УДК 677.027.4
DOI 10.47367/0021-3497_2026_3_05

МОДИФИКАЦИЯ ШЕРСТЯНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ (ОБЗОР) *

MODIFICATION OF WOOL TEXTILE MATERIALS USING HIGH-ENERGY METHODS (REVIEW)

А.А. СОЛОВЬЕВА, Е.Л. ВЛАДИМИРЦЕВА, В.А. КУЛАКОВА, А.К. ШИБАНОВА

A.A. SOLOVYOVA, E.L. VLADIMIRTSEVA, V.A. KULAKOVA, A.K. SHIBANOVA

(Ивановский государственный химико-технологический университет)

(Ivanovo State University of Chemistry and Technology)

E-mail: solovyova.anna05@bk.ru

Шерстяное волокно обладает уникальными потребительскими свойствами, однако его широкое применение ограничено склонностью к свойлачиванию и биоповреждениям. Традиционные химические методы модификации, такие как хлорирование, эффективны, но наносят серьезный экологический ущерб. В условиях ужесточения экологических стандартов актуален поиск альтернативных технологий. Целью данного исследования является анализ эффективности физических методов модификации шерсти как экологически безопасной альтернативы химической отделке. В работе рассмотрены технологии низкотемпературной плазмы тлеющего и высокочастотного разряда, СВЧ-, ИК- и ультразвукового воздействия на основе обзора научной литературы. Результаты показали, что плазменная обработка существенно снижает свойлачиваемость и улучшает смачиваемость волокна без образования токсичных стоков. Высокочастотная плазма обеспечивает объемную модификацию структуры кератина без значительной потери прочности, в отличие от тлеющего разряда. Выявлено, что некоторые физические методы могут снижать механические показатели, требуя точной настройки параметров. Сделан вывод, что физические

* Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания на выполнение НИР, тема № FZZW-2026-0004.

методы являются перспективным направлением для экологизации текстильной промышленности, позволяя улучшить потребительские свойства шерсти при сокращении расхода воды и химических реагентов.

Wool fiber possesses unique consumer properties; however, its widespread application is limited by its susceptibility to felting and biodegradation. Traditional chemical modification methods, such as chlorination, are effective but cause significant environmental damage. In the context of increasingly stringent environmental standards, the search for alternative technologies is relevant. This study aims to analyze the effectiveness of physical modification methods for wool as an environmentally safe alternative to chemical finishing. The paper reviews technologies involving low-temperature plasma of glow and high-frequency discharges, as well as microwave, infrared, and ultrasonic treatments, based on a comprehensive literature survey. The results indicate that plasma treatment substantially reduces felting and improves fiber wettability without generating toxic wastewater. High-frequency plasma enables bulk modification of the keratin structure without significant loss of strength, unlike glow discharge treatment. It was found that certain physical methods may reduce mechanical performance, requiring precise parameter optimization. The study concludes that physical modification methods represent a promising direction for eco-friendly textile manufacturing, allowing enhanced consumer properties of wool while reducing water and chemical consumption.

Ключевые слова: шерстяное волокно, физическая модификация, низкотемпературная плазма, тлеющий разряд, высокочастотная плазма, свойлачиваемость, смачиваемость, кератин, экологически безопасные технологии, плазменная обработка, антибактериальная отделка.

Keywords: wool fiber, physical modification, low-temperature plasma, glow discharge, high-frequency plasma, felting propensity, wettability, keratin, eco-friendly technologies, plasma treatment, antibacterial finishing.

Шерстяное волокно представляет собой уникальный природный материал, обладающий комплексом ценных потребительских свойств: высокой теплоемкостью, гигроскопичностью, огнестойкостью, исключительными упруго-эластическими и антистатическими характеристиками. Однако широкому применению шерстяных материалов препятствует ряд существенных недостатков, обусловленных анатомо-морфологическим строением волокна. Чешуйчатая структура кутикулы, обеспечивающая направленность трения (анизотропию), приводит к свойлачиванию при мокрой обработке – явлению, ограничивающему эксплуатационные возможности изделий [1]. Кроме того, белковая природа кератина делает шерсть уязвимой к биоповреждениям (грибки, бактерии, насекомые-вредители) и снижает устойчивость к ультрафиолетовому излучению [2].

Традиционные методы модификации шерсти, такие как хлорирование (процесс Херли) и обработка полимерами (например, поливинилацетатом), хотя и эффективны в подавлении свойлачивания, сопряжены с серьезными экологическими проблемами: образованием токсичных хлорорганических соединений (AOX), загрязнением сточных вод и снижением биоразлагаемости модифицированного волокна [3, 4]. В условиях ужесточения экологических стандартов и роста спроса на устойчивые текстильные технологии актуализируется поиск альтернативных методов модификации, не оставляющих негативного экологического следа [5, 6].

Одним из возможных вариантов является физическая модификация материала без использования химических реагентов, что исключает образование токсичных отходов. Основное внимание при этом уделяется изменениям в составе волокон или нитей (без образования новых химических соединений), а также в их структуре – макромолекулярной и текстильной, свойствах, методах изготовления и последующей переработке. К подобным технологиям относятся, например, плазмохимическая обработка, вызывающая частичное разрушение чешуйчатого покрова, повышающая смачиваемость, изменяющая трение и улучшающая адгезию [7, 8]. Также сюда входят воздействия электростатическими разрядами, ионизирующими излучениями и другими физическими факторами [9].

Особое место среди электрофизических методов обработки капиллярно-пористых материалов занимает применение низкотемпературной плазмы различных типов разряда: барьерного, тлеющего, коронного и др. [10].

Вакуумно-плазменные системы представляют собой неравновесные системы, в которых химическая активация локализована в объеме плазмы или в приповерхностных слоях полимера. Протекающие в них химические процессы относятся к области химии высоких энергий [11] и обладают рядом общих характеристик. Образование конечных стабильных продуктов обусловлено сложной последовательностью быстрых реакций промежуточных активных частиц различной природы, концентрация которых может достигать высоких значений. Элементарными процессами в химически реагирующей газоразрядной плазме считаются как реакции отдельных промежуточных частиц, так и их генерация, преимущественно за счет электронных соударений, а также процессы их взаимодействия.

Исследования в области неравновесной плазмы и плазмохимических процессов, направленных на обработку полимерных материалов, в том числе волокнообразующих, активно проводятся в научных центрах по всему миру.

К настоящему времени сформирована и детально проработана концепция структурной и химической модификации полимерных поверхностей, позволяющая целенаправленно изменять свойства материалов для их применения в конкретных технологических процессах.

Обработка плазмой дает возможность изменить свойства поверхности волокнистых материалов при существенном снижении использования химических реагентов и воды.

Для обработки текстильных материалов чаще всего применяют низкотемпературную плазму газового тлеющего разряда (НТП). Проектированием и изготовлением пилотных и промышленных установок для обработки полимерных материалов в виде пленок, волокон и тканей занимается группа ученых, возглавляемая Горбергом Б.Л., работающая в течение двух десятилетий в Ивановском НИЭКМИ, а с 2003 года в ИГХТУ. За годы работы группой в сотрудничестве с иностранными фирмами создано более 15 видов плазменного оборудования, предназначенного как для проведения научных исследований (4 установки), так и для работы в условиях производства. Оборудование для обработки шерстяных текстильных материалов было установлено и успешно работало на Павловопосадской платочной мануфактуре. В ОАО "Павловопосадские шали" плазмохимическая технология используется вместо операций хлорирования для придания шерстяному волокну высокой смачиваемости. Внедрение плазменной технологии позволило избавиться от проблем, связанных с транспортировкой и хранением жидкого хлора, утилизацией ядовитых стоков. Использование плазмохимических процессов в текстильной промышленности позволяет уменьшать расход химических материалов и сокращать энергетические затраты.

За годы применения НТП для обработки шерстяных текстильных материалов в научно-технической литературе собран большой теоретический и экспериментальный материал, касающийся модификации свойств шерсти под плазменным воздействием. Основными технологическими особенностями

плазменных методов модификации шерстяного волокна является комплексное улучшение механических, физических и физико-химических характеристик. Так, исследования авторов [12] свидетельствуют, что модификация шерстяного волокна НТП приводит к снижению его свойлачиваемости в процессе переработки при одновременном повышении прочности и увеличении сорбции химических реагентов. Волокна, обработанные плазмой при окрашивании, приобретают ровную и устойчивую окраску, соответствующую контрольным образцам, стойкость к истиранию возрастает на 30% [13].

На основании исследований, проведенных ЗАО "НПК ЦНИИ шерсти" [14], выявлено, что после обработки шерстяного волокна, чистошерстяной ленты, ровницы и гребенной пряжи в низкотемпературной плазме тлеющего разряда при периодическом режиме работы повышается прядильная способность шерсти и показатели свойств пряжи и ткани за счет увеличения сил сцепления и трения между волокнами. Существенным при воздействии плазмы тлеющего разряда на шерстяное волокно является снижение усадки до 3%...5% (вместо 37% у необработанного волокна) и появление свойств несвойлачиваемости.

Вместе с тем эффект повышения гидрофильности после обработки НТП, характерный для большинства текстильных материалов, для шерсти не настолько однозначен. Группой ученых во главе с проф. Садовой С.Ф., наоборот, выявлено некоторое его снижение [15]. Согласно исследованиям [16…18], уменьшение гидрофильности обработанной в плазме тлеющего разряда шерсти объясняется модификацией химического состава и повышением плотности структуры волокна. НТП инициирует свободно-радикальные реакции, которые разрушают липиды поверхностных мембран и белки экзокутикулы. Это приводит к закрытию мезопор и формированию макропор и трещин на поверхности волокна.

Результаты дифференциально-термического и термогравиметрического анализа шерстяного волокна, обработанного в различных газовых средах в плазме тлеющего разряда, подтверждают воздействие НТП не только на эпикутикулу, но и на более глубокие слои кутикулы [12]. Таким образом, доказывается возможное изменение химического состава волокон, приводящее к снижению их прочности из-за частичного разрушения связей между макромолекулами. Этот негативный эффект следует учитывать при применении НТП в отделке волокнистых материалов.

Аналогичным недостатком обладает и кислородная плазма. Во время обработки ею за счет окисления может происходить деструкция высокомолекулярных материалов (ВММ). Действие НТП на шерсть приводит к изменениям в поверхностных мембранах кутикулярных клеток, что проявляется в увеличении смачиваемости водой и водными растворами, капиллярности и проницаемости.

Экспериментальные данные работ [16…18] по изучению физико-химических характеристик шерстяных волокон, которые были модифицированы НТП, показывают, что происходят процессы дезаминирования, разрушения пептидных связей и аминокислотных остатков. Кроме того, в кислородосодержащей плазме происходит окисление последних, а также образование новых, более стабильных связей.

Обработка шерстяных волокон в среде плазмы, генерируемой барьерным разрядом, осуществляется для оптимизации процесса окрашивания, повышения уровня смачиваемости и несминаемости. Согласно результатам проведенных исследований [19], применение барьерного разряда повышает сорбционную активность шерстяного волокна, а значит, значительно сокращает время, необходимое для крашения. При заключительной отделке наблюдается более равномерное распределение покрытия по поверхности материала, что положительно сказывается на его несминаемости. Также отмечается повышение устойчивости к воздействию биологических факторов и атмосферных условий [20]. Однако, как и в случае кислородной плазмы, недостатком является то, что модификация волокон в барьерном разряде приводит к химическим изменениям на поверхности волокна: происходит окисление C=O и CO-групп, что спо-

собствует изменению химического состава структуры кератина шерсти и снижению прочности волокна [21].

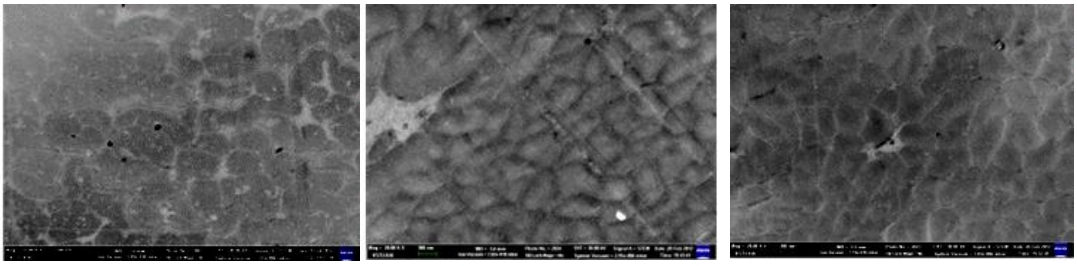
В исследовании [22] анализируется влияние на шерстяное волокно низкотемпературной плазмы коронного разряда. Воздействие этой плазмы вызывает образование трещин и удаление кутикулы, что ведет к снижению износостойкости шерсти, а также увеличивает уровень кислорода и уменьшает количество серы в поверхностном слое волокна [23]. Однако за счет этих изменений улучшаются характеристики сорбционных свойств шерсти: время впитывания влаги сокращается с 263 до 10 секунд. По мнению авторов, уменьшение времени поглощения воды также связано с образованием гидрофильных групп в поверхностном слое волокна [24].

В целом можно сказать, что применение плазмохимических методов в качестве средства для изменения свойств волокон позволяет снизить расход химматериалов, уменьшить потребление энергии и исключить из производственного процесса опасные для окружающей среды вещества и технологии [25], при этом улучшаются потребительские свойства шерстяного волокна, возрастает гидрофильность, возможно снижение свойлачиваемости и увеличение формостойкости. Недостатком способа является вероятное снижение прочности волокнистого материала и сложное и дорогостоящее аппаратурное оформление процесса, требующее серьезных материальных затрат и квалифицированного персонала для обслуживания.

Кроме воздействия на шерстяные волокна низкотемпературной плазмой тлеющего разряда, в последние годы проводятся исследования по использованию высокочастотной плазмы пониженного давления (ВЧЕ). Из литературы известно, что, в отличие от низкотемпературной плазмы, ВЧЕ обеспечивает одновременно объемное и поверхностное воздействие на материал. Внутри волокон формируется электрическое поле, обеспечивающее переориентацию положительно заряженных аминокислотных групп, составляющих кератин и внешний слой волокна, в результате чего происходит поляризация кортекса и усиление кристаллической фазы [26].

Контролируя характеристики плазмы, такие как энергия ионов (Wi) и плотность ионного тока (j), удалось улучшить механические свойства шерстяных волокон. Эти параметры плазмы регулировались путем изменения мощности разряда (Wp), давления в вакуумной камере (P) и расхода плазмообразующего газа (G). Обобщение полученных результатов [26] также подтверждает, что плазменная обработка пористых материалов с использованием различных газов позволяет целенаправленно модифицировать их гидрофильные и гидрофобные свойства. В частности, аргон применялся для усиления гидрофильности, а смесь аргона и пропана-бутана (70/30%) – для повышения гидрофобности.

Согласно данным [28], плазменная обработка приводит к изменению поперечного размера и микрорельефа поверхности волокна (рис. 1 – микрофотографии поперечных срезов шерстяного волокна в области ортокортекса×20000: а) контрольный образец; б) опытный образец, обработанный в гидрофильном режиме (Wp=1,8 кВт, GAr=0,04 г/с, P=26,6 Па, t=5 мин, f=13,56 МГц); в) опытный образец, обработанный в гидрофобном режиме (Wp=2 кВт, Gаргон-пропан-бутан=0,06 г/с, P=26,6 Па, t=6 мин, f = 13,56 МГц)).



а) б) в)

Рис. 1

Такие структурные изменения являются причиной увеличения проницаемости и гидрофильности волокон, однако при этом не происходит их термодеструкции и физико-механические характеристики сохраняются. Сохранение прочностных свойств волокон после применения ВЧЕ в процессе первичной обработки подтверждено и в работе [29]. Волокна взаимодействуют с активными и неактивными частицами плазмы, имеющими высокую энергию, что приводит к десорбции атомов и молекул, изменению структуры и фазового состояния.

Таким образом, доказано, что обработка шерсти ВЧЕ-плазмой значительно улучшает ее способность к абсорбции воды и моющих средств, что значительно облегчает технологические процессы отделочного производства, связанные с мокрыми обработками. Эффект обусловлен усилением гидролиза кератина, одновременно повышается его реакционная способность, что приводит к более активному ионному взаимодействию между микрофибриллами и матриксом. Это, в свою очередь, способствует росту кристаллической фазы кератина и, как следствие, улучшению механической прочности волокон.

Эффект модификации шерстяного волокна с помощью потока плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления зависит от природы плазмообразующего газа. В зависимости от состава газа, давления, длительности и напряжения разряда, природы материала можно менять следующие свойства: смачиваемость, относительную молекулярную массу, валкоспособность, устойчивость к бактериям и насекомым и др. [30…33].

Исследования выявили, что такая обработка уменьшает толщину волокон, одновременно повышая их прочность, упругость и коэффициент трения [34]. Кроме того, плазменная обработка улучшает способность шерсти к окрашиванию и вызывает объемные физические изменения в материале. Варьируя параметры обработки, можно целенаправленно изменять гидрофильные и гидрофобные свойства шерсти, при этом химическая структура кератина остается стабильной [27, 34].

Можно констатировать, что обработка шерстяного волокна плазмой ВЧЕ-разряда пониженного давления является эффективным методом модификации, затрагивающим не только поверхность, но и весь объем материала, улучшая его характеристики без ущерба для других свойств и без изменения химического состава. Кроме того, технология является экологически чистой и значительно сокращает расходы воды на технологические нужды. Она представляет собой актуальное и своевременное направление исследований.

Кроме ВЧЕ-энергии для модификации свойств шерстяных текстильных материалов может быть использовано СВЧ-воздействие [35]. Например, эффективность первичной обработки шерсти может быть повышена за счет применения СВЧ-энергии, которая способствует лучшему проникновению моющих растворов в структуру волокна. СВЧ-обработка также обладает дезинфицирующими свойствами, снижает внутренние напряжения в волокнах и улучшает отделение минеральных и органических примесей. В контексте воздействия СВЧ-разряда на микроструктуру шерстяного волокна работа [36] выявила зависимость изменений от продолжительности обработки и газовой среды. Воздействие в течение 300 секунд не приводит к заметным изменениям. Однако при увеличении времени до 900 секунд наблюдаются существенные модификации. Воздушно-плазменная обработка вызывает образование микротрещин и изменение химического состава вследствие окисления дисульфидных связей. Азотная плазма приводит к формированию дефектов на поверхности кутикулярных клеток, что также объясняется окислительными процессами. Наиболее выраженное повреждение волокна происходит при модификации в кислородной плазме, где значительно увеличивается диаметр микропор и трещин.

Применение СВЧ-энергии в процессе очистки шерсти способствует отделению минеральных и органических включений, а также уничтожению микроорганизмов. Однако этот метод не обеспечивает эффектив-

ного удаления растительных примесей из волокон.

Технологии облагораживания шерстяных материалов разрабатываются с применением ИК-нагрева. В работе [37] описан метод модификации шерстяного волокна, направленный на повышение его устойчивости к многократным стиркам и воздействию солнечного света. Данный метод предполагает обработку волокна раствором, содержащим композицию оксидов (TiO_2, SiO_2, ZnO_2, AI_2O_2, SnO_2), которая затем активируется посредством ИК-излучения с ионной модификацией. Возможно также введение синтетической смолы для придания специфических свойств. Результаты исследований подтверждают, что ИК-обработка шерстяных волокон способствует улучшению их механических свойств, снижению и стабилизации потребительской усадки, а также оптимизации технологического цикла переработки, что в совокупности приводит к повышению качества конечной продукции.

Ультразвуковая обработка (УЗ) является одним из признанных электрофизических методов, применяемых для модификации шерстяных волокон. Чаще всего ее используют в процессах подготовки и очистки шерсти. Механизм действия УЗ-обработки включает снижение поверхностного натяжения жидкости под воздействием ультразвука, что приводит к улучшению проникающей способности моющих составов в поры волокна и облегчает удаление минеральных и жировых загрязнений [38]. Негативным эффектом является то, что продолжительное ультразвуковое воздействие может привести к уменьшению массы волокна и снижению его термической стойкости. В этом случае устойчивость шерсти к термическому разложению формируется в щелочной среде. Увеличение водопоглощения шерстяным волокном при сохранении степени его кристалличности было доказано методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Авторы прогнозируют значительный экономический эффект от внедрения УЗ-обработки в процессы подготовки шерстяных материалов, однако процесс сдерживается сохранением проблемы потери прочности волокна, составляющей не менее 5%.

В работе [39] предложен метод обработки шерсти, основанный на электроразрядной нелинейной объемной кавитации (ЭРНОК). Применение ЭРНОК в процессе промывки шерсти вызывает частичное разрушение поверхности чешуйчатого слоя, что приводит к сглаживанию кутикулы и уменьшению степени свойлачивания. Однако, как и в случае с УЗ-обработкой, этот метод также сопряжен со снижением прочности шерстяного волокна, составляющим 5%.

Еще одним перспективным подходом к модифицирующей обработке шерстяных волокон является ионизация воздуха. При этом методе ионизирующий электрод активирует молекулы кислорода, которые, в свою очередь, способствуют восстановлению дисульфидных связей кератина и окислению таких примесей шерстяного волокна, как жиропот [40]. Практические испытания на полутонкой шерсти продемонстрировали значительное увеличение растворимости в мочевино-бисульфите (практически в 20 раз) и повышение прочности (в 40 раз) после аэроионной обработки. Несмотря на эти положительные результаты, метод пока не получил широкого применения, и авторы [42] предлагают внедрить его для улучшения качества шерсти, получаемой от овец, содержащихся без выгула в закрытых помещениях.

Влияние гамма-излучения на шерстяное волокно детально изучено в работе [41] с использованием изотопов углерода. Облучение γ-лучами инициирует образование свободнорадикальных центров, окисление цистина, разрыв дисульфидных связей и изменение аминокислотного состава. При низких дозах (0,1…0,3 Мрад) облучение овечьей шерсти приводит к уменьшению истираемости и растворимости в кислотах и щелочах, а также к структурированию волокна за счет образования новых дисульфидных, лантиониновых, солевых и водородных связей. Однако более высокие дозы, такие как 1 Мрад, вызывают серьезные деструктивные процессы в кератине, проявляющиеся в полном исчезновении ряда аминокислот (триптофан, серин, мети-

онин), снижении содержания цистина, увеличении цистиновой кислоты и образовании свободного аммиака.

Анализируя представленные в большинстве работ описания методов изменения структуры шерстяного волокна, отметили, что их использование может привести одновременно к улучшению одних качеств волокнистого материала и ухудшению других. Поэтому применение технологий высоких энергий связано с определенными рисками и далеко не всегда является эффективной заменой традиционных технологий.

ВЫВОДЫ

Анализируя представленные в статье материалы, можно отметить, что большинство вариантов химических или физических воздействий на шерстяное волокно в первую очередь затрагивают поверхностные слои волокна и реже глубинную структуру кератина. В основном процессы касаются сглаживания чешуйчатого слоя с целью снижения свойлачиваемости и придания противоусадочных свойств шерстяным текстильным материалам. Главная цель модификации шерсти – это придание ей новых полезных свойств без ущерба для ее природных преимуществ (например, гигроскопичности, теплоизоляции).

Как традиционные, так и современные методы обработки шерсти показывают, что химическая технология отделки текстильных материалов постоянно развивается. Но развитие направлено не только на улучшение качества волокна (например, прочности, мягкости, износостойкости), но и на экологичность производства. Современные тенденции демонстрируют сокращение использования химических веществ и технологий, наносящих вред окружающей среде. Поиск путей применения инновационного оборудования, нетрадиционных процессов, направленных на экологизацию отделки текстильных материалов, является одним из главных факторов, стимулирующих развитие текстильной отрасли как у нас в стране, так и за рубежом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Соловьева А.А., Владимирцева Е.Л., Кулавкова В.А.* Модификация свойств шерстяного волокна с применением фторированного алюмосиликата // Российский химический журнал. 2025. Т. 69. №4. С. 30…34. – DOI: 10.6060/rcj.2025694.4.

2. *Yu J., Pang Z., Zhang J. etc.* Conductivity and antibacterial properties of wool fabrics finished by polyaniline/chitosan // Colloids Surf. A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018, V. 548. P. 117…124. – DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.03.065.

3. *Hassan M.M., Hawkyard C.J.* Decolorization of spent dyebath with ozone and re-use of spent dyebath // Environmental Aspects of Textile Dyeing / ed. by R.M. Christie. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007, P. 149…190. – DOI: 10.1533/9781845693091.149.

4. *Karakawa T., Umehara R., Ichimura H.* Continuous shrink-resist process of wool top sliver with ozone. I. Performance // Journal of the Textile Machinery Society of Japan. 2002. V. 58, №4. P. 135…142. – DOI: 10.2115/fiber.58.135.

5. *Hassan M.M., Leighs S.J.* Effect of surface treatments on physicomechanical, stain-resist, and UV protection properties of wool fabrics // Applied Surface Science. 2017. V. 419. P. 348…356. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.05.046.

6. *Чурсин В.И., Борисов А.А.* Структурирование белков наноразмерными диальдегидпроизводными мальтодекстрина // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65, №2. С. 88…95. – DOI: 10.6060/ivkkt.20226502.6477.

7. *Barani H., Haji A.* Analysis of structural transformation in wool fiber resulting from oxygen plasma treatment using vibrational spectroscopy // J.of Molecular Structure. 2015, V. 1079. P. 35…40. – DOI: 10.1016/ j.molstruc.2014.09.041

8. *Абдуллин И.Ш., Абуталипова Л.Н., Желтухин В.С., Красина И.В.* Высокочастотная плазменная обработка в динамическом вакууме капиллярно-пористых материалов. Теория и практика применения. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2004. 428 с.

9. *Чешкова А.В., Побединский В.С., Лебедева В.И.* Применение СВЧ-нагрева в ферментативном рыхлении и перекисном отбеливании тканей // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1994. № 6. С. 51…54.

10. *Wang H., Liu R., Tu T. etc.* Properties of Radicals Formed by the Irradiation of Wool Fibers // J. Radiat. Res. 2004. V. 45, № 1. P. 77…81.

11. *Freddi G., Innocenti R., Arai T. etc.* Physical properties of wool fibers modified with isocyanate compounds // J. Appl. Polym. Sci. 2003. V. 89, № 5. P. 1390…1396. – DOI: 10.1002/app.12271.

12. *Садова С.Ф., Баева Н.Н., Коновалова Л.Я.* Физико-химические свойства шерсти, обработанной низкотемпературной плазмой // Текстильная промышленность. 1991. № 2. С. 46…47.

13. *Шарнина Л.В.* Низкотемпературная плазма как основа создания современных текстильных и химических технологий // Химические волокна. 2004. № 6. С. 32…37.

14. *Тюрин Д.Ю.* Влияние коронного разряда на электрические свойства шерсти // Теория и практика разработки оптимальных технологических процессов и структур в текстильном производстве. Иваново, 1997. С. 221…222.

15. *Садова С.Ф.* Применение низкотемпературной плазмы в отделке шерстяных тканей // IV Междунар. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново, 2005. Т. 1. С. 15…19.

16. *Shahidi S., Ghoranneviss M., Mozazzenchi B. etc.* Study of surface modification of wool fabrics using low temperature plasma // Proceedings of the 3rd International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology. 2008. V. 8, № 1. P. 230…236.

17. *Садова С.Ф., Журавлева С.М., Телегина Т.А.* Влияние плазмы тлеющего разряда на клеточно-мембранный комплекс натурального волокна // III Междунар. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново, 2002. С. 363…364.

18. *Shekar R.I., Bajpai S.K.* Effect of oxygen plasma on woolen fabric properties // Indian J. Fibre Text. Res. 2000. № 3. P. 229…231.

19. *Ren C.S., Wang D.Z., Wang Y.N.* Improvement of the graft and dyeability of linen by DBD treatment in ambient air // J. Mater. Process. Technol. 2008. V. 206. P. 216…220.

20. *Molina R., Canal C., Bertran E., Erra P.* Study on the influence of scouring on the wettability of keratin fibers before plasma treatment // Fibers Polym. 2008. V. 9, № 4. P. 444…449.

21. *Marotta E., Kulik I., Scapinello M. etc.* Atmospheric plasma application for grease wool: the observation of the fast conversion of the adhered substance on the fiber surface in the post treatment period // Coordinamento Interuniversitario Veneto per le Nanotecnologie. 2010.

22. *Кутепов А.Н., Захаров А.Г., Максимов А.И., Титов В.А.* Плазменная модификация текстильных материалов: перспективы и проблемы // Российский химический журнал. 2002. Т. 46, № 1. С. 103…115.

23. *Mirjalili M., Nasirian S.S., Karimi L.* Effects of corona discharge treatment on some properties of wool fabrics // Afr. J. Biotechnol. 2011, V. 10. P. 19436…19443. – DOI: 10.5897/AJB11.1716.

24. *Guizhen K., Weidong Y., Weilin X. etc.* Effects of corona discharge treatment on the surface properties of wool fabrics // J. Mater. Process. Technol. 2008, V. 207, № 1. P. 125…129. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.068.

25. *Wang X., Cao G., Xu W.* Improving the hydrophilic properties of wool fabrics via corona discharge and hydrogen peroxide treatment // J. Appl. Polym. Sci. 2009, V. 112, № 4. P. 1959…1966. – DOI: 10.1002/app.29573.

26. *Слепнева Е.В., Абдуллин И.Ш., Хамматова В.В.* Исследование повышения прочности шерстяного волокна в результате обработки плазменным потоком в режиме разряда низкого давления // Текстильная промышленность. 2010. № 4. С. 54…57.

27. *Вознесенский Е.Ф., Шарифуллин Ф.С., Красина И.В., Абдуллин И.Ш.* Структурные аспекты модификации натурального кератинсодержащего материала в плазме ВЧ-разряда пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 5. С. 426…430.

28. *Александров А.Ф., Бугров Г.Е., Вавилин К.В.* Исследование возможности модификации поверхности полимеров при их обработке в разряде атмосферного давления // X конф. по физике газового разряда. Рязань, 2000. С. 164…166.

29. *Слепнева Е.В., Абдуллин И.Ш., Хамматова В.В.* Модификация наноструктуры шерстяных волокон при их первичной обработке // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 15. С. 93…94.

30. *Вознесенский Е.Ф., Шарифуллин Ф.С., Абдуллин И.Ш.* Теоретические основы структурной модификации материалов кожевенно-меховой отрасли в плазме высокочастотного разряда пониженного давления. Казань: КГТУ, 2011. 363 с.

31. *Пономарев А.Н., Василец В.Н., Тальрозе Р.В.* Плазмохимическая модификация полимеров // Химическая физика. 2002. Т. 21, № 4. С. 96…102.

32. *Molina R., Jovancic P., Jocic D., Bertran E.* Characteristics of the surface of keratin fibers treated with plasma vapor // Surf. Interface Anal. 2003. V. 35, № 2. P. 128…135. – DOI: 10.1002/sia.1510.

33. *Абдуллин И.Ш., Хамматова В.В., Кумпан Е.В.* Модификация шерстяной ткани плазменным потоком в режиме разряда низкого давления // Фундаментальные проблемы новых технологий в III тысячелетии. Томск, 2006. С. 135…138.

34. *Шарифуллин Ф.С.* Исследование влияния неравновесной низкотемпературной плазмы на химические характеристики шерсти // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 11. С. 611…612.

35. *Побединский В.С.* Активация процессов отделки текстильных материалов энергией электромагнитных волн СВЧ-, микроволнового и УФ-диапазонов. Иваново: ИХР РАН, 2000. 128 с.

36. *Molina R., Canal C., Bertran E. etc.* Low temperature plasma modified wool fabrics: surface study by SEM // Current Issues on Multidisciplinary Microscopy Research and Education. 2004. P. 242…249.

37. *Li Q., Hurren C.J., Yu H. etc.* Thermal and mechanical properties of ultrasonically treated wool // Text. Res. J. 2011, V. 102, № 6. P. 12…16.

38. *Li Q., Lin T., Wang X.* Effects of ultrasonic treatment on wool fibre and fabric properties // J. Text. Inst. 2012. V. 103, № 6. P. 662…668. – DOI: 10.1080/00405000.2011.597569.

39. *Семешко О.Я., Ермолаева А.В., Сарибекова Ю.Г.* Применение электрического разряда нелинейной кавитации в очистке шерстяного волокна

// Современные технологии и оборудование текстильной промышленности (Текстиль-2009). М., 2009. С. 191…192.

40. *Robinson G.A., Christie D.R.* Early Stage Processing of the Future: Topmaking // Conf. Top-Tech 96. Australia, 1996. P. 448…451.

41. *Сарибекова Ю.Г., Ермолаева А.В., Мясников С.А.* Влияние модификации поверхности шерсти электроразрядной нелинейной объемной кавитацией на процесс крашения кислотными красителями // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. 2010. № 1. С. 47…50.

42. *Пелиховская Т.Н., Бабичева С.А., Омаров А.А., Скорых Л.Н.* Аэроионная обработка – новый способ повышения качества шерсти // Овцы, козы, шерстяное дело. 2009. Т. 3, № 3. С. 31…34.

R E F E R E N C E S

1. *Solovyeva A.A., Vladimirtseva E.L., Kulavkova V.A.* Modification of wool fiber properties using fluorinated aluminosilicate // Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal. 2025. T. 69, № 4. P. 30…34. – DOI: 10.6060/rcj.2025694.4.

2. *Yu J., Pang Z., Zhang J. etc.* Surface conductivity and antibacterial properties of wool fabrics finished by polyaniline/chitosan // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018, V. 548. P. 117…124. – DOI: 10.1016/j.colsurfa. 2018.03.065.

3. *Hassan M.M., Hawkyard C.J.* Decolorization of spent dyebath with ozone and re-use of spent dyebath // Environmental Aspects of Textile Dyeing / ed. by R.M. Christie. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007. P. 149…190. – DOI: 10.1533 /9781845693091.149.

4. *Karakawa T., Umehara R., Ichimura H.* Continuous shrink-resist process of wool top sliver with ozone. I. Performance // Journal of the Textile Machinery Society of Japan. 2002, V. 58, № 4. P. 135…142. – DOI: 10.2115/fiber.58.135.

5. *Hassan M.M., Leighs S.J.* Effect of surface treatments on physicomechanical, stain-resist, and UV protection properties of wool fabrics // Applied Surface Science. 2017, V. 419. P. 348…356. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.05.046.

6. *Chursin V.I., Borisov A.A.* Structuring of proteins with nanosized dialdehyde derivatives of maltodextrin // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. 2022, T. 65, № 2. P. 88…95. DOI: 10.6060/ivkkt.20226502.6477.

7. *Barani H., Haji A.* Analysis of structural transformation in wool fiber resulting from oxygen plasma treatment using vibrational spectroscopy // Journal of Molecular Structure. 2015, V. 1079. P. 35…40. – DOI: 10.1016/j.molstruc.2014.09.041.

8. *Abdullin I.Sh., Abutalipova L.N., Zheltukhin V.S., Krasina I.V.* Vysokochastotnaya plazmennaya obrabotka v dinamicheskom vakuume kapillyarno-poristykh materialov. Teoriya i praktika primeneniya. Kazan: Izd-vo Kazan. un-ta, 2004. 428 p.

9. *Cheshkova A.V., Pobedinsky V.S., Lebedeva V.I.* Application of microwave heating in enzymatic loosening and peroxide bleaching of fabrics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 1994. № 6. P. 51…54.

10. *Wang H., Liu R., Tu T. etc.* Properties of radicals formed by the irradiation of wool fibers // Journal of Radiation Research. 2004. V. 45, № 1. P. 77…81.

11. *Freddi G., Innocenti R., Arai T. etc.* Physical properties of wool fibers modified with isocyanate compounds // Journal of Applied Polymer Science. 2003, V. 89, № 5. P. 1390…1396. – DOI: 10.1002/app.12271.

12. *Sadova S.F., Baeva N.N., Konovalova L.Ya.* Physicochemical properties of wool treated with low-temperature plasma // Tekstil'naya Promyshlennost'. 1991. № 2. P. 46…47.

13. *Sharnina L.V.* Low-temperature plasma as a basis for creating modern textile and chemical technologies // Khimicheskie Volokna. 2004. № 6. P. 32…37.

14. *Tyurin D.Yu.* Effect of corona discharge on electrical properties of wool // Teoriya i praktika razrabotki optimal'nykh tekhnologicheskikh protsessov i struktur v tekstil'nom proizvodstve. Ivanovo, 1997. P. 221…222.

15. *Sadova S.F.* Application of low-temperature plasma in finishing of wool fabrics // IV Mezhdunar. simp. po teoreticheskoi i prikladnoi plazmokhimii. Ivanovo, 2005. T. 1. P. 15…19.

16. *Shahidi S., Ghoranneviss M., Mozazzenchi B. etc.* Study of surface modification of wool fabrics using low temperature plasma // Proceedings of the 3rd International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology. 2008. V. 8, № 1. P. 230…236.

17. *Sadova S.F., Zhuravleva S.M., Telegina T.A.* Effect of glow discharge plasma on the cell-membrane complex of natural fiber // III Mezhdunar. simp. po teoreticheskoi i prikladnoi plazmokhimii. Ivanovo, 2002. P. 363…364.

18. *Shekar R.I., Bajpai S.K.* Effect of oxygen plasma on woolen fabric properties // Indian Journal of Fibre & Textile Research. 2000. № 3. P. 229…231.

19. *Ren C.S., Wang D.Z., Wang Y.N.* Improvement of the graft and dyeability of linen by DBD treatment in ambient air // Journal of Materials Processing Technology. 2008, V. 206. P. 216…220.

20. *Molina R., Canal C., Bertran E., Erra P.* Study on the influence of scouring on the wettability of keratin fibers before plasma treatment // Fibers and Polymers. 2008, V. 9, № 4. P. 444…449.

21. *Marotta E., Kulik I., Scapinello M., Stefan M., Paradisi C.* Atmospheric plasma application for grease wool: the observation of the fast conversion of the adhered substance on the fiber surface in the post treatment period // Coordinamento Interuniversitario Veneto per le Nanotecnologie. – 2010.

22. *Kutepov A.N., Zakharov A.G., Maksimov A.I., Titov V.A.* Plasma modification of textile materials: prospects and problems // Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal. 2002. V. 46, № 1. P. 103…115.

23. *Mirjalili M., Nasirian S.S., Karimi L.* Effects of corona discharge treatment on some properties of wool fabrics // African Journal of Biotechnology. 2011, V. 10. P. 19436…19443. – DOI: 10.5897/AJB11.1716.

24. *Guizhen K., Weidong Y., Weilin X., Weigang C., Xiaolin S.* Effects of corona discharge treatment on the surface properties of wool fabrics // Journal of Materials Processing Technology. 2008, V. 207, № 1. P. 125…129. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.068.

25. *Wang X., Cao G., Xu W.* Improving the hydrophilic properties of wool fabrics via corona discharge and hydrogen peroxide treatment // Journal of Applied Polymer Science. 2009, V. 112, № 4. P. 1959…1966. – DOI: 10.1002/app.29573.

26. *Slepneva E.V., Abdullin I.Sh., Khammatova V.V.* Study of the increase in strength of wool fiber as a result of plasma flow treatment in low-pressure discharge mode // Tekstil'naya Promyshlennost'. 2010. № 4. P. 54…57.

27. *Voznesensky E.F., Sharifullin F.S., Krasina I.V., Abdullin I.Sh.* Structural aspects of modification of natural keratin-containing material in low-pressure RF discharge plasma // Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta. 2009. № 5. P. 426…430.

28. *Aleksandrov A.F., Bugrov G.E., Vavilin K.V.* Study of the possibility of polymer surface modification during treatment in atmospheric pressure discharge // X konf. po fizike gazovogo razryada. Ryazan', 2000. P. 164…166.

29. *Slepneva E.V., Abdullin I.Sh., Khammatova V.V.* Modification of the nanostructure of wool fibers during their primary processing // Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta. 2012. T. 15, № 15. P. 93…94.

30. *Voznesensky E.F., Sharifullin F.S., Abdullin I.Sh.* Teoreticheskie osnovy strukturnoi modifikatsii materialov kozhevenno-mekhovoi otrasli v plazme vysokochastotnogo razryada ponizhennogo davleniya. Kazan': KGTU, 2011. 363 p.

31. *Ponomarev A.N., Vasilets V.N., Talroze R.V.* Plasma-chemical modification of polymers // Khimicheskaya Fizika. 2002. T. 21, № 4. P. 96…102.

32. *Molina R., Jovancic P., Jocic D., Bertran E.* Characteristics of the surface of keratin fibers treated with plasma vapor // Surface and Interface Analysis. 2003. V. 35, № 2. P. 128…135. – DOI: 10.1002/sia.1510.

33. *Abdullin I.Sh., Khammatova V.V., Kumpan E.V.* Modification of wool fabric with plasma flow in low-pressure discharge mode // Fundamental'nye problemy novykh tekhnologii v III tysyacheletii. Tomsk, 2006. P. 135…138.

34. *Sharifullin F.S.* Study of the effect of nonequilibrium low-temperature plasma on chemical characteristics of wool // Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta. 2010. № 11. P. 611…612.

35. *Pobedinsky V.S.* Aktivatsiya protsessov otdelki tekstil'nykh materialov energiei elektromagnitnykh voln SVCh-, mikrovlnovogo i UF-diapazonov. Ivanovo: IKhR RAN, 2000. 128 p.

36. *Molina R., Canal C., Bertran E. etc.* Low temperature plasma modified wool fabrics: surface study by SEM // Current Issues on Multidisciplinary Microscopy Research and Education. 2004. P. 242…249.

37. *Li Q., Hurren C.J., Yu H. etc.* Thermal and mechanical properties of ultrasonically treated wool // Textile Research Journal. 2011, V. 102, № 6. P. 12…16.

38. *Li Q., Lin T., Wang X. E*ffects of ultrasonic treatment on wool fibre and fabric properties // Journal of the Textile Institute. 2012, V. 103, № 6. P. 662…668. – DOI: 10.1080/00405000.2011.597569.

39. *Semeshko O.Ya., Ermolaeva A.V., Saribekova Yu.G.* Application of electric discharge of nonlinear cavitation in wool fiber cleaning // Sovremennye tekhnologii i oborudovanie tekstil'noi promyshlennosti (Tekstil'-2009). M., 2009. P. 191…192.

40. *Robinson G.A., Christie D.R.* Early Stage Processing of the Future: Topmaking // Conf. Top-Tech 96. Australia, 1996. P. 448…451.

41. *Saribekova Yu.G., Ermolaeva A.V., Myasnikov S.A.* Effect of wool surface modification by electric discharge nonlinear bulk cavitation on the dyeing process with acid dyes // Problemy Legkoi i Tekstil'noi Promyshlennosti Ukrainy. 2010. № 1. P. 47…50.

42. *Pelikhovskaya T.N., Babicheva S.A., Omarov A.A., Skorykh L.N.* Aeroionic treatment – a new way to improve wool quality // Ovtsy, Kozy, Sherstyanoe Delo. 2009. T. 3, № 3. P. 31…34.

Рекомендована кафедрой химической технологии волокнистых материалов ИГХТУ. Поступила 18.03.26.