

На правах рукописи
Сагитова

Сагитова Фарида Равилевна

**НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ И
РЕГУЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,
АРМИРОВАННЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ПОТОКОМ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ ВОЛОКНИСТЫМИ
НАПОЛНИТЕЛЯМИ ОРГАНИЧЕСКОЙ И
НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Казань 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный консультант: **Шарифуллин Фарид Саидович**, доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Славин Андрей Вячеславович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», начальник научно-исследовательского отделения «Функциональные материалы и технологии синтеза»; **Корнеева Наталья Витальевна**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук», старший научный сотрудник; **Титов Валерий Александрович**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева КАИ»

Защита состоится «16» апреля 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.12, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета, А-330.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КНИТУ» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=564715>.

Отзывы на автореферат и диссертацию в 2-х экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, ФГБОУ ВО «КНИТУ», учёному секретарю диссертационного совета 24.2.312.12. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень с указанием специальности, ученое звание, наименование организации и должность лица, представившего отзыв, с указанием структурного подразделения, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии) (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан «___» 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.312.12, доктор технических наук, доцент

Тихонова Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

С переходом на качественно новый уровень технологического развития традиционным конструкционным материалам таким, как металлы, на смену приходят композиты на основе волокон, нитей, технического текстиля и технических тканей на их основе, благодаря их высокой удельной прочности, что снижает вес изделия или конструкции при сохранении показателей прочности. Высокая удельная прочность позволяет широко применять технические ткани в создании волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ). Технический текстиль прочно вошёл в самые разные отрасли: от автомобилестроения (сиденья, ремни безопасности, шумоизоляция, элементы кузова и салона) и медицины (ортопедические корсеты, протезы, хирургические имплантанты) до производства спецодежды повышенной опасности (костюмы пожарных, металлургов, сварщиков), спортивного снаряжения, промышленных рыболовных сетей, канатов и парусов, судостроения (корпуса яхт, катеров, судов) и средств индивидуальной и баллистической защиты (бронежилеты, шлемы, бронепанели).

Среди синтетических волокнообразующих полимеров мировое лидерство по объёмам уверенно удерживают полиэфиры (ПЭТ), за ними следуют полиамиды (ПА), полиолефины (в первую очередь полипропилен) и углеродные волокна. Особое место занимают неорганические волокна, среди которых абсолютным лидером (более 90 % рынка армированных композитов) является аморфная двуокись кремния в виде волокон.

Аморфная двуокись кремния в виде волокон (АДКВ) и аморфная двуокись кремния в виде тканей (АДКТ) обеспечивают композитам (стеклопластикам и мембранным фильтрам) выдающуюся жёсткость и прочность, однако слабая адгезия на границе «полимерная матрица – армирующий наполнитель» остаётся главным ограничивающим фактором. Недостаточное сцепление приводит к расслоению, трещинообразованию и быстрой потере эксплуатационных характеристик изделия. При этом конечные свойства композита определяются не только характеристиками матрицы и армирующего наполнителя по отдельности, но в первую очередь качеством межфазного взаимодействия.

Для повышения адгезии, плотности пропитки и максимально возможной объёмной доли наполнителя в настоящее время активно применяют различные виды модификации поверхности волокон и тканей. Современные производства синтетических и неорганических волокнообразующих материалов всё острее нуждаются в повышении физико-механических показателей, снижении обрывности при переработке, улучшении ценовой конкурентоспособности. Большинство волокон и тканей обладают гидрофобной поверхностью, что резко затрудняет их смачивание и пропитку термореактивными и термопластичными матрицами при производстве

композиционных материалов (КМ). Поэтому целесообразным является активация поверхности армирующих материалов для улучшении их капиллярности и смачиваемости. Кроме того, полиолефины имеют относительно низкую температуру плавления, что ограничивает верхний температурный предел эксплуатации готовых композитов.

Традиционные химические и физические методы модификации (аппратирование, травление, нанесение силиконовых покрытий и т.д.) часто требуют усложнения технологической цепочки, увеличивают расход реагентов и создают серьёзные экологические риски на многотоннажных производствах. При этом улучшение одних свойств нередко влечёт ухудшение других свойств.

В этих условиях всё большее внимание привлекают технологии низкотемпературной плазмы газовых разрядов различных типов (тлеющий, высокочастотный, СВЧ, барьерный, коронный, дуговой). Плазменная обработка позволяет целенаправленно изменять морфологию поверхности волокнообразующего материала, повышать его смачиваемость, капиллярность и адгезию к полимерам без значительного изменения объёмных свойств. Значительный вклад в изучение влияния различных режимов плазменной модификации на текстильные и волокнистые материалы внесли работы В.К. Афанасьева, Б.Л. Горберга, В.В. Веселова, В.Е. Кузьмичева, А.И. Максимова, Б.Н. Мельникова, С.Ф. Садовой, О.А. Саркисова, А.Б. Гильман, В.А. Титова, Л.В. Шариной, В.В. Кудинова, Н.В. Корнеевой и ряда других исследователей.

Общим недостатком большинства плазменных способов обработки является неустойчивость модифицирующего эффекта во времени, который, по различным источникам, в среднем снижается до 40% в течение 30 дней. Кроме того, проблемой являются деструктивные процессы в текстильных материалах, что затрудняет комплексное улучшение их свойств.

Множество технологических операций в текстильной и легкой промышленности, а также в других секторах, потребляющих синтетические и неорганические волокна и нити, направлены на изменение поверхностных свойств волокон и нитей, повышение их физико-механических показателей без ущерба для остальных параметров. Для модификации синтетических волокнистых материалов все чаще используют высокочастотные (ВЧ) разряды. Минимальная доля ультрафиолетового воздействия в плазме ВЧ емкостного (ВЧЕ) разряда низкого давления позволяет модифицировать материалы без их разрушения и обеспечивать долговечность плазменного эффекта. За последние десять лет основной вклад в изучение влияния неравновесной низкотемпературной плазмы на свойства капиллярно-пористых и волокнистых материалов внесли исследования ученых проводимые под руководством Абдуллина И.Ш., а именно работы Шаехова М.Ф., Хамматовой В.В., Корнеевой Н.В.

В связи с этим представляет интерес создание новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) с модифицированными армирующими

материалами потоком низкоэнергетических ионов (ПНЭИ), генерируемых из плазмы ВЧЕ-разряда пониженного давления с продувом газа.

Степень разработанности темы исследования

В развитие теории и практики применения ВЧ плазмы емкостного разряда пониженного давления для обработки волокнистых материалов существенный вклад внесли работы таких российских исследователей, как Абдуллина И.Ш., Абуталиповой Л.Н., Хамматовой В.Б., Кудинова В.В., Корнеевой Н.В., Титова В.А. и др. Данное исследование продолжает изыскания в направлении развития теории и практики использования неравновесной низкотемпературной плазмы для модификации материалов. Вопросы регулирования свойств материалов с помощью ВЧ индукционного (ВЧИ) и ВЧ емкостного (ВЧЕ) разряда пониженного давления рассмотрены в работах Абдуллина И.Ш., Хамматовой В.Б., Абуталиповой Л.Н., Зенитовой Л.А., Кудинова В.В., Корнеевой Н.В., Гриссера Х., Титова В.А. Уотерса Л., Дакроуба Г., Сиов К. Однако, существенным отличием модификации КМ являются требования, предъявляемые к ним, а, именно, одновременное повышение смачиваемости, капиллярности при отсутствии деструкции, сохранение эффекта на возможно длительное время при улучшении определенных характеристик волокнистых материалов не ухудшая других. В связи с этим требуется углубленное исследование воздействия плазмы ВЧ разряда пониженного давления на волокнистые материалы с целью придания им таких свойств, как гидрофильность, повышенная прочность и увеличение адгезии к матрице.

Данная диссертационная работа направлена на решение актуальной проблемы получения полимерного КМ с улучшенными свойствами и оптимальным соотношением матрицы и армирующего наполнителя путем направленного регулирования характеристик волокнистых материалов неорганической и органической природы с помощью потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧЕ-разряда пониженного давления с продувом газа.

Диссертационное исследование проведено в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 г.г.» по теме «Разработка технологии управления микроструктурой натуральных материалов легкой промышленности для отраслей экономики РФ (энергетического, строительного, нефтехимического и оборонно-промышленного комплекса)», в рамках проекта № 2196 от 01.02.2014 по теме «Создание научных основ и разработка новых высокоэффективных технологий модификации материалов различной физической природы, включая формирование наноструктур, электрофизическими и электрохимическими методами».

Результаты, представленные в диссертационном исследовании, по созданию КМ с улучшенными свойствами и оптимальным процентом содержания матрицы получены в течение периода с 2020 по 2025 гг. по разработке новых полимерных КМ с оптимальным процентом содержания матрицы за счет обработки потоком низкоэнергетических ионов волокнистых материалов неорганической и органической природы в качестве армирующего элемента.

Цель и задачи диссертационного исследования

Целью диссертационной работы является создание научно-технологических основ разработки полимерных композиционных материалов с улучшенными свойствами и оптимальным соотношением матрицы и армирующего наполнителя путем направленного регулирования характеристик волокнистых материалов неорганической и органической природы с помощью обработки потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления с продувом газа.

Для этого в диссертационной работе решались такие задачи:

1. Путем анализа мирового и отечественного рынков производства и потребления волокнистых материалов неорганической и органической природы, качества КМ и требований к наполнителям волокнистой структуры из неорганических и синтетических материалов и методов их модификации, определение пути решения проблемы повышения физических, механических и адгезионных характеристик этих волокнистых материалов.

2. Обоснование выбора объектов, методов и методик исследования, видов экспериментального и опытно-промышленного оборудования.

3. Исследование влияния обработки потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления с продувом газа волокнистых материалов на их физических и механические параметры, состав и структуру.

4. Создание физико-математической модели взаимодействия потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧ-разрядов пониженного давления с продувом газа с волокнистыми материалами различной химической природы.

5. Исследование физических и механических свойств и характера разрушения полученных КМ с оптимальным содержанием матрицы в КМ и модифицированными потоком низкоэнергетических ионов неорганических и синтетических волокнистых материалов.

6. Разработка технологических решений получения композитов с волокнистыми наполнителями из неорганических и синтетических материалов, обработанных потоком низкоэнергетических ионов.

Объект диссертационного исследования. Волокнистые материалы органической и неорганической природы с их применением в качестве армирующих наполнителей с наиболее широко применимыми полимерными

матрицами (эпоксидная смола ЭД-20, полиуретановые и полиамидные смолы), композиционные материалы.

Предмет диссертационного исследования. Теория и практика получения КМ с улучшенными свойствами и оптимальным содержанием матрицы путем направленного регулирования характеристик волокнистых материалов.

Соответствие исследования паспорту научной специальности. Диссертация выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 2.6.17. «Материаловедение» ВАК Минобрнауки РФ (технические науки) и подпунктами 1, 2, 4, 5, 15.

Научная новизна диссертационного исследования

1. Впервые созданы научно-технологические основы получения ПКМ с улучшенными физическими и механическими характеристиками и оптимальным содержания матрицы с армирующими элементами из неорганических и синтетических волокнистых материалов за счет обработки их потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧ-разрядов пониженного давления с продувом газа, базирующихся на физико-математической модели взаимодействия потока низкоэнергетических ионов, с неорганическими и синтетическими волокнистыми материалами (волокна сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), углеродные волокна (УВ), АДКВ, АДКТ), учитывающие конформационные процессы, происходящие при таком виде плазменной обработки и приводящие к высокой степени упорядочивания структуры, включаяnanoструктуру СВМПЭ, увеличения их удельной поверхности, формирования захороненных слоев частиц из плазмы, которые обеспечивают создание активных радикалов и функциональных групп, без каких-либо деструктивных процессов (п.1 паспорта специальности 2.6.17).

2. Впервые установлен единый механизм обработки волокнистых материалов независимо от их физической и химической природы, заключающийся в воздействии на поверхность потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧЕ-разряда пониженного давления с продувом газа (70-100эВ), а в объеме волокнистой структуры – за счет процессов рекомбинации заряженных частиц в несомостоятельных разрядах, формируемых в порах и межволоконных пространствах (п.4 паспорта специальности 2.6.17).

3. Впервые за счет плазменной объемной модификации волокнистых материалов реализован процесс оптимизации содержания массы матрицы и армирующего наполнителя при создании ПКМ с оптимальной удельной плотностью позволяющей обеспечить наибольшую прочность, благодаря максимальной адгезионной прочности волокнистого материала к полимерным матрицам и улучшению физических, механических характеристик, структуры и неизменности эффекта модификации во времени (п.5 паспорта специальности 2.6.17).

4. Установлено, что для модификации волокнистых материалов неорганической и органической природы применяются одни и те же плазмообразующие газы – аргон, воздух, а прочность соединения существенно возрастает, для синтетических волокон как с эпоксидной, так и с полиуретановой матрицами, а для АДКВ материалов с полиамидной и эпоксидной матрицами, при этом повышается температура начала термодеструкции для всех исследуемых волокнистых материалов не менее чем на 40% (п.1 паспорта специальности 2.6.17).

5. Установлено, что модификация с помощью потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧ-разрядов пониженного давления с продувом газа повышает за счет увеличения смачиваемости синтетических и неорганических волокнистых материалов не менее чем на 70% и увеличения удельной площади поверхности более чем на 4,4%, показатели межслоевой сдвиговой прочности и предела прочности на изгиб для СВМПЭ материала не менее 2 раз, а углеродных – до 30%, при этом разрушение ПКМ происходит как единого материала, то есть адгезия между армирующим элементом и матрицей носит когезионный характер (п.2 паспорта специальности 2.6.17).

6. Установлено, что повторная обработка готовых элементов армирующих волокнистых материалов непосредственно перед процессом пропитки материалом матрицы, которая подвергает модификации торцевые части, до этого подвергнутые лишь объемной плазменной обработке, позволяет повысить прочность на 20% КМ по сравнению с материалами с первичной обработкой плазмой (п.5 паспорта специальности 2.6.17).

7. Рассмотрены экологичные высокоэффективные методы и технологические схемы получения облегченных высокопрочных с улучшенными физическими и механическими характеристиками ПКМ путем модификации потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧ-разряда пониженного давления с продувом газа, синтетических и неорганических волокнистых материалов для производства, медицинских инструментов, КМ, панелей, применяемых для автомобильной техники (п.15 паспорта специальности 2.6.17).

Теоретическая и практическая значимость

1. Установлены параметры воздействия потока низкоэнергетических ионов, при которых происходит наиболее существенное изменение физических, механических характеристик волокнистых материалов:

1.1 Для синтетических волокнистых материалов (СВМПЭ-волокон и тканей, углеродных волокон и тканей) $W_i = 77,5 \text{ эВ}$, ($W_p = 1,8 \text{ кВт}$), $j_i = 0,83 \text{ А/м}^2$; для СВМПЭ материалов $P = 26,6 \text{ Па}$, $t = 3 \text{ мин}$, $G_{\text{ар}} = 0,04 \text{ г/с}$ для углеродных материалов $P = 50 \text{ Па}$, $G_{\text{воздух}} = 0,04 \text{ г/с}$, $t = 20 \text{ мин}$;

1.2 Для неорганических волокнистых материалов (АДКВ и АДКТ):

1.2.1 АДКВ: $W_i = 80 \text{ эВ}$, $j_i = 0,835 \text{ А/м}^2$, $W_p = 2,15 \text{ кВт}$, $t = 2,5 \text{ мин}$, $P = 26,6 \text{ Па}$, $G_{\text{ар}} = 0,04 \text{ г/с}$.

1.2.2 АДКТ: $W_i = 75$ эВ, $j_i = 0,83$ А/м², $W_p = 1,45$ кВт, $t = 6$ мин, Р = 26,6 Па, G_{ар+воздух} = 0,04 г/с (Ar – 70%, воздух – 30%).

2. Установленные параметры воздействия потока низкоэнергетических ионов позволили увеличить характеристики армирующих наполнителей: развитость поверхности (увеличение до 4,4% СВМПЭ-волокон) при неизменном объеме позволяет увеличить удельную площадь поверхности; для УВ - Кулон-500/007 до 19,5%, для Т300 до 124,0%, а для АДКВ – на 16,5%, для АДКТ рельефный профиль увеличивается на 7%. При этом смачиваемость для УВ возрастает на 70%, угол смачивания - до 40%, смачиваемость для СВМПЭ-волокон, повышается до 86%, угол смачивания после воздействия ПНЭИ не удается измерить, так как капля воды мгновенно поглощается тканью, что связано с возникновением существенной гидрофильтностью, для АДКТ – на 70%. Разрывная нагрузка для УВ возрастает до 20%, для СВМПЭ-волокон практически не меняется, однако существенно повышается область упругой деформации с повышением термостойкости, для АДКВ и АДКТ – в 2 раза и на 27% соответственно.

3. Разработаны композиционные материалы с модифицированными ПНЭИ армирующими наполнителями, имеющие оптимальное содержание матрицы и за счет максимального межфазового взаимодействия имеющие уникальные регулируемые физические и механические характеристики:

3.1 с армирующими из УВ и СВМПЭ имеют повышенный предел прочности на изгиб и межслоевую сдвиговую прочность; до двух раз выше исходных для СВМПЭ материалов и до 30% углеродных; при этом ударная прочность КМ с СВМПЭ-тканью достигает 90 Дж. Предел прочности при растяжении для СВМПЭ материалов в 1,3 раза, для углеродных материалов на 15% выше исходных, а модуль упругости возрастает до 20% для СВМПЭ армирующих, а модуль упругости при сжатии для углеродных материалов возрастает до 16% по сравнению с исходным;

3.2 ПКМ с полиамидной матрицей и армирующим из аморфной двуокиси кремния в виде волокон имеет предел прочности на разрыв до 25% и ударную вязкость на 75% выше после воздействия ПНЭИ на армирующее по сравнению с исходным; ПКМ армированный аморфной двуокисью кремния в виде ткани имеет предел прочности на разрыв на 40% выше исходного.

4. Значительное повышение механических характеристик ПКМ, в которых армирующее имеет замасливатель, при его удалении при использовании ПНЭИ играет существенную роль обработка торцевых окончаний, что в традиционной технологии невозможно. Эти необработанные торцевые окончания в традиционной технологии и служат первопричиной разрушения ПКМ.

5. Разработаны технологические рекомендации для создания композиционных материалов с синтетическими и неорганическими армирующими наполнителями, имеющими оптимальное соотношением матрицы и армирующего наполнителя и повышенные регулируемые

физические и механические характеристики, позволяющие значительно повысить их эксплуатационные характеристики.

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «ПТО «Медтехника» г. Казань и ООО «Ирис-НН» г. Нижний Новгород с суммарным экономическим эффектом 8,49 млн. руб. в год.

Методология и методы исследования

При выполнении работы применяли современные методы исследования: комплекс диагностической аппаратуры и приборов для определения параметров и их контроля в ВЧ-разрядах и плазменной струе, а также в слое положительного заряда. Для исследования характеристик волокнистых материалов и полимерных композиционных материалов использовались как стандартные так и разработанные в работе методы, а также высокотехнологичные методы: инфракрасная спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская компьютерная томография, многоэлементный анализ проводимый методом масс-спектрометрии с индукционно-связанной плазмой (ИСП-МС) по методике НСАМ 499-АЭС/МС и экстрагирования, дифференциальную сканирующую колориметрию (ДСК) и термогравиметрию (ТГА), механические характеристики КМ исследовались на «Instron 3382», Shimadzu AGS-X Auto graph, Shimadzu AGS-shux, Instron 5882 с навесным экстензиометром, Epsilon 3542-050M-100-ST и Epsilon 3575-AVG-HT2, рентгеноструктурный анализ, термомеханический анализ (TMA), малоугловая рентгеноскопия (NanoStar). Прочность соединения волокнистого материала с матрицей определяли методом wet-pull-out. Для оптимизации режимов воздействия ПНЭИ применялся метод многофакторного планирования эксперимента и статистического метода обработки результатов экспериментов с использованием пакета программ Statistica. При создании молекулярно-динамической модели воздействия ПНЭИ на СВМПЭ-волокнистые материалы использовалась программа LAMMPS, а для волокнистых материалов с замасливателем – метод Монте-Карло. Результаты диссертационной работы сравнивались и сопоставлялись с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

Положения выносимые на защиту

- Научно-технологические основы получения ПКМ с улучшенными физическими и механическими характеристиками и оптимальным соотношением матрицы и армирующих элементов из неорганических и синтетических волокнистых материалов за счет обработки их потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧ-разрядов пониженного давления с продувом газа, базирующихся на физико-математической модели воздействия потока низкоэнергетических ионов с синтетическими и неорганическими волокнистыми (СВМПЭ-волокна, УВ, АДКВ, АДКТ) материалами.

- Результаты комплексных исследований физических и механических характеристик волокнистых материалов неорганической и синтетической

природы при воздействии на них потока низкоэнергетических ионов инертных и реакционноспособных газов, которые позволили установить единый механизм обработки этих армирующих, а, именно, создание активных радикалов, функциональных групп с содержанием кислорода, упорядочивания структуры за счет конформационных изменений без деструктивных изменений и приводящих к существенному повышению гидрофильности, и увеличению удельной площади поверхности, позволяющих увеличить адгезионную способность их с полимерной матрицей и основных физических и механических параметров.

3. Результаты экспериментальных исследований состава и структуры волокнистых материалов органической и неорганической природы при воздействии на них потока низкоэнергетических ионов, позволившие подтвердить, что данные воздействия приводят к упорядочиванию структуры, образованию гидроксильных и карбоксильных групп за счет внедрения ионов плазмы в поверхностный слой и, как следствие, формирования свободных радикалов, которые и формируют гидроксильные группы и увеличение удельной площади поверхности. Захороненные слои частиц из плазмы обеспечивают сохранение описанных эффектов не менее чем три месяца для всех волокнистых материалов, а для СВМПЭ-материалов – не менее 5 лет.

4. Результаты создания композиционных материалов с оптимальным содержанием матрицы и наибольшими прочностными характеристиками за счет объемной модификации волокнистых материалов, реализуемой формируемыми в порах и межволоконном пространстве несамостоятельных разрядов.

5. Результаты исследования созданных композиционных материалов с армирующими, подвергнутыми воздействию потока низкоэнергетических ионов, устанавливающие, что за счет увеличения их смачиваемости с полимерной матрицей и увеличения удельной площади поверхности существенно возрастает межслоевая прочность и разрушение полимерного композиционного материала происходит как единого целого, следовательно, адгезия между армирующим и матрицей имеет когезионный характер.

6. Результаты экспериментальных исследований воздействия потока низкоэнергетических ионов на готовые элементы армирующих непосредственно перед процессом пропитки материала матрицей, которое позволяет дополнительно повысить прочностные характеристики КМ на 20% по сравнению с первичной обработкой ПНЭИ, что связано с дополнительной обработкой торцевых частей волокнистых материалов, которые не подвергались воздействию ПНЭИ. Это позволяет избегать создания концентраторов напряжений в области торцевых частей армирующего.

7. Технологические рекомендации создания экологичных высокоэффективных методов и схем получения высокопрочных с улучшенным физическими и механическими характеристиками ПКМ с оптимальным содержанием матрицы за счет модификации потоком

низкоэнергетических ионов армирующих из неорганических и синтетических волокнистых материалов для производства из них полимерных медицинских изделий, упрочняющих элементов для автомобильной техники.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечены использованием современных методов исследования, сочетающихся со стандартными и специальными методами определения характеристик и свойств армирующих и полимерных композиционных материалов, корреляцией полученных результатов друг с другом и количественным и качественным согласованием полученных данных с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

Апробация работы Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на: III Международной конференции «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (Казань, 2022); XIII конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2022); V Всероссийской научно-технической конференции «Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия» (Москва, 2022); XII Всероссийской конференции по физической электронике (Дагестан, 2022, 2024); Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (Казань, 2023); I Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2023); IX Бакеевской Всероссийской с международным участием школе-конференции для молодых ученых «Макромолекулярныеnanoобъекты и полимерные композиты» (Тула, 2023); XXIV ежегодной научной конференции отдела полимеров и композиционных материалов «Полимеры» (Москва, 2023); XV международной научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (Казань, 2023); IV Международной конференции «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (Казань, 2023); XIV конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2024); X международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии (Иваново, 2024); II Всероссийской конференции с международным участием «Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий» (Казань, 2024); XVII Международном Российско-Китайском симпозиуме «Новые материалы и технологии» (Екатеринбург, 2025); III Всероссийской конференции с международным участием «Материаловедение-2025», (Казань, 2025).

Личный вклад автора заключается в формулировке проблемы, определении направления и способов исследования, достижению, анализе, обобщении и объяснении полученных результатов. Работа представляет обобщение исследований автора в области воздействия потока низкоэнергетических ионов на неорганические и синтетические волокнистые материалы, применяемые в качестве армирующих при изготовлении полимерных материалов, а также создания полимерных композиционных

материалов с улучшенными физическими и механическими характеристиками и оптимальным содержанием матрицы. Представленные в диссертации результаты являются личными исследованиями автора и его опубликованных трудов, опубликованных в соавторстве.

Публикации. Результаты работы отражены в 46 печатных работах, в том числе в 12 статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в 5 статьях в научных журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus/Web of Science, в 5 статьях в иных научных журналах, остальные – в материалах конференций различного уровня.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает в себя: введение, 6 глав, заключение, список литературы из 405 наименований, 82 таблицы, 123 рисунка, одно приложение и представлена на 307 страницах машинописного текста.

Выражаю искреннюю благодарность и признательность д.т.н., профессорам Зенитовой Л.А. и Шахову М.Ф.; д.ф.-м.н., профессору Желтухину В.С. за помощь в проведении экспериментальных и теоретических исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, поставлена цель и определены задачи для ее достижения, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертационной работы.

В первой главе представлен анализ тенденций развития рынка и актуальных областей применения полимерных композиционных материалов с модифицированными синтетическими и неорганическими волокнами и техническими тканями на их основе. Проведен обзор методов модификации синтетических и неорганических волокон и текстильных материалов на их основе. Рассмотрены состояние и перспективы развития плазменных методов модификации текстильных материалов из синтетических и неорганических волокон. Приведено обоснование направления исследования, определены задачи диссертации.

Во второй главе обоснован выбор и приведено описание объектов исследования. СВМПЭ волокна выбраны отечественного производителя ПЭ-1 (ФГУП «ВНИИ СВ» г. Тверь) и китайского производителя D800 (Pegasus Materials Co., China). В качестве углеродных волокон выбраны марки Umatex UMT 42 (ООО «Алабуга-Волокно») и волокно НТА40 (Toho Tenax), а также ленты из УВ (УЛ) КУЛОН-500/0,07; ЛУ-П/0,2 (фирмы «Аргон») и ткани из УВ (УТ) СС-245 и СС-201, Т300 (Toray) саржевым и полотняным переплетением соответственно. Марки АДКВ ЕС11-2320 (фирмы «П-Д Татнефть-Алабуга Стекловолокно») (ТАС) и ЕС13-600Т-Т-76 («Новгородский завод стекловолокна») (НЗС), АДКТ ЛЭС-200 и полотно СС-

60 из ПП. Матрицы представлены эпоксидной смолой ЭД-20, полиуретановой и полиамидной смолой.

Представлено ВЧ плазменное оборудование, используемое для модификации материалов органической и неорганической природы. Описаны методы экспериментальных исследований состава, структуры, физических и механических характеристик свойств исследуемых материалов. Приведены методики математической обработки результатов экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления на физические и механические характеристики, состав и структуру синтетических волокон: СВМПЭ волокна и УВ, а также тканей из них, композитов с полимерными матрицами (ЭД-20, полиуретановая смола) и модифицированными армирующими наполнителями из синтетических волокон. Исследована устойчивость эффектов ВЧЕ плазменной модификации синтетических волокнистых материалов. Представлена оценка механизмов ВЧЕ плазменной модификации синтетических волокнистых материалов.

В качестве варьируемых параметров ПНЭИ выбраны: мощность разряда W_p ; время обработки t ; давление в рабочей камере P ; расход плазмообразующего газа G ; для всех исследуемых марок УВ $W_p = 1,8\text{--}1,9 \text{ кВт}$, $t = 20\text{--}40 \text{ мин}$, $P = 50 \text{ Па}$, $G = 0,04 \text{ г/с}$; для всех исследуемых марок СВМПЭ волокон $W_p = 0,85\text{--}1,8 \text{ кВт}$, $t = 3\text{--}6 \text{ мин}$, $P = 26,6 \text{ Па}$, $G = 0,04 \text{ г/с}$. В качестве плазмообразующих газов использовали аргон, воздух, смеси аргона и азота, аргона и пропан/бутана в соотношении 70 % аргона и 30 % другого газа.

В результате исследований влияния ВЧЕ плазменной модификации установлено значительное увеличение площади удельной поверхности ($S_{уд}$) у УВ. У УВ с большим содержанием углерода, т.е. у графитированных $S_{уд}$ повышается на 19,5%, у УВ с меньшим содержанием углерода до 184,0%.

Методом рентгеновской компьютерной томографии (рисунок 1) проведено исследование пучков СВМПЭ волокон с целью получения данных об их структуре. Установлено, что обработанный в плазме образец имеет меньший объем волокон, меньшую площадь поверхности, но большую удельную площадь поверхности $S_{уд}$ волокон на 6,39%. Это позволяет увеличить межфазное взаимодействие между полимерной матрицей и армирующими наполнителями.

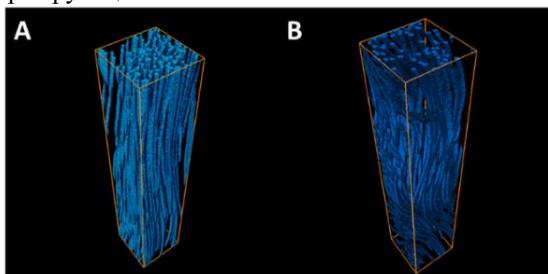


Рисунок 1 -
Сегментированные
структуры СВМПЭ
волокон: А – контрольный,
В – обработанный ПНЭИ

Установлено, что в плазменной среде воздуха происходит существенное повышение смачиваемости с полимерной матрицей ЭД-20 до 86%. У УВ материалов так же повышается смачиваемость (h_{cm}) с ЭД-20 - на 80% после обработки в среде воздуха.

Результаты исследования ВЧЕ плазменной модификации на изменение капиллярности (h_k) синтетических волокон показали следующее: после обработки в режиме $W_p = 1,8 \text{ кВт}$; $P = 26,6 \text{ Па}$; $G_{воздух} = 0,04 \text{ г/с}$; $t = 3 \text{ мин}$ капиллярность достигла 75мм и 70мм для волокон D800 и отечественного ПЭ-1 соответственно; для УВ всех марок капиллярность в режиме $W_p = 1,8 \text{ кВт}$; $P = 50 \text{ Па}$; $G_{воздух} = 0,04 \text{ г/с}$; $t = 20 \text{ мин}$ увеличилась на 70%.

Исследование угла смачивания (θ°) СВМПЭ материалов показали, что без воздействия плазмы он составлял 88° , что свидетельствует о гидрофобности поверхности. После воздействия ПНЭИ в наилучшем режиме ($W_p = 1,8 \text{ кВт}$, $P = 26,6 \text{ Па}$, $G_A=0,04 \text{ г/с}$, $t = 3 \text{ мин}$) за время 7,4 с капля воды растекается и одновременно поглощается поверхностным слоем ткани, следовательно, в стационарном состоянии измерить θ° не представляется возможным. Это объясняется абсолютной гидрофильностью поверхностного слоя и, следовательно, практически полным смачиванием. Исследования θ° при воздействии ПНЭИ на УВ проведены на волокнах всех четырех марок. Происходит снижение θ° до 40% для всех марок, кроме Т300, у которой θ° снижается на 20%.

Устойчивость эффекта ВЧЕ плазменной обработки является ключевым фактором при разработке технологий. Она оценивалась по значениям капиллярности и разрывной нагрузки. При модификации СВМПЭ эффект сохраняется до 5 лет. При модификации УВ и его тканей эффект сохраняется до 90 дней.

Исследованы механические характеристики СВМПЭ волокон марки D800. Установлено, что у контрольных образцов усредненные значения предела прочности на разрыв $\sigma_p = 940 \text{ МПа}$, модуля упругости $E = 214 \text{ Мпа}$. Величина относительного удлинения при растяжении ε_p изменяется от образца к образцу от 3 до 37%, поэтому представлена средняя величина $\varepsilon_p = 21\%$. Основной причиной разрушения СВМПЭ волокон является первоначальное наличие на фильтрах трещин, которые под нагрузкой развиваются и приводят к их разрушению.

После воздействия ПНЭИ аргона формируются поперечные связи в нанослое и сохраняется эластичность макромолекул в фильтрах, находящихся в срединных слоях. Поэтому формируется существенная область упругой деформации. Вследствие чего после воздействия ПНЭИ аргона в наилучших режимах предел прочности на разрыв σ_p незначительно падает, $E=860 \text{ Мпа}$, $\varepsilon_p=26\%$. При этом воздействие ПНЭИ приводит к повышению пластической деформации и практически полностью исключает область хрупкого разрушения, то есть близко к виду разрушения – пучок.

Установлено, что воздействие ПНЭИ на УВ в наилучших режимах разрывную нагрузку E_F не ухудшает. При этом плазменная модификация не

приводит к трансформации объемных параметров УВ и УВМ, что является существенным положительным отличием данного метода от других способов модификации.

По результатам ИК-спектроскопии для СВМПЭ волокон, модифицированных ПНЭИ, наблюдаются полосы поглощения, характерные для валентных ($2650\text{--}2550\text{ см}^{-1}$) и деформационных ($1450\text{--}1300\text{ см}^{-1}$) колебаний гидроксильной группы. При этом после воздействия ПНЭИ на СВМПЭ волокнах появляются полосы кроме вышеперечисленных полос с $\max 1747\text{ см}^{-1}$ и 1715 см^{-1} - карбонильные соединения, т.е. происходят плазмохимические процессы. Увеличение количества данных групп приводит к увеличению гидрофильности и, как следствие, повышение адгезионной прочности армирующего наполнителя с полимерной матрицей.

Воздействие ПНЭИ на УВ на примере UMT42 позволило установить возникновение полос колебания в спектре, что связано с появлением функциональных групп $-\text{C-OH}$ и $-\text{C=O}$. Привитые функциональные группы способствуют повышению адгезионной прочности УВ с эпоксидной матрицей в КМ. Обнаружены группы $-\text{C-C-}$ и $-\text{C=C-}$ (1288 см^{-1}). После воздействия ПНЭИ воздуха формируется связь $-\text{C-O-}$ (1660 см^{-1}).

Изучено влияние и степень воздействия ПНЭИ на изменение структуры, а, именно, на размер кристаллитов у УВ. У УВ размер кристаллитов после воздействия ПНЭИ становится меньше на 19%, т.е. происходит возрастание удельной поверхности.

Без воздействия ПНЭИ поверхности СВМПЭ волокон содержат поперечные трещины, небольшие выступы, после воздействия ПНЭИ она более гладкая, однородная. Это связано с удалением остатков от технологических операций низкомолекулярных компонентов, элементов несвязанных друг с другом макромолекул, залечивание микротрещин за счет сшивок.

Данные ДСК и ТГА показывают, что плазмоактивированные СВМПЭ волокна обладают большей термостойкостью.

Дифрактограммы для СВМПЭ волокон марки D 800 до и после воздействия ПНЭИ позволили установить, что у кристаллитов после обработки ПНЭИ, происходит возрастание толщины кристаллов.

Влияние воздействия ПНЭИ на полимерный композит с армирующим из УВ исследовались по изменению предела прочности на разрыв σ_p . Анализ данных показывает повышение σ_p . Наилучшие результаты показали модульные композиты при обработке УВ в режиме: $W_p = 1,8\text{kВт}$, $P = 50\text{ Па}$, $G_{воздуха}=0,04\text{ г/с}$, $t = 20\text{ мин}$.

При воздействии ПНЭИ разрывная нагрузка повышается в среднем на 15,0% для UMT 42 волокон. Для волокон Т 300 разрывная нагрузка увеличилась на 18,4%.

Воздействие ПНЭИ воздуха позволяет существенно увеличить сдвиговую прочность τ на 150% (UMT 42) при обработке $W_p = 1,8\text{kВт}$,

$P=50$ Па, $G=0,04$ г/с, $t=20$ мин.

Модельный композит с применением обработанного углеродного волокна марки Т 300 также достигает подобных результатов.

Наилучшие результаты по увеличению касательного напряжения τ_{kac} получены при $W_p = 1,8$ кВт, $P = 50$ Па, $G_{воздуха} = 0,04$ г/с $t = 20$ мин, при этом относительная сдвиговая прочность E_r увеличилась на 50 %.

Аналогичные исследования проводили на СВМПЭ волокнах марки D 800. Установлены значения максимальной нагрузки до разрушения F композита при удалении волокна из ЭС. При этом формирование модельного композита проводили как на воздухе, так и в вакуумной камере. Значения F увеличиваются на 100% при получении модельного композита на воздухе и на 73% полученного в вакуумной камере, а σ_p увеличивается на 98%, максимальная нагрузка P_{max} на 96%, τ_{kac} в 2,2 раза, модуль Юнга E на 100%, τ на 110%. Анализ данных показал, что КМ с модифицированным материалом из СВМПЭ имеет значения σ_p , E и σ_{pass} более чем в 2 раза больше исходных. Установлено, что плотность переплетения ткани из СВМПЭ волокон не влияет на h_{cm} и, следовательно, не будет существенно влиять на адгезионную прочность и характеристики КМ из данных тканей.

Анализ величины энергетического воздействия компонентов плазмы ВЧЕ-разрядов пониженного давления позволил установить, что основными факторами ответственными за модификацию являются: воздействие потока низкоэнергетических ионов с энергиями от 60 эВ до 100 эВ и рекомбинация ионов плазмы на поверхности, в порах и капиллярах волокнистого материала, воздействие несамостоятельных разрядов, позволяющих реализовать объемную обработку. Данные процессы сопровождаются созданием свободных радикалов, формированием сшивок и присоединением гидрофильных групп, что увеличивает адгезионную прочность армирующего материала с полимерной матрицей.

Обработанные в ПНЭИ ткани из синтетических материалов с улучшенными характеристиками позволили использовать их в качестве армирующих наполнителей в КМ с полимерными матрицами с оптимальным соотношением компонентов.

Одним из методов по определению адгезионной прочности и возможности оптимизации соотношения полимерная матрица – армирующий наполнитель за счет воздействия ПНЭИ на синтетические ткани является ТМА-метод, предназначенный для измерения изменений линейных размеров образцов в условиях тепловых и механических нагрузок. Размер изготовленных образцов: диаметр 6 мм, толщина 2 мм (40%/60%), 3 мм (50%/50%), 3,5 мм (60%/40%), 4 мм (70%/30%), 4,5 мм (80%/20%) из СВМПЭ волокон (D 800) и из УВ. Проценты указывают на соотношение содержания полимерной матрицы и армирующего наполнителя. Проводились испытания на образцах без модификации синтетических тканей и после воздействия ПНЭИ (рисунки 2 и 3).

Как видно из рисунка 3, после воздействия ПНЭИ на СВМПЭ волокна, у созданных на их основе композиционных материалов возрастает температура разрушения T° увеличивается на 15% при содержании матрицы для КМ 50%. Режим плазменной обработки $W_p = 1,8\text{ кВт}$, $P = 26,6 \text{ Па}$, $G_{\text{argon}} = 0,04 \text{ г/с}$ $t = 3 \text{ мин}$.

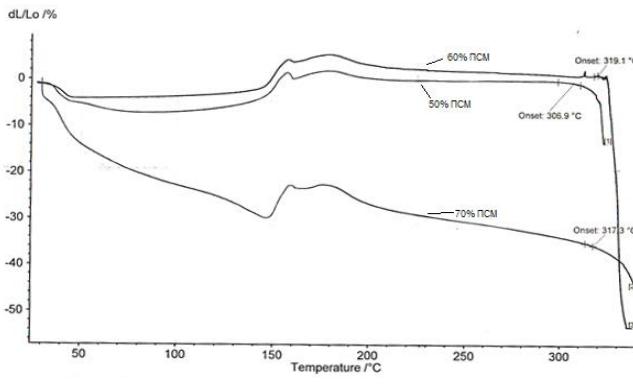


Рисунок 2 –
ТМА КМ с
необработанными
СВМПЭ
армирующими
тканями марки
D800

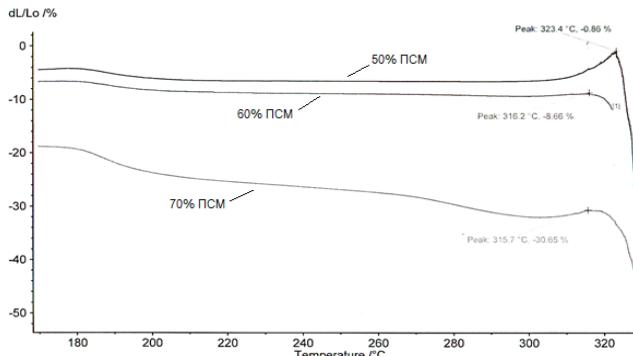


Рисунок 3 –
ТМА КМ с
обработанными
СВМПЭ
армирующими
тканями марки
D800

Аналогичные исследования проведены для КМ с армирующим из УТ. После плазменного воздействия возможно достичь оптимального соотношения полимерной матрицы (40%). Контрольные образцы КМ сохраняют свои механические характеристики только при содержании матрицы 50%.

Армирующие УТ, используемые в ПКМ, подвергались воздействию ПНЭИ при $W_p = 1,8 \text{ кВт}$, $G_{\text{воздуха}} = 0,04\text{г/с}$, $t = 20 \text{ мин}$, $P = 50 \text{ Па}$. Воздействие ПНЭИ позволяет увеличить модуль упругости E волокна на 9% (СС 245) и на 15% (СС 201). При этом предел прочности на разрыв σ_p практически остаётся без изменения. Одновременно происходит увеличение предела прочности при сжатии $\sigma_{\text{сжат.}}$ на 17% (СС 245) и на 20% (СС 201).

При исследовании E и $\sigma_{\text{изг.}}$ по трехточечной схеме не наблюдается изменение E , но при этом происходит увеличение $\Delta\sigma_{\text{изг.}}$ для ткани СС 201 на 13,4%, а для ткани СС 245 на 5%. Установлено, что воздействие ПНЭИ

увеличивает межслоевую прочность $\sigma_{\text{межсл.}}$ на 16% для обоих армирующих в КМ. Таким образом, воздействие ПНЭИ дает возможность существенно улучшить механические характеристики КМ за счет увеличения межфазного взаимодействия.

Повышение межфазного взаимодействия между армирующим наполнителем из СВМПЭ материала и полимерной матрицы улучшает такие механические характеристики КМ как $\sigma_{\text{изг.}}$ в 3 раза, $\sigma_{\text{межсл.}}$ в 2,7 раза. Созданы высокопрочные и облегченные КМ с СВПЭ тканью с оптимальным соотношением полимерная матрица – армирующий наполнитель (50%/50%) при плотности $\rho \leq 1,1 \text{ г}/\text{см}^3$.

Анализируя полученные результаты для СВМПЭ и углеродных материалов, можно сделать следующий вывод: энергия ионов, поступающая на поверхность волокнистых материалов и плотность ионного тока одинаковы: $W_i = 77,5 \text{ эВ}$, $j_i = 0,83 \text{ А}/\text{м}^2$ ($W_p = 1,8 \text{ кВт}$).

Для углеродных материалов наилучшим плазмообразующим газом является воздух, который более эффективно способствует удалению замасливателя и, кроме образования макрорадикалов, дополнительно формирует гидрофильные группы, также повышение давления до 50 Па необходимо для дополнительного термического воздействия, что наиболее выражено для неорганических волокон, где применяется ВЧИ-разряд пониженного давления.

В четвертой главе представлены данные по влиянию ПНЭИ, сформированных в двух видах разрядов пониженного давления – ВЧИ разряда и ВЧЕ разряда пониженного давления, на физические, механические характеристики, структуру и состав АДКВ и АДКТ, а также создание КМ на их основе. Плазмообразующей средой служили: аргон, воздух и смесь аргона с азотом и пропан-бутаном (70/30). Воздействие ПНЭИ регулировали W_p , P , G и t , в качестве базовых режимов использовали $W_p = 1,9 - 2,2 \text{ кВт}$, $t = 1 - 5 \text{ мин}$, $G = 0,04 \text{ г}/\text{с}$ $P = 26,6 \text{ Па}$.

Наилучшие результаты по модификации АДКВ достигаются в индукционной плазме, а по АДКТ – в плазме емкостного разряда.

С целью установления влияния воздействия ПНЭИ на изменение удельной поверхности ($S_{y\vartheta}$), объемной плотности (ρ) проведена рентгеновская томография. Установлено, что воздействие ПНЭИ, генерируемых из плазмы ВЧИ-разряда пониженного давления, позволяет повысить плотность ρ АДКВ на 2,5% и увеличить площадь удельной поверхности $S_{y\vartheta}$ на 16,5%, что позволяет проводить более эффективно диффундирование полимерной матрицы и увеличивать межфазное взаимодействие АДКВ с полимерной матрицей. Это является одной из основных составляющей регулирования оптимального соотношения полимерная матрица – армирующий наполнитель в КМ и увеличения адгезионной прочности АДКВ со связующим.

Влияние плазмообразующей среды, среди которых аргон, воздух, азот, ацетилен, смесь пропан-бутан оценивалось по изменению капиллярности АДКВ.

Плазменная обработка в среде инертного газа (аргона) приводит к частичному удалению с поверхности АДКВ замасливателя и его активации. Обработка волокон в среде воздуха в силу химической устойчивости АДКВ не приводит к окислительным процессам самого АДКВ, но к окислению замасливателя. Обработка волокон в среде ацетилена и смеси газов пропан-бутан приводит к образованию на поверхности волокон гидрофобных соединений, способствующих понижению адгезии системы полимер-наполнитель.

При воздействии ПНЭИ на АДКВ - ТАС капиллярность h_k возрастает в 1,7 раза, для АДКВ - НЗС – в 1,5 раза. Сохранение эффекта после воздействия ПНЭИ изучалось по изменению капиллярность h_k в течение 90 суток. Данные исследования позволили обнаружить эффект повышения капиллярность h_k на АДКВ-ТАС по истечению 15 суток в 1,3 раза. По достижению 90 суток значения капиллярность h_k и для АДКВ-ТАС, и для СВ-НЗС вернулись на уровень капиллярности сразу после воздействия ПНЭИ. Поэтому целесообразно применять АДКВ для создания КМ после воздействия ПНЭИ на 12 – 18 день. Такой накопительный эффект повышения капиллярности связан с объемной обработкой материала. Принципы структурирования самого АДКВ передаются оставшемуся замасливателю не мгновенно, так как это два разнородных материала, а дополнительная перестройка замасливателя происходит после структурирования непосредственно АДКВ. После воздействия ПНЭИ наблюдается изменение поверхности, которое сопровождается частичным удалением замасливателя и формированием гидрофильных групп как на поверхности замасливателя, так и на самом АДКВ. Наилучший эффект достигается при использовании плазмы ВЧИ-разряда пониженного давления с $W_p = 2,15 \text{ кВт}$ и плазмообразующего газа аргона и воздуха.

Изучено влияние взаимодействия ПНЭИ на смачиваемость h_{cm} АДКВ с полимерной матрицей из ЭД-20. Установлено, что смачиваемость зависит от длительности воздействия ПНЭИ и мощности разряда W_p . При этом наилучший результат достигается при модификации в режиме $W_p = 2,15 \text{ кВт}$, $t = 2,5 \text{ мин}$, $P = 26,6 \text{ Па}$, $G_{\text{воздух}}=0,04 \text{ г/с}$, при котором смачиваемость возрастает на 70%.

Установлено, что воздействие ПНЭИ, генерируемых из плазмы ВЧИ разряда пониженного давления, позволяет повысить соотношение прилагаемой силы P к изменению линейных размеров l , то есть P/l в 1,5 раза (АДКВ -ТАС) и в 1,4 раза (АДКВ -НЗС). Найден наилучший режим по воздействию ПНЭИ на АДКВ: $W_p = 2,15 \text{ кВт}$, $t = 2,5 \text{ мин}$, $P = 26,6 \text{ Па}$, $G_{ar} = 0,04 \text{ г/с}$.

Наилучшая величина h_{cm} для АДКТ соответствует режиму $W_p = 1,45 \text{ кВт}$, $t = 6 \text{ мин}$, $P = 26,6 \text{ Па}$, $G = 0,04 \text{ г/с}$ (70 % - Ar, и 30 % - воздух) и

превышает исходное значение в 2 раза. Установлено, что в данном режиме происходит совершенствование структуры и ее упрочнение, при этом волокно не разрушается и переплетение сохраняет исходную форму, а ширина основной нити увеличивается на 27%, а уточной – уменьшается на 10%. Таким образом происходит увеличение поверхности соприкосновения на 7%, что повышает адгезионную прочность к полимерной матрице.

Установлено, что воздействие ПНЭИ на АДКТ, генерируемых из плазмы ВЧЕ-разряда пониженного давления, обеспечивает снижение краевого угла смачивания (θ°) АДКТ на 66° (от 104° до 38°).

Для изучения состава АДКВ после воздействия ПНЭИ исследованы ИК-спектры АДКВ -ТАС и АДКВ -НЗС. Обнаружены пики в области 2850 cm^{-1} (группы $-\text{CH}_2$ и $-\text{CH}_3$), характерные для замасливателя, становятся менее заметны в связи с испарением части замасливателя. Изменение пиков в окрестности $1450\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ и $3650\text{-}3900\text{ cm}^{-1}$ говорит о появлении гидрооксильных групп. Пик в области 2345 cm^{-1} , который после воздействия ПНЭИ имеет существенно большую интенсивность CO_2 , связан с тем, что сорбирует АДКВ из атмосферы CO_2 . Это подтверждается дополнительным ростом h_{cm} на 15 день после воздействия ПНЭИ. Возникновение этих групп способствует значительному увеличению смачиваемости и, как следствие, повышению межфазного взаимодействия полимерной матрицы с наполнителями.

Исследование характеристик ПКМ с полиамидной матрицей показали, что по своим прочностным показателям они не уступают металлическим материалам. Предложено использовать АДКВ в КМ после воздействия ПНЭИ ($W_p = 2,15\text{ кВт}$, $t = 2,5\text{ мин}$, $P = 26,6\text{ Па}$, $G_{\text{Ar}} = 0,04\text{ г/с}$). Получены следующие параметры прочностных свойств КМ, изготовленных из полиамида с обработанным ПНЭИ армирующим наполнителем из АДКВ: $\sigma_p=185\text{ Мпа}$, $\Delta l=4,2\%$, $E = 5700\text{ МПа}$. Наилучшим содержанием полимерной матрицы является 20 %, при этом температура, при которой наблюдается плавление, возрастает до $339,6^\circ\text{C}$ после воздействия ПНЭИ (в 1,4 раза).

Изучение микроструктуры поверхности разрушения ПКМ (полиамидная матрица, армирующее из АДКВ) показало, что имеется как адгезионный, так и когезионный вид разрушения ПКМ.

Установлены зависимости изменения массы от температуры Т (ТГА) и теплового потока от Т для АДКТ. После воздействия ПНЭИ потеря массы происходит при более высоких Т (без воздействия ПНЭИ экзотермический пик Т = 235°C , а с воздействием ПНЭИ – Т = 375°C , что говорит о формировании значительно более устойчивых структур в АДКТ в режиме $W_p = 1,45\text{ кВт}$, $t = 6\text{ мин}$, $P = 26,6\text{ Па}$, $G_{\text{Ar} + \text{ воздух}} = 0,04\text{ г/с}$ (70% Ar; 30% воздух)).

Наивысшее усилие растяжения до разрыва F_{max} и относительное удлинение ε_p для АДКТ до воздействия ПНЭИ имеют невысокие значения. Наилучший режим, при котором F_{max} (1650Н) становится больше на 27%, а ε_p на 3,7% после воздействия ПНЭИ: $W_p = 1,45\text{ кВт}$, $t = 6\text{ мин}$, $P = 26,6\text{ Па}$, $G_{\text{Ar} + \text{ воздух}} = 0,04\text{ г/с}$ (70% Ar; 30% воздух),.

При этом адгезионная прочность АДКТ с нетканым полипропиленовым материалом с использованием эпоксидной смолы ЭД-20 увеличивается на 42%.

Для установления наилучшего соотношения полимерная матрица – армирующий наполнитель проведены исследования с помощью термомеханического анализа. Установлено, что после воздействия ПНЭИ оптимальное соотношение полимерная матрица – армирующий наполнитель составляет 20%/80% (ЭД-20/АДКТ).

Исследование прочностных характеристик КМ с АДКТ показало, что температура плавления $T_{\text{пп}}$ КМ увеличилась на 9%, предел прочности на разрыв σ_p на 24%, ударная вязкость по Шарли на 92%.

В пятой главе представлены результаты разработки математических моделей процессов модификации синтетических и неорганических волокон в плазме ВЧЕ разряда пониженного давления методами молекулярной динамики и Монте-Карло. Разработаны теоретические основы процессов модификации волокнистых материалов из синтетических и неорганических волокон в плазме ВЧЕ и ВЧИ разрядов пониженного давления.

Установлено, что воздействие ПНЭИ на волокнистые материалы имеет единую природу – низкоэнергетическая бомбардировка поверхностных слоев и общие принципы, связанные с выделением энергии нейтрализации при горении разряда в межфиламентном пространстве.

При создании физической и математической моделей необходимо учитывать их особенности. Так волокнистые материалы из УВ и АДКВ имеют на поверхности замасливатель, основная задача моделирования для них заключается в доказательстве возможности удаления замасливателя.

Физическая модель воздействия ПНЭИ на армирующие наполнители различной физической и химической природы заключается в том, что при воздействии ПНЭИ, генерируемых из плазмы струйных ВЧ-разрядов пониженного давления с кинетической энергией ионов W_i от 30 до 100 эВ и плотностью ионного тока j_i от 0,3 до 25 А/м² происходит бомбардировка положительными ионами плазмообразующего газа поверхностного слоя волокнистых материалов. При попадании иона на поверхность материала до 90 % его кинетической и потенциальной энергии передается атомам поверхности, что приводит к увеличению энергии последних. Эта энергия распространяется, в основном, вдоль макромолекул, что приводит к возбуждению колебаний атомов и, как следствие разрушению межатомных и межмолекулярных связей, т.к. W_i значительно превышает энергию этих связей. При этом создаются свободные радикалы (СР), а т.к. при этом ионы плазмы образуют в поверхностном слое захороненные слои, то СР являются долгоживущими.

Кроме того, в порах, межфиламентных и межволоконных пространствах за счет разности потенциалов на противоположных сторонах обрабатываемого материала ≈70–80 В возникают несамостоятельные разряды. Энергии, выделяющейся при нейтрализации ионов внутри порового

пространства, достаточно для реализации процессов разволокнения и упорядочивания структуры. Плазмохимические процессы в объеме материала позволяют усиливать гидрофильность, лиофильность поверхности.

Математическая модель создается в предположениях, что ионы плазмы и атомы армирующего представляются в виде шаров с определённым радиусом r .

Воздействие ПНЭИ на замасливатели волокнистых материалов моделировалось с помощью метода статистических испытаний (Монте-Карло). Точный состав замасливателей является, как правило, коммерческой тайной производителя. Однако, в каждом замасливателе есть основной компонент, содержание которого составляет от 85 до 90%. Поэтому построены модели воздействия ПНЭИ на основные компоненты замасливателей для АДКВ, АДКТ и УВ.

Для АДКВ и АДКТ в качестве основного компонента замасливателя рассмотрен (3-глицидоксипропил)-триметоксисилоксан (ГПТМС), химическая формула которого $C_9H_{20}O_5Si$, для УВ – замасливатель на основе парафина – смеси предельных углеводородов с общей формулой C_nH_{2n+2} , где $n=18-40$.

Результаты расчетов показывали, что после обработки ПНЭИ молекулярно-массовое распределение компонент замасливателя изменяется. В парафине число «длинных» олигомерных молекул уменьшается, число «коротких» молекул увеличивается за счет того, что происходит разрыв связей в результате ПНЭИ. Молекулы ГПТМС также разрушаются, образуются короткие радикалы, в том числе газообразные и жидкие фракции, в связи с чем масса уменьшается на 80–95%, в зависимости от t_b , W_i и j_i . Таким образом, моделирование показывает, что обработка УВ и АДКВ/АДКТ с помощью ПНЭИ позволяет удалить значительную часть замасливателя.

Обработка СВМПЭ материалов с помощью ПНЭИ моделировалась методом молекулярной динамики, заключающийся в том, что атомы или их объединение (например, молекулярное звено) представляются шариками, которые связаны жесткими или упругими связями. Метод основан на системе уравнений, которая выражает второй закон Ньютона $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$:

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{\sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij}}{m_i}, \quad \mathbf{v}_i(0) = 0, \quad (5.1)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad \mathbf{r}_i(0) = \mathbf{r}_{i0}, \quad i = 1, \dots, N \quad (5.2)$$

Здесь v_i и r_i – скорости и радиус-вектор i -й частицы, r_{i0} – начальные координаты, F_{ij} – сила взаимодействия частиц с индексом i и j , m_i – масса, t – время, N – общее число количества атомов в элементарной ячейке. Сила F_{ij} определяется как градиент потенциала $F_{ij} = -\nabla p_{ij}$.

Численное моделирование проводилось при энергии ионов 75 эВ. Силовое поле частиц в полиэтилене моделировалось, используя потенциалы

Дрейдинга и Леннарда-Джонса. Для решения системы уравнений (5.1), (5.2) использован алгоритм Верле. Модель реализована в пакете LAMMPS.

Численное моделирование показало, что в результате бомбардировки вокруг движущегося атома аргона образуется трек, у находящихся на пути иона атомов на несколько порядков повышается температура. Связи между атомами рвутся, что приводит к появлению коротких радикалов. Фрагменты молекул, находящихся на поверхности, разрываются до отдельных атомов (рис. 4). По мере продвижения, атом аргона теряет энергию, и останавливается на расстоянии 2.8 нм от поверхности.

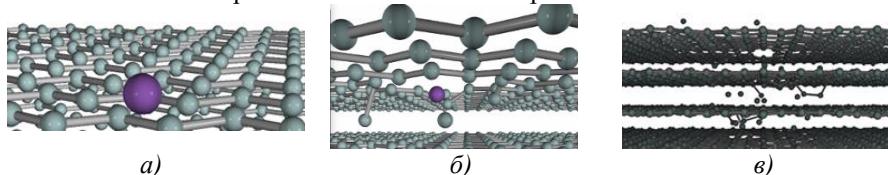


Рисунок 4 – Поверхностные атомные слои СВМПЭ и бомбардирующий ион аргона, $W_i=50$ эВ: *а*) – до столкновения, *б*) – после столкновения, $t=0.3$ фс, *в*) – разрушение макромолекул и образование коротких радикалов, $t=1,0$ фс. Фиолетовый цвет – аргон, зеленый - звено CH_2 .

Таким образом, численное моделирование показало, что обработка СВМПЭ волокон ПНЭИ приводит к разрыву межмолекулярных и межатомных связей, имплантации низкоэнергетических ионов на глубину до 2,8 нм. В поверхностном нанослое возникают нескомпенсированные углеродные связи с большим временем жизни, способные образовывать функциональные группы после плазменной обработки. В результате межмолекулярного проникновения имплантированных ионов в поверхностном слое возникают напряженные состояния, что приводит к увеличению поверхностной энергии. Совокупное действие этих факторов способствует активации поверхности. Очевидно, что аналогичные процессы кроме удаления и активации замасливателя происходят на поверхности АДКВ/АДКТ/УВ.

В результате бомбардировки ПНЭИ волокон на поверхности формируются радикалы со свободными связями, что создает условия для образования гидрофильных функциональных групп, что повышает смачиваемость поверхности, увеличивает межфазное взаимодействие армирующего с волокнистыми материалами и, как следствие, повышается адгезионная прочность системы полимер-наполнитель.

В шестой главе представлены разработанные основные положения научно-технологических основ создания ПКМ с уникальными регулируемыми характеристиками, технологии получения армирующих из СВМПЭ материалов, АДКВ, АДКТ, УВ, УТ с применением воздействия ПНЭИ для увеличения межфазного взаимодействия с полимерной матрицей при создании КМ и повышению их физических и механических характеристик, создания КМ с оптимальным соотношением полимерная

матрица – армирующий наполнитель.

Научно-технологические основы разработки ПКМ с уникальными регулируемыми характеристиками и с оптимальным соотношением полимерная матрица – армирующий наполнитель базируются на положениях физической и математической моделях воздействия ПНЭИ на армирующие материалы органической и неорганической природы.

Подобран наилучший режим воздействия ПНЭИ на СВМПЭ-ткань: $W_p = 1,8 \text{ кВт}$, $P = 26,6 \text{ Па}$, $G_{Ar} = 0,04 \text{ г/с}$, $t = 3 \text{ мин}$, приводящий к максимальному межфазному взаимодействию с полимерной матрицей и достижению наивысших прочностных характеристик при содержании матрицы 50% в ПКМ. Применяется матрица из ЭД-20 с отвердителем ПЭПА в пропорциях 10:1 и полиуретановой смолой. В опытно-промышленной партии полученных ПКМ достигнуто повышение предела прочности на изгиб σ_{izg} (454 МПа) и сдвиговой прочности σ_{co} (25,0 МПа), соответственно в 2,5 и 3,2 раза от исходного. Данный метод получения ПКМ является в настоящее время единственным для создания ПКМ с СВМПЭ тканями.

Создание нового поколения ПКМ на основе СВМПЭ материалов позволило уменьшить массу изделий как минимум на 10%.

Также разработана технология получения КМ с УВ материалами, которая позволяет увеличить прочностные характеристики: модуль упругости E увеличивается для УТ марки для СС 245 на 12 % и на 19 % для СС 201, и $\Delta\sigma_{сжатия}$ – на 17 % и 20 % соответственно.

Воздействие ПНЭИ на АДКВ реализовывалось на опытно-промышленной ВЧИ-плазменной установке. Плазмообразующий газ – Ar, в ряде случаев – воздух.

Для отработки технологии воздействия ПНЭИ на АДКВ использован режим: $W_p = 2,15 \text{ кВт}$, $t = 2,5 \text{ мин}$, $G_{ar} = 0,04 \text{ г/с}$, $P = 26,6 \text{ Па}$. Данная технология использовалась для изготовления полимерных медицинских инструментов многократного использования. При получении КМ применялась полимерная матрица из полиамида медицинского ПА-М, а в качестве армирующего - модифицированный ПНЭИ АДКВ. По показателю прочности, данный инструмент соответствует ГОСТу, что позволяет использовать его взамен инструментов, изготовленных из стали.

Обработка ПНЭИ АДКТ позволяет существенно повышать физические, механические, а также эксплуатационные параметры композиционного изделия в виде трубчатой мембранны КМ.

Разработаны высокоеффективные технологии создания ПКМ с регулируемыми физическими и механическими характеристиками на основе модифицированных ПНЭИ армирующих из неорганических и синтетических волокнистых материалов.

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «ПТО «Медтехника» г. Казань и ООО «Ирис-НН» г. Нижний Новгород с суммарным экономическим эффектом 8,49 млн. рублей в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны научно-технологические основы получения ПКМ с улучшенными физическими и механическими характеристиками и оптимальным процентом содержания матрицы с армирующими элементами из неорганических и синтетических волокнистых материалов за счет обработки их потоком низкоэнергетических ионов, базирующихся на физической и математической моделях взаимодействия потока низкоэнергетических ионов с неорганическими и синтетическими волокнистыми материалами, включая конформацию структур, позволяющую упорядочивать ее, формирование активных радикалов и функциональных групп, при этом не создавая деструкции в армирующих материалах.

2. Доказан единый механизм модификации неорганических и синтетических волокнистых материалов, включающий воздействие потока низкоэнергетических ионов на их поверхностные слои, а также, за счет энергии рекомбинации в объеме волокнистых материалов, выделяющейся при горении несамостоятельных разрядов в порах и межфиламентных пространствах реализации процессов структурирования, удаления примесных дефектов, усреднения массы, размеров пор.

3. Разработан процесс оптимизации процента содержания матрицы и создания ПКМ с максимальной удельной прочностью, позволяющей обеспечить наибольшие прочностные характеристики за счет максимального межфазного взаимодействия, обеспечивающего высокую адгезионную прочность армирующего к полимерной матрицы с сохранением эффекта воздействия для армирующих с замасливателем не менее трех месяцев, а для СВМПЭ материалов более 5 лет.

4. Воздействие потока низкоэнергетических ионов и объемная обработка с применением струйных ВЧ-разрядов пониженного давления позволили значительно повысить физические и механические характеристики армирующих:

- развитие поверхности при неизменном объеме, что увеличило удельную поверхность, в среднем, более чем на 15 %; повысить смачиваемость за счет повышения свободной энергии волокнистых материалов как на поверхности, так и в объеме; повысить прочностные характеристики и термостойкость за счет упорядочивания структуры.

5. Созданы ПКМ с оптимальным соотношением полимерная матрица – армирующий наполнитель и с регулируемыми повышенными физическими и механическими характеристиками за счет воздействия потока низкоэнергетических ионов на поверхность и объемной обработки, реализуемых в струйных ВЧ-разрядах пониженного давления. При этом вид разрушение ПКМ – когезионный, то есть разрушение происходит как единого материала, что позволило существенно повысить прочностные характеристики и, в первую очередь, межслоевую сдвиговую прочность.

6. Разработан процесс вторичной модификации потоком низкоэнергетических ионов готовых элементов армирующих волокнистых материалов перед процессом пропитки, включая их торцы, позволяющий дополнительно повысить не менее чем на 20 % прочностные характеристики материалов.

7. Разработаны экономичные высокоэффективные технологии создания облегченных высокопрочных с улучшенными, регулируемыми физическими и механическими характеристиками ПКМ на основе модификации потоком низкоэнергетических ионов и объемной обработки с применением струйных ВЧ-разрядов пониженного давления армирующих и синтетических и неорганических волокнистых материалов для создания изделий медицинской промышленности, автомобильной техники. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «ПТО «Медтехника» г. Казань и ООО «Ирис-НН» г. Нижний Новгород с суммарным экономическим эффектом 8,493437 млн. рублей в год.

Перспективы дальнейшей разработки полученных результатов диссертационной работы заключаются в развитии применения модификации с помощью потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧ-разрядов пониженного давления и расширения использования ПКМ с модифицированными армирующими для увеличения линейки волокнистых материалов и развития научно-технологических основ воздействия потоков низкоэнергетических ионов на волокнистые материалы различной физической и химической природы.

**Публикации, отражающие основное содержание диссертации:
Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах,
рекомендованных ВАК РФ:**

1. Ершов, И.П. Влияние плазмы высокочастотного индукционного разряда на стекловолокно, оценённое с помощью рентгеновской компьютерной томографии / И.П. Ершов, Л.А. Зенитова, А.Н. Даутова, **Ф.Р. Сагитова** // Известия ВолгГТУ. – 2023. – №6 (277) – С.125-132.

2. Ершов, И.П. Влияние плазменной обработки высокочастотным индукционным разрядом пониженного давления на повышение адгезионных характеристик стекловолокна / И.П. Ершов, **Ф.Р. Сагитова**, Л.А. Зенитова // Строительные материалы и изделия. – 2023. – №6 (4). – С.5-14.

3. Ершов, И.П. Повышение адгезионных характеристик стеклоткани в результате плазменной обработки высокочастотным емкостным разрядом пониженного давления / И.П. Ершов, Л.А. Зенитова, А.Н. Даутова, **Ф.Р. Сагитова** // Известия ВолгГТУ. – 2023. – №5 (276) - С.119-124.

4. **Сагитова, Ф.Р.** Плазмообработка стеклоткани как способ управления её адгезионными характеристиками / **Ф.Р. Сагитова** // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2024. – Т.70. – № 6. – С. 34-38.

5. Некрасов, И.К. Повышение прочностных характеристик композиционного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с помощью модификации плазмой высокочастотного емкостного разряда пониженного давления / И.К. Некрасов, И.Ш. Абдуллин, **Ф.Р. Сагитова** // Авиационные материалы и технологии. – 2025. – № 2(79). – С. 114-127.
6. Некрасов, И.К. Исследование влияния плазменного воздействия ВЧЕ разряда пониженного давления на аппретированные СВМПЭ-волокна / И.К. Некрасов, **Ф.Р. Сагитова**, И.Ш. Абдуллин // Известия ВолгГТУ. – 2025. – №2 (297) – С.61-71.
7. **Сагитова, Ф.Р.** Экологическая модификация стекловолокон для получения высококачественных полимерных композитов: изучение результатов плазменного воздействия / **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2025. – Т.71. – № 1. – С. 43-47.
8. Абдуллин, И.Ш. Зависимость прочностных характеристик синтетических волокон от состава плазмообразующего газа и времени обработки при воздействии разряда пониженного давления / И.Ш. Абдуллин, И.К. Некрасов, **Ф.Р. Сагитова** // Перспективные материалы. – 2025. – №5. – С. 80-88.
9. **Сагитова, Ф.Р.** Модификация волокон аморфной двуокиси кремния потоком низкоэнергетических ионов: структура, свойства и применение в композиционных материалах для медицинских инструментов / **Ф.Р. Сагитова** // Дизайн. Материалы. Технология. – 2025. – № 4(80). – С. 103-109.
10. **Сагитова, Ф.Р.** Ионно-плазменная активация углеродных волокон и тканей: рост адгезионной прочности при уменьшении доли полимерной матрицы / **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин // Дизайн. Материалы. Технология. – 2025. – № 4(80). – С. 110-115.
11. **Сагитова, Ф.Р.** Регулирование процента содержания матрицы в композиционных материалах путем модификации СВМПЭ-ткани с помощью потока низкоэнергетических ионов / **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин // Транспортное машиностроение. – 2025. – №11. – С. 63-70.
12. Сагитова, Ф.Р. Влияние потока низкоэнергетических ионов на физические свойства углеродных волокон и тканей, используемых в качестве армирующих элементов при создании композитных материалов / **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин // Транспортное машиностроение. – 2025. – №12. – С. 94-100.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных базах цитирования WoS/Scopus:

13. Abdullin, I.Sh. Modification of the surface of high-modulus polyethylene with low-energy low-intensity ion streams: theory and experiment / I.Sh. Abdullin, V.S. Zheltuhin, I.K. Nekrasov, **F.R. Sagitova** // Processes of Petrochemistry and Oil Refining. – 2022 – Vol. 23. No.4 – C.525-543.

14. Abdullin, I.Sh. Experimental and theoretical study of the interaction of a low-energy ion flow with chemical fibers / I.Sh. Abdullin, V.S. Zheltuhin, **F.R. Sagitova**, I.K. Nekrasov // High Energy Chemistry. – 2023. – Vol.57. – Suppl.1. – pp. 132-136.
15. Abdullin, I.Sh. Characteristics of a lowered-pressure, high-frequency inductive jet charge in processes of modification of products // I.S. Abdullin, I.K. Nekrasov, **F.R. Sagitova**, S.V. Mironov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2025. – V.98. – Pp. 569-580.
16. Abdullin, I.Sh. Features of the formation of a positive charge layer during modification of products in a CCP discharge under dynamic vacuum conditions / I.Sh. Abdullin, V.S. Zheltukhin, I.K. Nekrasov, M.F. Shaekhov, **F.R. Sagitova** // Inorganic Materials: Applied Research. – 2025. Vol. 16. – No.3. – Pp. 683–690.

17. **Сагитова, Ф.Р.** Повышение термостойкости и прочности композиционных материалов с использованием волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена и углерода, модифицированных потоком низкоэнергетических ионов / **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2025. – № 5(419). – С. 349-357.

Статьи, опубликованные в иных научных журналах:

18. **Сагитова, Ф.Р.** Модификация углеродных волокон и тканей для их применения в качестве армирующих компонентов в композиционных материалах / **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин // Вестник технологического университета. – 2025. – Т.28. – № 8. – С. 81-86.
19. **Сагитова, Ф.Р.** Особенности ионной обработки волокнистых и тканых форм аморфной двуокиси кремния в условиях ВЧ-разряда при пониженном давлении / **Ф.Р. Сагитова** // Костюмология. – 2025. – Т 10. – №2. – URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/31TLKL225.pdf>.
20. **Сагитова, Ф.Р.** Влияние ионной обработки волокон аморфной двуокиси кремния в условиях высокочастотного разряда пониженного давления на термомеханические свойства композиционных материалов с полиамидной и эпоксидной матрицами / **Ф.Р. Сагитова**, И.Ш. Абдуллин // Костюмология. – 2025. – Т 10. – №3. – URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/01TLKL325.pdf>.
21. Шарифуллин, Ф.С. Повышение адгезионной способности сверхвысокомолекулярных полиэтиленовых волокон посредством модификации потоком низкоэнергетических ионов: экспериментальное подтверждение / **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин // Костюмология. – 2025. – Т 10. – №3. – URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/02TLKL325.pdf>.
22. **Сагитова, Ф.Р.** Улучшение свойств полимерных композиционных материалов для медицинских инструментов за счёт модификации неорганического наполнителя / **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин, Л.А.

Зенитова, И.Ш. Абдуллин // Бутлеровские сообщения. – 2025. – Т.82. – №6. – С.118-127.

Материалы конференций:

23. **Сагитова, Ф.Р.** Исследование струи ВЧ-разрядов в динамическом вакууме / **Ф.Р. Сагитова**, И.Ш. Абдуллин, И.К. Некрасов // Сборник статей XIII Межд. научно – практ. конф. «Современные средства диагностики плазмы и их применение» – М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2022 – С. 69-70.
24. **Сагитова, Ф.Р.** Экспериментальное исследование, подтверждающее возникновение слоя положительного заряда вокруг тела в ВЧ разряде пониженного давления / **Ф.Р. Сагитова**, И.Ш. Абдуллин, И.К. Некрасов // Сборник статей XII Всеросс. конф. по физической электронике – Дагестан: Изд-во ДГУ, 2022 - С. 56-58.
25. Некрасов, И.К. Характер воздействия потока низкоэнергетических ионов на свойства глиноземной керамики / И.К. Некрасов, **Ф.Р. Сагитова**, И.Ш. Абдуллин // Сборник статей V Всеросс. научно – техн. конф. «Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия» – М.: Изд-во ВИАМ, 2022 - С. 118-126.
26. Некрасов, И.К. Особенности взаимодействия ткани на основе СВМПЭ с потоком низкоэнергетических ионов в зависимости от энергии и плотности ионного тока / И.К. Некрасов, И.Ш. Абдуллин, Ф.С. Шарифуллин, **Ф.Р. Сагитова**, Ф.А. Гизатуллина // Сборник трудов III Межд. конф. «Газоразрядная плазма и синтезnanoструктур», Казань: Изд-во Бук, 2022. – С.101-102.
27. Шакиров, Р.И. Модификация углеродных волокон потоком низкоэнергетических ионов / Р.И. Шакиров, **Ф.Р. Сагитова**, Ф.С. Шарифуллин // Материалы Всеросс. (с межд. участием) конф. «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2023), Казань, 2023. – С.295-296.
28. Абдуллин, И.Ш. Применение струйного ВЧЕ разряда в динамическом вакууме для создания композиционного материала на основе СВМПЭ и полиуретановой матрицы / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, **Ф.Р. Сагитова**, И.К. Некрасов // Материалы L Межд. Звенигородской конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, 2023. – С.240.
29. Некрасов, И.К. Модификация химических волокон плазмой высокочастотного разряда / И.К. Некрасов, **Ф.Р. Сагитова**, И.Ш. Абдуллин // Сборник трудов IX Бакеевской Всеросс. с межд. участием школа-конференция для молодых ученых «Макромолекулярные нанообъекты и полимерные композиты», Тула, 2023. – С.156.
30. Абдуллин, И.Ш. Свойства ткани на основе СВМПЭ в зависимости от энергии ионов и плотности ионного тока ВЧЕ разряда / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, И.К. Некрасов, **Ф.Р. Сагитова** // Материалы XV Межд. научно-техн. конф. «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», Казань, 2023. - С.6-8.

31. Сагитова, Ф.Р. Моделирование объёмной обработки волокнистых материалов различной химической природы в ВЧЕ-разряде пониженного давления / Ф.Р. Сагитова, И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, И.К. Некрасов // Сборник трудов IV Межд. конф. «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур», Казань, 2023. – С.60-63.

32. Некрасов, И.К. Математическая модель ВЧ-плазменной модификации сверхвысокомолекулярного полиэтилена при пониженном давлении / И.К. Некрасов, Ф.Р. Сагитова, И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин // Сборник трудов Всеросс. (с межд. участием) конф. «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2023), Казань, 2023. – С.273-274.

33. Желтухин, В.С. Математическое моделирование ВЧ плазменной модификации сверхвысокомолекулярного полиэтилена / В.С. Желтухин, И.Ш. Абдуллин, И.К. Некрасов, Ф.Р. Сагитова // Материалы I Межд. Звенигородская конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, 2023. – С.248.

34. Абдуллин, И.Ш. Высокочастотная плазменная модификация материалов при пониженном давлении / И.Ш. Абдуллин, И.К. Некрасов, Ф.Р. Сагитова // Материалы Всеросс. (с межд. участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2023), Казань, 2023. – С.27.

35. Абдуллин, И.Ш. Применение струйных ВЧ разрядов пониженного давления для модификации изделий / И.Ш. Абдуллин, И.К. Некрасов, Ф.Р. Сагитова // Материалы Всеросс. (с межд. участием) конф. «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2023), Казань, 2023. – С.222-223.

36. Абдуллин, И.Ш. Создание композиционного материала на основе плазмообработанного СВМПЭ и полиуретановой матрицы / И.Ш. Абдуллин, И.К. Некрасов, Ф.Р. Сагитова // Сборник трудов XXIV ежегодной научной конф. отдела полимеров и композиционных материалов «Полимеры», Москва, 2023. – С.59-60.

37. Некрасов, И.К. Плазменная модификация материалов на основе спечённого оксида алюминия / И.К. Некрасов, Ф.Р. Сагитова, И.Ш. Абдуллин // Материалы IV Межд. конф. «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур», Казань, 2023. – С.33-36.

38. Сагитова, Ф.Р. Распределение высокочастотного электромагнитного поля в ВЧ разряде пониженного давления / Ф.Р. Сагитова, И.Ш. Абдуллин, И.К. Некрасов // Сборник статей XIV Межд. науч. – практ. конф «Современные методы диагностики плазмы и их применение». – М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2024 – С. 3-5.

39. Некрасов, И.К. Влияние плазмохимических процессов на физико-механические характеристики неорганических и органических волокнистых наполнителей композиционных материалов / И.К. Некрасов, Ф.Р. Сагитова, Ф.С. Шарифуллин // Материалы X Межд. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTAPC-2024), Иваново, 2024. – С.71.

40. Некрасов, И.К. Исследование межволоконного пространства СВМПЭ волокон / И.К. Некрасов, Ф.Р. Сагитова // Труды VII Школы-

конференции молодых учёных «Прохоровские недели». 22–24 октября 2024 г., Москва. Тезисы докладов. – Москва, 2024. – С.122-123.

41. **Сагитова, Ф.Р.** Влияние углеволокон на физико-механические характеристики композиционного материала / **Ф.Р. Сагитова**, А.В. Кулагин, Ф.С. Шарифуллин // Материалы II Всеросс. конф. с международным участием «Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий», Казань, 2024. – С.344-345.

42. Абдуллин, И.Ш. Высокочастотные разряды пониженного давления в плазмохимических процессах / И.Ш. Абдуллин, **Ф.Р. Сагитова**, С.В. Миронов // Сборник трудов XIII Всеросс. конф. по физической электронике (ФЭ-2024), Дагестан, 2024. – С.176-179.

43. Шарифуллин, Ф.С. Влияние плазменной обработки на свойства ПАН волокон / Ф.С. Шарифуллин, **Ф.Р. Сагитова**, С. Баллыев // Материалы III Всеросс. конф. с международным участием «Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий» (МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ-2025), Казань, 27–28 марта 2025 года. – Казань: Издательство КНИТУ, 2025. – С. 409-413.

44. Abdullin, I.Sh. Simulation of RF Plasma Modification of Fibrous Fillers For Polymer Composites / I.Sh. Abdullin, I.K. Nekrasov, **F.R. Sagitova**, V.S. Zheltukhin // Proceedings of the 17th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications» GDP 2025 (Ekaterinburg, September 8 – 12, 2025): Abstracts. Ekaterinburg: IEP UB RAS, 2025. – P.202.

45. **Sagitova, F.R.** Increasing Adhesive Strength of HFC Plasma-Modified Synthetic Fibers to Polymer Matrix / **F.R. Sagitova**, F.S. Sharifullin, I. Sh. Abdullin, I.K. Nekrasov // Proceedings of the XVII International Russian-Chinese Symposium «Advanced Materials and Process», Yekaterinburg, 2025. – Р. 55-57.

46. **Сагитова, Ф.Р.** Ионно-плазменная модификация покрытия волокон аморфной двуокиси кремния / **Ф.Р. Сагитова**, И.Ш. Абдуллин, М.З. Гараев, Ф.С. Шарифуллин // Сб. статей XVII Международной научно-технической конференции, Казань, 1-4 октября 2025 г. – Казань: Издательство АН РТ, 2025. – С. 104-108.