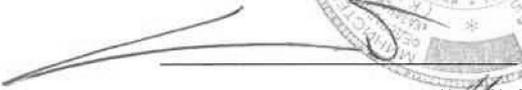


«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по научной  
деятельности и цифровизации  
ФГБОУ ВО «Казанский  
национальный исследовательский  
технический университет им. А. Н.  
Туполева- КАИ»



С.А. Матвеев  
«11» марта 2026 г.

### **Отзыв ведущей организации**

федерального государственного бюджетного образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева- КАИ» на диссертационную работу Сагитовой Фариды Равилевны «Научно-технологические основы создания и регулирования характеристик нового поколения полимерных композиционных материалов, армированных модифицированным потоком низкоэнергетических ионов волокнистыми наполнителями органической и неорганической природы», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

#### **Актуальность темы исследования**

С переходом на качественно новый уровень технологического развития традиционные конструкционные материалы, такие как металлы и их сплавы, всё в большей степени вытесняются композитами на основе волокон, нитей, технического текстиля и тканей. Это обусловлено их высокой удельной прочностью, что позволяет существенно снижать массу изделий и конструкций при сохранении или даже повышении прочностных характеристик. Благодаря этому технические ткани нашли широкое применение в создании полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Технический текстиль прочно занял позиции в различных отраслях: автомобилестроении (сиденья, ремни безопасности, шумо- и виброизоляция,

элементы кузова и интерьера), медицине (ортопедические корсеты, протезы, хирургические имплантаты), производстве средств индивидуальной защиты повышенной опасности (спецодежда для пожарных, металлургов, сварщиков), спортивном инвентаре, промышленных рыболовных сетях, канатах, парусах, судостроении (корпуса яхт, катеров, лёгких судов) и средствах баллистической защиты (бронезилеты, шлемы, бронепанели).

Среди органических волокнообразующих полимеров по объёмам производства лидируют полиэферы, за ними следуют полиамиды, полиолефины и углеродные волокна.

Особое положение занимают неорганические волокна, где более 90 % рынка армированных композитов приходится на аморфную двуокись кремния в волокнистой форме.

Аморфная двуокись кремния в виде волокон (АДКВ) и тканей (АДКТ) обеспечивает стеклопластикам и мембранным фильтрам жёсткость и прочность.

Однако, главным ограничивающим фактором остаётся слабая адгезия на границе «полимерная матрица – армирующий наполнитель». Недостаточное межфазное сцепление приводит к расслоению, образованию трещин и быстрой деградации эксплуатационных свойств композита. При этом конечные характеристики материала определяются не только свойствами матрицы и наполнителя по отдельности, но в первую очередь качеством межфазного взаимодействия.

Для повышения адгезии, улучшения пропитки и достижения максимально возможной объёмной доли наполнителя применяют различные методы модификации поверхности волокон и тканей. Современные производства органических и неорганических волокнистых материалов испытывают возрастающую потребность в повышении физико-механических показателей, снижении обрывности при переработке и улучшении ценовой конкурентоспособности. Большинство волокон и тканей характеризуются гидрофобной поверхностью, что существенно затрудняет смачивание и пропитку полимерными матрицами. Поэтому актуальна активация поверхности армирующих материалов с целью повышения капиллярности и смачиваемости.

Традиционные химические и физические методы модификации (аппретирование, травление, нанесение силановых покрытий и другие) часто усложняют технологическую цепочку, увеличивают расход реагентов и создают значительные экологические риски при многотоннажном производстве. Нередко улучшение одних свойств сопровождается ухудшением других.

В этих условиях всё большее внимание привлекают технологии низкотемпературной плазмы газовых разрядов различных типов (тлеющий,

высокочастотный, СВЧ, барьерный, коронный и другие). Плазменная обработка позволяет целенаправленно изменять морфологию поверхности волокнистых материалов, повышать смачиваемость, капиллярность и адгезию к полимерам без существенного изменения объёмных свойств.

Общим недостатком большинства плазменных методов является нестабильность модифицирующего эффекта во времени: по различным данным, он снижается до 40 % уже в течение 30 дней. Кроме того, сохраняется проблема деструктивных процессов в текстильных материалах, затрудняющих комплексное улучшение свойств.

Множество технологических операций в текстильной, лёгкой промышленности и смежных отраслях направлены на целенаправленное изменение поверхностных свойств волокон и нитей, повышение их физико-механических характеристик без ущерба для остальных параметров. Всё чаще для модификации синтетических волокнистых материалов используют высокочастотные (ВЧ) разряды.

В этой связи актуальным является разработка новых полимерных композиционных материалов с армирующими наполнителями, модифицированными потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых в плазме ВЧЕ-разряда пониженного давления с продувом газа.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Разработаны научно-технические основы создания полимерных композиционных материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками и оптимальным соотношением матрицы и армирующего наполнителя на основе органических и неорганических волокнистых материалов. Улучшение достигнуто за счёт модификации поверхности и объёма армирующих элементов потоком низкоэнергетических ионов (70–100 эВ), генерируемых в плазме высокочастотного ёмкостного (ВЧЕ) разряда пониженного давления с продувом газа.

2. Установлен единый механизм плазменной модификации волокнистых материалов независимо от их химической и физической природы. Механизм заключается в комбинированном воздействии:

- на поверхность направленным потоком низкоэнергетических ионов (70–100 эВ), генерируемых в плазме ВЧЕ-разряда пониженного давления с газовой продувкой;

- в объёме волокнистой структуры за счёт процессов рекомбинации заряженных частиц в несамостоятельных микроразрядах, возникающих в порах, капиллярах и межволоконных пространствах.

3. Реализована объёмная плазменная модификация волокнистых материалов, позволившая оптимизировать массовое соотношение матрицы и армирующего наполнителя в ПКМ. Достигнута минимальная удельная

плотность композита при одновременном максимальном повышении прочностных характеристик за счёт:

- существенного роста адгезионной прочности (АП) волокнистого наполнителя к полимерным матрицам;

- улучшения физических и механических свойств;

- сохранения стабильности модифицированного состояния во времени.

4. Установлено, что для эффективной плазменной модификации волокнистых материалов как органической и неорганической природы могут использоваться одни и те же плазмообразующие газы — преимущественно аргон и воздух. При этом наблюдается значительное увеличение прочности адгезионного соединения:

- для синтетических волокон с эпоксидными и полиуретановыми матрицами;

- для неорганических материалов — с эпоксидными и полиамидными матрицами.

Во всех случаях зафиксировано повышение температуры начала термодеструкции исследуемых волокнистых материалов не менее чем на 40 %.

5. Показано, что модификация потоком низкоэнергетических ионов из плазмы ВЧЕ-разряда пониженного давления с газовой продувкой приводит к увеличению смачиваемости органических и неорганических волокнистых материалов не менее чем на 70 % и росту удельной поверхности более чем на 4,4 %. В результате:

- межслоевая сдвиговая прочность и предел прочности при изгибе ПКМ на основе СВМПЭ возрастают не менее чем в 2 раза;

- для углеродных волокон — до 30 %;

- характер разрушения композита становится когезионным (разрушение происходит по объёму матрицы или волокна, а не по границе раздела фаз).

6. Установлено, что дополнительная (повторная) плазменная обработка торцевых участков готовых армирующих элементов непосредственно перед пропиткой матрицей существенно повышает прочностные характеристики конечного ПКМ. Такая обработка затрагивает торцевые зоны, которые при первичной объёмной плазменной модификации подвергались лишь частичному воздействию. В результате прочность композита возрастает дополнительно на 20 % по сравнению с образцами, подвергнутыми только первичной плазменной обработке.

7. Разработаны экологически безопасные и высокоэффективные методы, а также технологические схемы получения лёгких высокопрочных полимерных композиционных материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками. Методы основаны на модификации синтетических и неорганических волокнистых наполнителей потоком

низкоэнергетических ионов, генерируемых в плазме ВЧЕ-разряда пониженного давления с продувом газа. Полученные материалы перспективны для применения в медицинских изделиях, конструкционных панелях, элементах автомобильной техники и других ответственных изделиях.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы**

Разработаны полимерные композиционные материалы с армирующими наполнителями, модифицированными потоком низкоэнергетических ионов, с улучшенными характеристиками и оптимальным соотношением «полимерная матрица – наполнитель», позволяющие создать облегченные высокопрочные изделия медицинской промышленности и автомобильной техники.

Значимость диссертационной работы заключается в том, что:

1. Определены оптимальные режимы обработки материалов потоком низкоэнергетических ионов (ПНЭИ):

1.1. Высокопрочных органических волокон и тканей на их основе. Лучшие результаты достигаются при энергии ионов 77,5 эВ, плотности ионного тока 0,83 А/м<sup>2</sup>, мощности разряда 1,8 кВт, при этом для СВМПЭ-материалов достаточно 3 минуты обработки при давлении в вакуумной камере 26,6 Па и расходе плазмообразующего газа (аргона) 0,04 г/с; для углеродных волокон требуется более длительное воздействие (20 минут), давление в вакуумной камере 50 Па и расход плазмообразующего газа (воздуха) 0,04 г/с.

1.2. Для неорганических волокон и тканей на основе аморфной двуокиси кремния (АДКВ и АДКТ) также демонстрируют отклик на ионную модификацию при энергии ионов 75-80 эВ, плотности ионного тока 0,83-0,835 А/м<sup>2</sup>, давлении в вакуумной камере 26,6 Па:

1.2.1 АДКВ — мощность разряда 2,15 кВт, время обработки 2,5 минуты, расход плазмообразующего газа (аргона) 0,04 г/с;

1.2.2. АДКТ — мощность разряда 1,45 кВт, время обработки 6 минут, расход плазмообразующего газа (смесь аргона с воздухом (70/30)) 0,04 г/с

2. Модификация ПНЭИ существенно улучшает морфологию и функциональные свойства поверхности волокон:

- у СВМПЭ развивается микрорельеф (прирост удельной поверхности до 4,4 %);
- у углеродных волокон разных марок прирост удельной поверхности составляет от 19,5 % до 124 %;
- у АДКВ поверхность увеличивается на 16,5 %, у АДКТ – на 7 %.

Одновременно улучшается смачиваемость:

- углеродные волокна — на 70 %, угол смачивания снижается до 40°;
- СВМПЭ-ткани приобретают сильную гидрофильность (капля воды мгновенно впитывается, угол смачивания измерить невозможно);
- АДКТ — на 70 %.

3. Механические характеристики самих волокон меняются по-разному: углеродные — рост прочности на разрыв до 20 %, СВМПЭ — прочность почти не меняется, зато сильно расширяется область упругой деформации и заметно повышается термостойкость, АДКВ — прочность вырастает в 2 раза, АДКТ — на 27 %.

На основе модифицированных таким способом наполнителей созданы композиционные материалы с существенно улучшенными характеристиками:

- композиты на СВМПЭ-тканях показывают двукратный рост прочности при изгибе  $\sigma_{изгиб}$  и межслоевом сдвиге  $\sigma_{сдвиг}$ , ударная вязкость  $G_H$  достигает 90 Дж;
- углеродные композиты — прирост прочности на изгиб  $\sigma_{изгиб}$  и сдвиговой прочности  $\sigma_{сдвиг}$  до 30 %, относительное удлинение при растяжении  $\square_p$  до 15 %, модуль упругости  $E$  до 16÷20 % в зависимости от вида нагружения;
- материалы с полиамидной матрицей и наполнителем из АДКВ/АДКТ после ионной активации демонстрируют рост прочности на растяжение  $\Delta\sigma$  на 25–40 %, а ударная вязкость  $G_H$  увеличивается до 75 %.

4. Особенно важный эффект наблюдается при удалении замасливателей и аппретов с поверхности волокон — ионный поток позволяет одновременно очищать поверхность и обрабатывать торцевые участки волокон, что в обычной технологии практически невозможно. Именно необработанные торцы чаще всего становятся очагами разрушения композита.

5. Разработаны технологические рекомендации, позволяющие получать композиционные материалы с оптимальным соотношением матрица/наполнитель и целенаправленно регулируемые свойствами.

Результаты работы внедрены на двух предприятиях (ООО «ПТО «Медтехника»», г. Казань и ООО «Ирис-НН», г. Нижний Новгород). Годовой экономический эффект от внедрения составил 8,49 млн рублей.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

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.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и определены задачи для их реализации, подчеркнута научная новизна, раскрыта теоретическая и практическая значимость результатов исследования, обозначены ключевые положения, выносимые на защиту, а также представлена структура диссертации.

*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 Umateх UMT 42 (ООО «Алабуга-Волокно») и волокно НТА40 (Тоhо 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 (Тоray) 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 органических волокон: СВМПЭ волокон и УВ, а также тканей на их основе.

Исследована устойчивость эффектов ВЧЕ плазменной обработки объектов исследований и представлена оценка механизмов их модификации.

В качестве варьируемых параметров ПНЭИ выбраны: мощность разряда  $W_p$ ; время обработки  $t$ ; давление в рабочей камере  $P$ ; расход плазмообразующего газа  $G$ . В качестве плазмообразующих газов использовали аргон, воздух, смесей аргона с азотом и пропан/бутаном.

Установлено значительное увеличение площади удельной поверхности  $S_{уд}$ . Это позволяет увеличить межфазное взаимодействие между полимерной матрицей и армирующими наполнителями.

Установлено, что в плазменной среде происходит существенное повышение смачиваемости  $h_{см}$  и изменение капиллярности  $h_k$ . Определено

значительное снижение угла смачивания ( $\theta^\circ$ ), вплоть до практически полного смачивания.

Устойчивость эффекта ВЧЕ плазменной обработки является ключевым фактором при разработке технологий. При модификации СВМПЭ эффект сохраняется до 5 лет. При модификации УВ эффект сохраняется до 90 дней.

Исследованы механические характеристики. У СВМПЭ волокон величина относительного удлинения при растяжении  $\mathcal{E}_p$  изменяется от 3 до 37%, поэтому представлена средняя величина  $\mathcal{E}_p = 21\%$ . У УВ обработка ПНЭИ в наилучших режимах разрывную нагрузку  $E_F$  не ухудшает.

По результатам ИК-спектроскопии для СВМПЭ волокон, модифицированных ПНЭИ, наблюдаются полосы поглощения, характерные для гидроксильных, карбонильных и карбоксильных групп. Увеличение количества данных групп приводит к увеличению гидрофильности и, как следствие, повышение адгезионной прочности армирующего наполнителя с полимерной матрицей. Воздействие ПНЭИ на УВ позволило установить возникновение полос колебания в спектре, что связано с появлением функциональных групп  $-C-OH$  и  $-C=O$ .

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

Влияние воздействия ПНЭИ на полимерный композит с армирующим из УВ исследовались по изменению предела прочности на разрыв  $\sigma_p$ . Установлено повышение данного параметра от 15,0% до 18,4%.

Повышение межфазного взаимодействия между армирующим наполнителем из СВМПЭ материала и полимерной матрицей (ПМ) улучшает такие механические характеристики КМ как прочность на изгиб  $\sigma_{изгиб}$  в 3 раза, межслоевую прочность  $\sigma_{межсл}$  в 2,7 раза. Созданы высокопрочные и облегченные КМ с СВМПЭ тканью с оптимальным соотношением полимерная матрица – армирующий наполнитель (50%/50%) при плотности  $\leq 1,1$  г/см<sup>3</sup>.

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, который позволил проанализировать изменение размеров или объема образца в зависимости от температуры и механических нагрузок.

Таким образом, созданы уникальные с улучшенными характеристиками КМ с оптимальным соотношением «полимерная матрица – армирующий наполнитель» за счет воздействия ПНЭИ на армирующий материал, позволяющий существенно повысить межфазное взаимодействие между армирующим и ПМ, что приводит к резкому увеличению прочностных характеристик.

**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, АДКТ и создание КМ на их основе.

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

Показано увеличение  $S_{y\partial}$  на 16,5%, что позволяет проводить более эффективное диффундирование ПМ в АДКВ. Это является одной из основных составляющих регулирования оптимального соотношения полимерная матрица – армирующий наполнитель в КМ.

Исследование характеристик ПКМ показали, что по своим прочностным показателям они не уступают металлическим материалам. При этом наилучшим соотношением полимерная матрица – армирующий наполнитель является 20%/80%. При этом температура, при которой наблюдается плавление КМ, возрастает до 339,6 °С после воздействия ПНЭИ на армирующий наполнитель, то есть в 1,4 раза.

После воздействия ПНЭИ усилие растяжения при разрыве  $F_{max}$  становится на 27% больше, а относительное удлинение при растяжении  $\varepsilon_p$  увеличивается на 3,7%. Исследование прочностных характеристик КМ с АДКТ показало, что температура плавления КМ увеличилась на 9%, предел прочности при разрыве на 24%, а КГ увеличилась на 92%.

**В пятой главе** представлены результаты разработки математических моделей процессов модификации органических и неорганических волокон в плазме ВЧЕ разряда пониженного давления методами молекулярной динамики и Монте-Карло. Разработаны теоретические основы процессов модификации волокнистых материалов ВЧЕ и ВЧИ разрядами 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 бомбардировке ионами плазмообразующего газа поверхностного слоя волокнистых материалов. Плазмохимические процессы в объеме материала позволяют усиливать гидрофильность поверхности за счёт возникновения несамостоятельных разрядов.

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

радиусом  $r$ . Численное моделирование показало, что обработка СВМПЭ-волокон ПНЭИ приводит к разрыву межмолекулярных и межатомных связей, имплантации низкоэнергетических ионов на глубину до 2,8 нм.

Построены модели воздействия ПНЭИ на основные компоненты замасливателей для АДКВ, АДКТ и УВ. Результаты расчетов показали, что после обработки ПНЭИ молекулярно-массовое распределение компонентов замасливателя изменяется. Число «коротких» молекул увеличивается за счет того, что происходит разрыв связей в результате ПНЭИ в зависимости от  $t_b$ ,  $W_i$  и  $j_i$ . Таким образом, моделирование показало, что обработка УВ и АДКВ/АДКТ с помощью ПНЭИ позволяет удалить значительную часть замасливателя.

*В шестой главе* представлены разработанные положения научно-технологических основ создания ПКМ с уникальными регулируемые 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 с оптимальным соотношением полимерная матрица – армирующий наполнитель.

Подобран наилучший режим воздействия ПНЭИ на СВМПЭ-ткань:  $W_p = 1,8$  кВт,  $P = 26,6$  Па,  $G_{Ar} = 0,04$  г/с,  $t = 180$  с, приводящий к максимальному межфазному взаимодействию с ПМ и достижению наивысших прочностных характеристик при содержании ПМ 50% в ПКМ. В опытно-промышленной партии полученных ПКМ достигнуто повышение предела прочности на изгиб  $\sigma_{изгиб}$  и сдвиговой прочности  $\sigma_{сдвиг}$  в 2,5 и 3,2 раза соответственно. Данный метод получения ПКМ является в настоящее время единственным для создания ПКМ с СВМПЭ тканями.

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

Для отработки технологии воздействия ПНЭИ на АДКВ использован режим:  $W_p = 2,15$  кВт,  $t = 2,5$  мин,  $G_{ar} = 0,04$  г/с,  $P = 26,6$  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 мембраны КМ.

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

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

### **Степень достоверности и обоснованности результатов исследования, научных положений, выводов**

Достоверность, обоснованность полученных результатов и сделанных выводов подтверждена использованием передовых исследовательских подходов, сочетающих стандартные и специализированные методики оценки параметров и свойств полимерных композиционных материалов. Надежность обеспечивается взаимной корреляцией данных, а также их количественным и качественным сопоставлением с теоретическими и эмпирическими результатами, представленными в работах других ученых.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад 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 композиционных материалов, а также создания полимерных композиционных материалов с улучшенными физическими и механическими характеристиками и оптимальным содержанием процента матрицы. Представленные в диссертации результаты являются личными исследованиями автора и его научных трудов, опубликованных в соавторстве.

### **Публикации и апробация работы**

Основное содержание работы отражено в 46 научных публикациях, в том числе в 12 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК РФ, в 5 публикациях 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.

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.

## **Рекомендации по использованию результатов исследования**

Разработанные автором научно-технологические основы регулирования характеристик армирующего технического текстиля из органических и неорганических волокон за счет воздействия ПНЭИ могут быть применены при создании полимерных композиционных материалов с улучшенными физическими и механическими характеристиками.

Применение технологии с использованием обработки ПНЭИ сокращает длительность технологического процесса получения модифицированных армирующих материалов органического и неорганического происхождения.

## **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа Сагитовой Фариды Равиловны соответствует паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение: п.1 - Разработка новых металлических, неметаллических, гетерогенных и композиционных материалов, в том числе капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, медицинской, легкой, текстильной, строительной областей промышленности); п.2 - Установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих в гетерогенных и композиционных структурах; п. 4 – Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых металлических, неметаллических и композиционных материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, биомедицинскими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой; п.5 - Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды; п.15 - разработка процессов получения новых металлических, неметаллических и композиционных материалов биомедицинского назначения, установление закономерностей влияния состава, структуры, технологии получения, а также эксплуатационных и других факторов на свойства биомедицинских изделий.

### **Замечания по диссертационной работе:**

1. В чем заключается принципиальное отличие предложенного метода модификации волокнистых наполнителей потоком низкоэнергетических ионов по сравнению с другими плазменными технологиями?

2. Каковы критерии оптимизации режимов плазменной модификации (мощность, время, давление, расход газа)? Имеются ли статистические анализы погрешностей для всех экспериментальных данных?

3. В работе учитывается объемная обработка в порах и межфиламентных пространствах. Какие экспериментальные методы использованы для подтверждения наличия несамостоятельных разрядов в этих областях?

4. На рисунке 3.13 на странице 130 представлены ИК спектры. Объясните, почему такой большой сдвиг сигнала обработанных образцов от исходных?

5. Таблица 4.10, страница 184. С чем связано такое сильное увеличение предела температуры разрушения полимерного композиционного материала (ПКМ) у опытных образцов? Можно было бы в дополнительном столбце указать процент изменения.

6. Рисунки 3.23 и 3.26 на страницах 151 и 152 соответственно. Почему при содержании матрицы 70% происходит достаточно резкое снижение термомеханических характеристик образцов?

7. Какой основной механизм при воздействии ПНЭИ является преобладающим для повышения предела межслоевой прочности ПКМ с использованием в качестве армирующих элементов углеродной ткани?

Указанные замечания не снижают ценности проведенных исследований, значимости представленных результатов и общей положительной оценки диссертационной работы Сагитовой Ф.Р.

### **Заключение по работе**

Работа построена логична и структурировано. Работа выполнена в большом объеме и представляет собой научно проанализированный труд, включающий экспериментальные разработки и технологические перспективы для промышленных производств.

Результаты исследований Сагитовой Ф.Р. обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью. Автореферат соответствует диссертационной работе и полностью отражает содержание диссертации. Полученные автором результаты исследования отвечают поставленным целям и задачам, работа содержит обоснованное заключение.

Диссертационная работа Сагитовой Фариды Равилевны «Научно-технологические основы создания и регулирования характеристик нового поколения полимерных композиционных материалов, армированных модифицированным потоком низкоэнергетических ионов волокнистыми

наполнителями органической и неорганической природы», соответствует п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции). Автор работы, Сагитова Фарида Равиловна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Диссертационная работа обсуждена и одобрена на заседании кафедры технической физики ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» (протокол № 8 от «25» февраля 2026 года).

Заведующий кафедрой  
технической физики  
ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,  
доктор технических наук, доцент

Алмаз Фивзатович  
Гайсин



25.02.2026г.

Гайсин Алмаз Фивзатович, доктор технических наук (01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы), доцент, заведующий кафедрой технической физики, ФГБОУ «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ», телефон +7(927)418-75-57, e-mail: almaz87@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ», 420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д.10. Телефон: +7 (843) 238-91-69, pnr@kai.ru, <https://kai.ru>

Подпись Гайсин А. Ф.  
заверяю. Начальник управления  
делопроизводства и контроля



Исход. № 05-8853  
«25» 03 2026 г.  
ПОДПИСЬ

