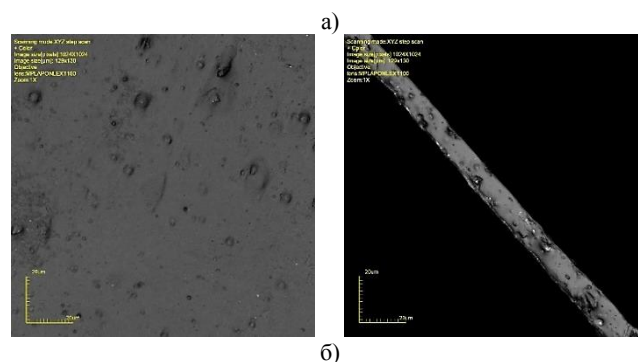
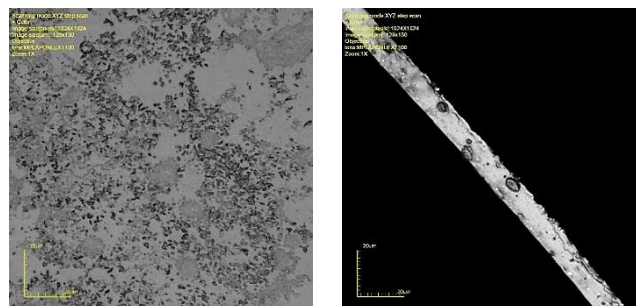


Рис. 4. Микрофотографии поверхности и среза мембран (увеличение  $\times 100$ ): а) контрольный образец; б) обработанный в течение 30 мин в среде воздуха

Fig. 4. Micrographs of the surface and cross-section of the membranes (magnification  $\times 100$ ): а) control sample; б) of the processed for 30 min in air

Микрофотографии (рис. 4а) демонстрируют развитый рельеф и неравномерность структуры поверхности контрольного образца. После обработки в среде воздуха  $t=30$  мин происходит сглаживание рельефа поверхности мембраны, она становится менее шероховатой (рис. 4б). Испытания образцов

показали, что плазменная обработка не только не снижает показатели механических свойств мембраны, но и в определенных режимах способствует их улучшению.

### ВЫВОДЫ

Обработка ПНЭИ позволяет придать полиуретановой мембране гидрофильность, снижая краевой угол смачивания при непродолжительном воздействии до 68°, при этом не ухудшая, а в неко-

торых случаях улучшая, остальные свойства. Активация поверхности полимерной мембраны с помощью ПНЭИ создает условия для повышения ее адгезионных характеристик, что повысит ее технологические характеристики в производстве мембранных материалов.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьева К.А., Корнилович А.В., Малинская А.Н. // Сборник материалов Международного научно-практического форума «SMARTEX-2024». 2024. С. 95-98.
2. Абдуллин И.Ш. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 12. С. 37-41.
3. Хамматова Э.А., Гайнутдинов Р.Ф. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5. С. 395. DOI: 10.47367/0021-3497\_2021\_5\_18.
4. Лебедева О.А., Седелкин В.М., Потехина Л.Н. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 58-65. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6340.
5. Ершов И.П. и др. // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 5. С. 136-143.
6. Ефремов А.М., Бетелин В.Б., Медников К.А., Kwon K.-H. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 7. С. 46-53. DOI: 10.6060/ivkkt.20216407.6390.
7. Ерзунов К.А., Одинцова О.И., Трегубов А.В., Ильичева М.Д., Липина А.А. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 89-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.
8. Липина А.А., Петрова Л.С., Одинцова О.И., Козлова О.В., Владимирцева Е.Л., Смирнова С.В., Ильичева М.Д. // Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 97-104. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6628.
9. Антонова М.В., Красина И.В., Илюшина С.В. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 3. С. 100-103.
10. Абдуллин И.Ш., Некрасов И.К. // Материалы докладов IX Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. 2022. С. 498-510.
11. Ходыревская Ю.И., Кудрявцева Ю.А. // Новые материалы. 2016. С. 207-209.
12. Азанова А.А., Сайфутдинова И.Ф., Абуталипова Л.Н. // Материалы международного форума, посвященного 35-летию Технологического университета Таджикистана. 2025. С. 23-28.
13. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2000. 348 с.

### REFERENCES

1. Dementieva K.A., Kornilovich A.V., Malinskaya A.N. // Proceedings of the SMARTEX-2024 International Scientific and Practical Forum. 2024. P. 95-98.
2. Abdullin I. S. and others. // Bulletin of Kazan Technological University. 2014. V. 17. N 12. P. 37-41.
3. Khammatova E.A., Gainutdinov R.F. // Izvestiya vuzov. Technology of the textile industry. 2021. N 5. P. 395. DOI: 10.47367/0021-3497\_2021\_5\_18.
4. Lebedeva O.A., Sedelkin V.M., Potekhin L.N. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 1. P. 58-65. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6340.
5. Yershov I.P. et al. // Bulletin of Kazan Technological University. 2012. N 5. P. 136-143.
6. Efremov A.M., Betelin V.B., Mednikov K.A., Kwon K.-H. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]. 2021. V. 64. N 7. P. 46-53. DOI: 10.6060/ivkkt.20216407.6390.
7. Erzunov K.A., Odintsova O.I., Tregubov A.V., Ilyicheva M.D., Lipina A.A. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 9. P. 89-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.
8. Lipina A.A., Petrova L.S., Odintsova O.I., Kozlova O.V., Vladimirtseva E.L., Smirnova S.V., Ilyicheva M.D. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 6. P. 97-104. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6628.
9. Antonova M.V., Krasina I.V., Ilyushina S.V. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Technology of the textile industry. 2019. N 3. P. 100-103.
10. Abdullin I. Sh., Nekrasov I. K. // Materials of the reports of the IX International Conference with elements of a scientific school for young people. 2022. P. 498-510.
11. Khodyrevskaya Yu. I., Kudryavtseva Yu. A. // New materials. 2016. P. 207-209.
12. Azanova A.A., Sayfutdinova I.F., Abutalipova L.N. // Materials of the international forum dedicated to the 35th anniversary of the Technological University of Tajikistan. 2025. P. 23-28.
13. Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Kashapov N.F. High-frequency plasma-jet processing of materials at reduced pressures. Theory and practical application. Kazan: Kazan Publishing House. University, 2000. P. 348.

Поступила в редакцию (Received) 09.07.2025

Принята к опубликованию (Accepted) 13.08.2025