УДК 677.12
DOI 10.47367/0021-3497_2026_3_147

ВЛИЯНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА

EFFECT OF GAS DISCHARGE TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF NON-WOVEN MATERIALS BASED ON POLYPROPYLENE

М.С. ЛИСАНЕВИЧ[1], Ю.А. ТИМОШИНА[1,2]

M.S. LISANEVICH[1], Y.A. TIMOSHINA[1,2]

**([1]Казанский национальный исследовательский технологический университет,
[2]Альметьевский государственный технологический университет "Высшая школа нефти")**

**([1]Kazan National Research Technology University,
[2]Almetyevsk State Technological University "Higher School of Oil")**

E-mail: lisanevichms@gmail.com

В статье исследовано влияние газоразрядной плазменной обработки на физико-химические и потребительские свойства полипропиленовых нетканых материалов (НМ) различных производителей. Проведен комплексный анализ изменений воздухопроницаемости, жесткости при изгибе, краевого угла смачивания, поверхностной энергии и химического состава поверхности после обработки в средах аргона и воздуха. Результаты показали, что плазменная модификация способствует значительному увеличению воздухопроницаемости (до 20%) и снижению жесткости (до 44%), что улучшает комфорт при использовании материалов в одежде. Краевой угол смачивания уменьшился с 65° до 28°, указывая на повышение гидрофильности поверхности, что положительно сказывается на впитывающих свойствах НМ. Анализ поверхностной энергии выявил более чем двукратное увеличение общей поверхностной энергии за счет роста кислотно-основной составляющей, обусловленное введением новых функциональных групп, подтвержденных ИК-спектроскопией. Дифференциальный сканирующий калориметрический анализ показал изменения термических характеристик материала после обработки. Полученные данные свидетельствуют о том, что газоразрядная плазменная обработка эффективно улучшает эксплуатационные характеристики полипропиленовых нетканых материалов, расширяя их функциональные возможности и потенциальные области применения, включая производство гигиенических и медицинских изделий с повышенной воздухопроницаемостью и впитывающей способностью.

This article examines the effect of gas-discharge plasma treatment on the physicochemical and consumer properties of polypropylene nonwoven materials (NWFs) from various manufacturers. A comprehensive analysis of changes in air permeability, flexural rigidity, contact angle, surface energy, and surface chemical composition after treatment in argon and air environments was conducted. The results showed that plasma modification contributes to a significant increase in air permeability (up to 20%) and a decrease in rigidity (up to 44%), which improves the comfort of using the materials in clothing. The contact angle decreased from 65° to 28°, indicating an increase in surface hydrophilicity, which positively affects the absorbent properties of the NWF. Surface energy analysis revealed a more than twofold increase in total surface energy due to an increase in the acid-base

component, caused by the introduction of new functional groups, confirmed by IR spectroscopy. Differential scanning calorimetric analysis revealed changes in the thermal characteristics of the material after treatment. The obtained data indicate that gas discharge plasma treatment effectively improves the performance characteristics of polypropylene nonwoven materials, expanding their functionality and potential areas of application, including the production of hygienic and medical products with increased air permeability and absorbency.

Ключевые слова: полипропилен, нетканые материалы, газоразрядная плазменная обработка, воздухопроницаемость, жесткость при изгибе, краевой угол смачивания, поверхностная энергия, гидрофильность, ИК-спектроскопия, термические характеристики.

Keywords: polypropylene, nonwoven materials, gas discharge plasma treatment, air permeability, bending stiffness, contact angle, surface energy, hydrophilicity, IR spectroscopy, thermal characteristics.

Введение

Нетканые материалы (НМ) на основе полипропилена (ПП) занимают ключевое место в современной промышленности благодаря уникальному сочетанию легкости, прочности, химической инертности и технологичности производства. Они широко применяются в различных областях: от фильтрации воздуха и воды, медицинских изделий, упаковочных материалов до строительства и автомобильной промышленности. Однако выраженная гидрофобность материалов на основе ПП, связанная с неполярной углеводородной структурой полимера, ограничивает их функциональность и расширение областей применения.

Для повышения гидрофильности полимерных материалов применяются различные методы, среди которых газофазные методы, преимущества которых заключаются в отсутствии использования токсичных жидких реагентов, а также возможности направленного изменения поверхностных свойств материалов при сохранении основных эксплуатационных характеристик [1…15]. Плазменная модификация приводит к повышению гидрофильности модифицируемых материалов за счет образования на их поверхности полярных функциональных групп, состав которых зависит от параметров плазменной модификации и используемых плазмообразующих газов [16].

Целью настоящей работы является исследование влияния плазменной модификации на химический состав, структуру и потребительские свойства ПП нетканых материалов.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использованы многослойные нетканые материалы типа СМС производства ООО "Завод Эластик" (г. Нижнекамск) и компании "Avgol Ltd" (Израиль), а также типа СММС производства ООО "Снабика" (г. Подольск), компании "Ahlstrom Fibercomposites India Private Ltd" (Индия). Исследование представленных объектов позволяет выявить зависимость эффектов плазменной модификации от структуры нетканых материалов.

Модификация ПП нетканых материалов проводилась в экспериментальной установке на основе высокочастотного генератора на рабочей частоте 13,56 МГц, подающего разряд 1,4…2,2 кВт, при времени обработки от 1 до 7 мин, давлении в рабочей камере 10…30 Па, расходе газа аргона и воздуха 0,95…0,98 н.см^3/мин [17].

Для оценки воздействия газоразрядной обработки на потребительские свойства НМ определяли показатели гигроскопичности (ГОСТ Р 57876-2017), воздухопроницаемости (ISO 9237-99), коэффициент жесткости при изгибе (ГОСТ 10550-93). Для исследования влияния газоразрядной обработки на поверхностные свойства образцов

определяли краевой угол смачивания методом "лежащей капли", свободную поверхностную энергию с использованием графического метода Бергер [18, 19], анализ изменения химической структуры проводили методом ИК-спектроскопии, структурных изменений – методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Обсуждение результатов

Результаты влияния плазменной модификации на гигроскопичность ПП нетканых материалов представлены на рис. 1.

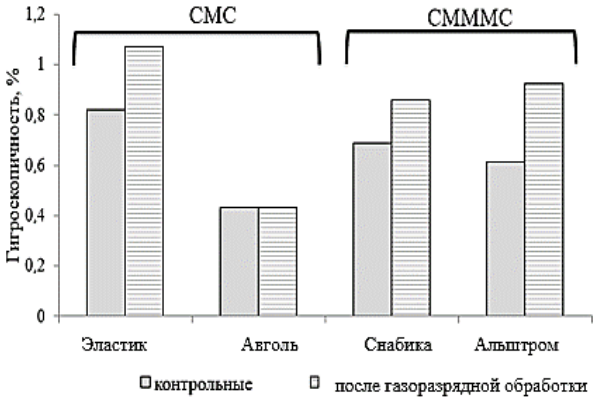

Рис. 1

Гигроскопичность характеризует способность материала поглощать водяные пары из воздуха. Повышение гигроскопичности способствует эффективному транспорту влаговыделений из пододежного пространства к внешней поверхности материалов.

Плазменная модификация приводит к повышению гигроскопичности образцов НМ производства компаний ООО "Завод Эластик", ООО "Снабика" и "Ahlstrom Fibercomposites India Private Ltd" на 28…50% по сравнению с контрольными образцами. Наибольший эффект наблюдается для НМ производства "Ahlstrom Fibercomposites India Private Ltd", для образца "Avgol Ltd" повышения гигроскопичности не происходит (рис. 1).

Одной из существенных потребительских характеристик НМ является воздухопроницаемость, характеризующая их способность пропускать воздух при наличии разности давления воздуха на наружных и внутренних поверхностях. На рис. 2 представлены результаты влияния плазменной модификации на воздухопроницаемость ПП нетканых материалов.

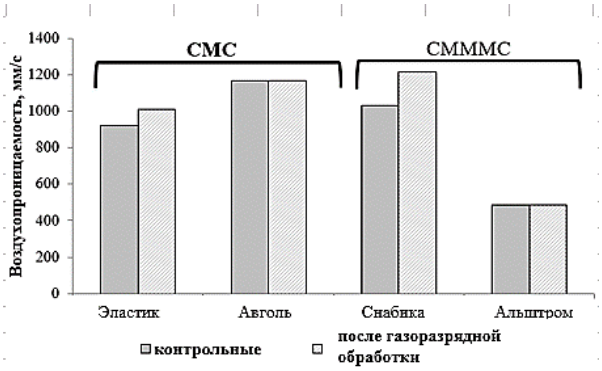

Рис. 2

Для материалов производителей ООО "Снабика" и ООО "Завод Эластик" плазменная модификация привела к значительному увеличению воздухопроницаемости – на 20% и 15% соответственно. В то же время для материалов производства компаний "Ahlstrom Fibercomposites India Private Ltd" и "Avgol Ltd" изменения показателя воздухопроницаемости находились в пределах погрешности (рис. 2).

Одной из важных потребительских характеристик НМ является жесткость при изгибе, которая характеризует способность материала сопротивляться деформации под воздействием внешних изгибающих нагрузок. На рис. 3 представлены результаты влияния плазменной модификации на коэффициент жесткости при изгибе ПП нетканых материалов.

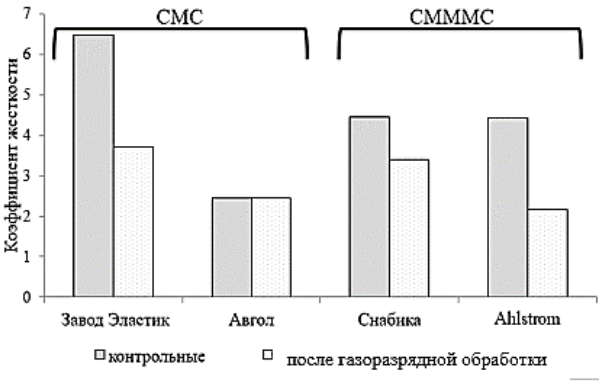

Рис. 3

Полученные результаты (рис. 3) свидетельствуют, что плазменная модификация

приводит к снижению жесткости НМ производства ООО "Завод Эластик", ООО "Снабика" и "Ahlstrom Fibercomposites India Private Ltd", что подтверждается уменьшением коэффициента жесткости на 22…44% по сравнению с контрольными образцами. Для образца "Avgol Ltd" эффект плазменной модификации не наблюдается.

Повышенная жесткость материала приводит к снижению комфорта при ношении одежды и ограничению свободы движений, поэтому снижение жесткости рассматривается как положительный фактор с точки зрения потребительских характеристик НМ.

Результаты влияния плазменной модификации на краевой угол смачивания ПП нетканых материалов (СМС, ООО "Завод Эластик") представлены в табл. 1.

Таблица 1

Образец	Краевой угол смачивания
Контрольный	65
Обработанный в плазмообразующей среде аргона	43
Обработанный в плазмообразующей среде воздуха	28

Полученные результаты (табл. 1) позволяют сделать вывод, что газоразрядная обработка приводит к повышению смачиваемости поверхности ПП нетканых материалов, что подтверждается снижением значений краевого угла смачивания материалов на 34…57% по сравнению с контрольными образцами до обработки. Повышение смачиваемости поверхности позволяет использовать НМ для производства изделий, обладающих впитывающей способностью.

Таблица 2

Образец	γ_L, мДж/м^2	γ_L^d, мДж/м^2	γ_L^{AB}, мДж/м^2
Контрольный	27,8	26,1	1,7
Обработанный в плазмообразующей среде аргона	54,7	25,8	28,9
Обработанный в плазмообразующей среде воздуха	58,4	25,1	33,3

Определенные значения свободной поверхностной энергии СПЭ (γ_L), ее дисперсионной (γ_L^d) и кислотно-основной (γ_L^{AB}) составляющих для ПП материалов (СМС, ООО "Завод Эластик") представлены в табл. 2.

Наибольшее повышение СПЭ образцов наблюдается после их обработки в плазмообразующей среде воздуха, причем увеличение СПЭ исследуемых материалов происходит преимущественно за счет увеличения кислотно-основной составляющей, тогда как дисперсионная компонента СПЭ остается практически неизменной. Повышение кислотно-основной составляющей СПЭ связано с повышением полярности макромолекул на поверхности полимерного материала в результате его газоразрядной обработки.

Для подтверждения влияния газоразрядной обработки на изменение химического состава и структуры ПП материалов образцы исследованы методом ИК-спектроскопии (рис. 4: красный – исходный образец, синий – обработанный в плазмообразующей среде воздуха) и ДСК (рис. 5: 1 – исходный образец; 2 – обработанный в плазмообразующей среде аргона; 3 – обработанный в плазмообразующей среде воздуха; табл. 3).

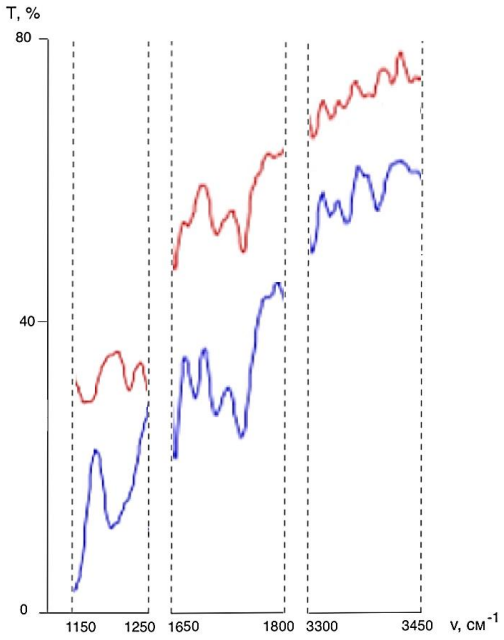

Рис. 4

Для образцов после газоразрядной обработки наблюдается повышение интенсивности и появление новых полос поглощения, характерных для деформационных колебаний гидроксильной группы и колебаний, связанных с С-О связью (1250…1150 см$^{-1}$), валентных колебаний карбонильной (1800…1650 см$^{-1}$) и аминогруппы (3450…3300 см$^{-1}$).

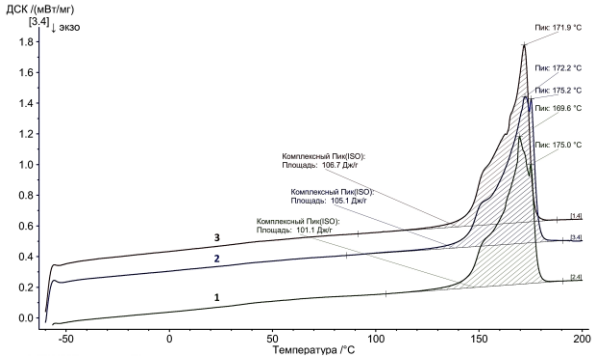

Рис. 5

Таблица 3

Образец	Удельная теплота плавления, Дж/г
Контрольный	101,1
Обработанный в плазмообразующей среде аргона	105,1
Обработанный в плазмообразующей среде воздуха	106,7

По данным ДСК (рис. 5, табл. 3) характер кривых и значения эндотермических пиков имеют отличия. Для контрольного образца наблюдается два выраженных эндотермических пика с максимумами 169,6 °С и 175,0 °С. Для образца, обработанного в плазмообразующем газе аргоне, эндотермические пики имеют максимумы 172,2 °С и 175,2 °С. Для образца, обработанного в плазмообразующей среде воздуха, изменяется характер кривой ДСК, максимум эндотермического пика соответствует 171,9 °С. Некоторое повышение удельной теплоты плавления для обработанных образцов по сравнению с контрольным может быть связано с образованием на поверхности волокон термостабильных кислородсодержащих, например карбонильных, функциональных групп, что также подтверждается данными ИК-спектроскопии. Отличия в характере кривых ДСК для контрольного и обработанных образцов могут свидетельствовать об изменениях структуры волокон в поверхностных слоях полимера.

Полученные результаты позволяют утверждать, что в результате газоразрядной обработки на поверхности ПП материалов происходит образование полярных функциональных групп. Это оказывает влияние на поверхностные свойства материалов, приводя к повышению СПЭ и смачиваемости поверхности. Для образцов, обработанных в плазмообразующем газе аргоне, изменения, происходящие в результате окисления поверхностных слоев полимера, менее выражены по сравнению с процессами окисления, происходящими при обработке в плазмообразующей среде воздуха. Полученные эффекты могут быть использованы для получения ПП нетканых материалов, обладающих повышенной гидрофильностью, сорбционной способностью. Газоразрядная обработка может применяться в качестве предварительной для активации поверхности ПП материалов перед пропиткой функциональными препаратами [19].

Газоразрядная (плазменная) модификация ПП нетканых материалов приводит к улучшению потребительских свойств за счет повышения воздухопроницаемости, снижения жесткости (улучшения комфорта), увеличения смачиваемости поверхности и изменения химического состава поверхности, что расширяет возможности применения таких материалов, в том числе для изделий с повышенными впитывающими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kutepov A.M., Zaharov A.G., Maksimov A.I., Titov V.A.* Plasma modification of textile materials: prospects and problems // Russian chemical journal. 2002, 46 (1), P. 103…115.

2. *Sharnina L.V.* Low-temperature plasma as the basis for creation of modern textile chemical technologies // Fibre Chemistry. 2004, 36 (6), P. 431…436. – DOI 10.1007/s10692-005-0032-6.

3. *Abdullin I.S., Zheltukhin V.S., Nekrasov I.K., Sagitova, F.R.* Experimental and Theoretical Study of the Interaction of a Low-Energy Ion Flow with Chemical Fibers // Fibre Chemistry. 2023, 57, S132–S136. – DOI 10.1134/S0018143923070020.

4. *Лисаневич М.С., Галимзянова Р.Ю., Ибрагимов Р.Г.* Влияние неравновесной низкотемпературной плазмы на потребительские характеристики

спанмелт-материала // Бутлеровские сообщения. 2021. Т. 64, № 11. С. 143…148.

5. *Лисаневич М.С., Галимзянова Р.Ю.* Модификация низкотемпературной плазмой пятислойных спанмелт-материалов медицинского назначения // Бутлеровские сообщения. 2021. Т. 66, № 5. С. 65…69. – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-66-5-65

6. *Максимов А.И., Никифоров А.Ю.* Сопоставление возможностей плазменного и плазменно-растворного модифицирования полимерных материалов в жидкой фазе // Химия высоких энергий. 2007. Т. 41, № 6. С. 513…519.

7. *Сергеева Е.А., Илюшина С.В.* Влияние низкотемпературной плазмы на физико-механические свойства высокомодульных полиэтиленовых волокон // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2011. Т. 12, № 2. С. 14…16.

8. *Фазылова Д.И., Зенитова Л.А., Штейнберг Е.М., Абдуллин И.Ш.* Изучение влияния плазмообразующего газа на структуру текстильных волокон // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 16. С. 52…57.

9. *Азанова А.А.* Плазменная модификация трикотажных полотен // Дизайн. Материалы. Технология. 2013. № 2 (27). С. 86…88.

10. *Федорова Т.А., Ибрагимов Р.Г., Вишневская О.В.* Повышение комплекса гигиенических свойств текстильных материалов с мембранным покрытием // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 2 (374). С. 123…128.

11. *Титов В.А., Ульева С.Н., Никифоров А.Л., Баусов А.М.* Использование низкотемпературной плазмы для придания пожаробезопасных свойств полимерным материалам // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 2(416). С. 56…65.

12. *Хамматова Э.А.* Повышение водоупорности текстильных материалов для спецодежды // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 4(418). С. 135…139.

13. *Шаехов М.Ф., Хальфина Е.Д.* Изменение капиллярности арамидных волокон при модификации высокочастотным разрядом пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 11. С. 609…610.

14. *Кудинов В.В., Мамонов В.И., Корнеева Н.В. и др.* Влияние плазменной активации и термообработки на свойства сверхвысокомолекулярных полиэтиленовых волокон в композиционных материалах // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 5. С. 36…39.

15. *Абдуллина В.Х. и др.* Гидрофилизация полипропиленовой пленочной нити низкотемпературной плазмой пониженного давления // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 4С. С. 129…131.

16. *Timoshina Y.A., Voznesensky E.F.* Research of gas-discharge modification of polymer materials by spectroscopy methods // High Energy Chemistry. 2024. 58 (3), S467–S470. – DOI 10.1134/S0018143924701388.

17. *Timoshina Y.A., Voznesensky E.F., Teptina A.I., Zhelonkin Y.O.* Plasmachemical modification of polymeric materials // High Energy Chemistry. 2023, 57, 1, S256–S259. – DOI: 10.1134/S0018143923070548.

18. *Kraus E., Baudrit B., Haidemeier P. etc.* Analysis of polymer surfaces treated with low-pressure plasma from the point of view of the acid-base approach // Bulletin of the Technological University. 2015, 18 (4), 71–76. – DOI 10.1016/j.apsusc.2016.02.247.

19. *Voznesensky E.F., Timoshina Y.A., Karimullin I.I. etc.* Plasma methods for preparation of the substrate and fixing the nanoparticles in the obtaining of disposable antibacterial synthetic materials // Materials Letters. 2022, 308, 131193. – DOI 10.1016/j.matlet.2021.131193.

R E F E R E N C E S

1. *Kutepov A.M., Zaharov A.G., Maksimov A.I., Titov V.A.* Plasma modification of textile materials: prospects and problems // Russian chemical journal. 2002, 46 (1), pp. 103…115.

2. *Sharnina L.V.* Low-temperature plasma as the basis for the creation of modern textile chemical technologies // Fibre Chemistry. 2004, 36 (6), pp. 431…436. DOI 10.1007/s10692-005-0032-6.

3. *Abdullin I.S., Zheltukhin V.S., Nekrasov I.K., Sagitova F.R.* Experimental and Theoretical Study of the Interaction of a Low-Energy Ion Flow with Chemical Fibers // Fibre Chemistry. 2023, 57, S132–S136. – DOI 10.1134/S0018143923070020.

4. *Lisanevich M.S., Galimzyanova R.Yu., Ibragimov R.G.* Influence of Nonequilibrium Low-Temperature Plasma on the Consumer Characteristics of Span-Melt Materials // Butlerov Communications. 2021. Vol. 64. No. 11. Pp. 143…148.

5. *Lisanevich M.S., Galimzyanova R.Yu.* Modification of Five-Layer Span-Melt Materials for Medical Use with Low-Temperature Plasma // Butlerov Communications. 2021. Vol. 66. No. 5. Pp. 65…69. – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-66-5-65

6. *Maksimov A.I., Nikiforov A.Yu.* Comparison of the Possibilities of Plasma and Plasma-Solution Modification of Polymer Materials in the Liquid Phase // High Energy Chemistry. 2007. Vol. 41, No. 6. Pp. 513…519.

7. *Sergeeva E.A., Ilyushina S.V.* Influence of Low-Temperature Plasma on the Physicomechanical Properties of High-Modulus Polyethylene Fibers // Technology of Light Industry. The News of higher educational institutions. 2011. Vol. 12, No. 2. Pp. 14…16.

8. *Fazylova D.I., Zenitova L.A., Shteinberg E.M., Abdullin I.Sh.* Study of the influence of plasma-forming gas on the structure of textile fibers // Bulletin of the Kazan Technological University. 2011. No. 16. Pp. 52…57.

9. *Azanova A.A.* Plasma modification of knitted fabrics // Design. Materials. Technology. 2013. No. 2 (27). Pp. 86…88.

10. *Fedorova T.A., Ibragimov R.G., Vishnevskaya O.V.* Increase of the complex of hygienic properties of textile materials with membrane coating // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. No. 2 (374). P. 123…128.

11. *Titov V.A., Ulyeva S.N., Nikiforov A.L., Bausov A.M.* Using low-temperature plasma to impress fire-resistant properties to polymeric materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2025. No. 2 (416). P. 56…65.

12. *Khammatova E.A.* Increasing water resistance of textile materials for workwear // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2025. No. 4 (418). P. 135…139.

13. *Shaekhov M.F., Khalfina E.D.* Change in the capillarity of aramid fibers during modification by a high-frequency discharge of low pressure // Bulletin of Kazan Technological University. 2010. No. 11. P. 609…610.

14. *Kudinov V.V., Mamonov V.I., Korneeva N.V. etc.* Effect of plasma activation and heat treatment on the properties of ultra-high-molecular polyethylene fibers in composite materials // Physics and chemistry of materials processing. 2013. No. 5. P. 36…39.

15. *Abdullina V.Kh.* Hydrophilization of polypropylene film yarn by low-temperature, low-pressure plasma // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2009. No. 4, pp. 129…131.

16. *Timoshina Y.A., Voznesensky E.F.* Research of gas-discharge modification of polymer materials by spectroscopy methods // High Energy Chemistry. 2024. 58 (3), pp. 467…470. – DOI 10.1134 /S0018143924701388.

17. *Timoshina Y.A., Voznesensky E.F., Teptina A.I., Zhelonkin Y.O.* Plasmachemical modification of polymer materials. // High Energy Chemistry. 2023, 57, 1, S256–S259. – DOI: 10.1134/S0018143923070548.

18. *Kraus E., Baudrit B., Haidemeier P. etc.* Analysis of polymer surfaces treated with low-pressure plasma from the point of view of the acid-base approach // Bulletin of the Technological University. 2015, 18 (4), 71–76. DOI 10.1016/j.apsusc.2016.02.247.

19. *Voznesensky E.F., Timoshina Y.A., Karimullin I.I. etc.* Plasma meth-ods for preparation of the substrate and fixing the nanoparticles in the obtaining of disposable antibacterial synthetic materials // Materials Letters. 2022, 308, 131193. – DOI 10.1016 /j.matlet.2021.131193.

Рекомендована кафедрой медицинской инженерии КНИТУ. Поступила 15.01.26.