

*На правах рукописи*



**Суворов Иван Александрович**

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ТЕКСТИЛЬНОГО  
КОМПОЗИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ  
КОЛЕБАНИЙ**

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой  
промышленности

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВО «ИВГПУ») на кафедре мехатроники и радиоэлектроники Института текстильной индустрии и моды.

**Научный руководитель:** **Калинин Евгений Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Центр компетенций текстильной и легкой промышленности» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

**Официальные оппоненты:** **Киселев Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химических технологий им. проф. А.А. Хархарова ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», г. Санкт-Петербург

**Никифоров Александр Леонидович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры пожарной безопасности объектов защиты, ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», г. Иваново

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет» (КГУ), г. Кострома

Защита диссертации состоится «24» октября 2024 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета 24.2.300.02 на базе ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 21, ауд. ГШ-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет»: <https://ivgpi.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.2.300.02 доктор технических наук, профессор



Е.Н. Никифорова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность настоящей работы** обусловлена необходимостью совершенствования методов синтеза объектов из полимерных композитных материалов (ПКМ) как одной из наиболее перспективных областей научных исследований, а прогнозирование функциональных параметров ПКМ на этапе проектирования является приоритетной задачей при разработке их производственного технологического процесса.

ПКМ представляют собой многокомпонентные структуры, состоящие, как правило, из матрицы, армированной наполнителями. ПКМ являются основой для создания изделий с высокими физико-механическими свойствами, что определяет их востребованность во многих отраслях промышленного производства. Многие композиты превосходят традиционные конструкционные материалы и сплавы по своим конструктивным функциональным параметрам.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросы совершенствования методов синтеза объектов из ПКМ в настоящее время недостаточно подробно представлены в научной литературе. Анализ научных публикаций свидетельствует о большом количестве работ, посвященных методам математического моделирования ПКМ (Ломов С.В., Голубков Д.В., Киселев М.В., Севостьянов П.А.) и воздействию ультразвуковых колебаний на процесс интенсификации пропитки текстильных материалов (Розенберг Л.Д., Зельдович Я.Б., Альтер-Песоцкий Ф.Л.).

**Цель работы** заключалась в научном обосновании и создании высокоэффективной системы интенсификации процесса пропитки капиллярно-пористой волокнистой полимерной армирующей структуры вязким связующим с использованием ультразвуковых колебаний при синтезе композитного материала.

Для достижения обозначенной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- реализовать процедуры численного анализа имитационной блочной модели гидродинамики процесса фильтрации жидкого рабочего раствора - матрицы через капиллярно-пористую армирующую структуру как через проницаемую перегородку;
- определить возможности системного подхода в решении задачи анализа технологических параметров процесса инфузии-импрегнирования в системе, определяющей условия синтеза структуры и заданных функциональных и конструкционных параметров композитного материала как системы;
- выявить направления развития технологии синтеза композитного материала из волокнистых капиллярно-пористых армирующих структур методами проектно-ориентированного моделирования в интегрированной САД-системе;
- разработать программный комплекс твердотельного моделирования волокнистых капиллярно-пористых армирующих структур с возможностью синтеза 3D-модели текстильного композита методами численного объектно-ориентированного моделирования и обеспечивающий анализ параметров, определяющих направленность волокон в реальных структурах технического назначения;
- обеспечить средствами разработанного в рамках исследования программного комплекса оценку плотности распределения волокон в плоских нетканых структурах – армирующих компонентах, вновь синтезируемого композитного материала по их цифровому изображению методом бинарной пороговой сегментации;
- установить влияние воздействия ультразвуковых колебаний на кинетику процесса инфузии-импрегнирования при синтезе структуры полимерного композитного материала;

- разработать методические основы синтеза системы импрегнирования при динамическом внешнем влиянии на армирующую волокнистую капиллярно-пористую структуру на примере использования ультразвукового воздействия.

#### **Научная новизна диссертационного исследования.**

Научная новизна диссертационного исследования заключается в развитии научных основ интенсифицированного процесса пропитки наполнителя вязкой связующей в условиях ультразвукового воздействия и проектировании модели армирующей составляющей композита созданными средствами проектно-ориентированного моделирования.

При этом впервые получены следующие научные результаты:

- определена возможность системного подхода в решении задачи анализа технологических параметров процесса пропитки в системе, определяющей условия синтеза структуры и заданных функциональных и конструктивных параметров композитного материала;

- разработана методика и реализован численный анализ имитационной блочной модели гидродинамики процесса фильтрации рабочего раствора - матрицы через волокнистую капиллярно-пористую армирующую структуру как проницаемую перегородку;

- определены направления развития технологии синтеза композитных материалов из волокнистых капиллярно-пористых структур методами проектно-ориентированного моделирования в интегрированных CAD-системах;

- разработан программный комплекс твердотельного моделирования волокнистых капиллярно-пористых армирующих структур с возможностью синтеза 3D-модели текстильного композита методами численного объектно-ориентированного моделирования обеспечивающий анализ параметров, определяющих направленность волокон в реальных нетканых структурах технического назначения. Решена задача численного моделирования элементарной ячейки волокнистой армирующей структуры. На основе полученных моделей разработана база данных с основными видами типоразмеров элементарных ячеек с заданной геометрией армирующей структуры;

- средствами разработанного в рамках исследования программного комплекса выполнена оценка плотности распределения волокон в плоских нетканых структурах – армирующих компонентах вновь синтезируемого композитного материала, по их цифровому изображению методом бинарной пороговой сегментации;

- установлено влияние воздействия ультразвуковых колебаний на кинетику процесса пропитки при синтезе структуры полимерного композитного материала;

#### **Теоретическая значимость работы состоит:**

- в развитии научных основ методологии прогнозирования кинетических параметров вновь синтезируемых полимерных волокнистых композитных систем;

- в разработке технологических аспектов прогнозирования кинетических характеристик волокнистого композитного материала методами структурно-параметрического моделирования на основе методов дискретной математики.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что решена задача по созданию и реализации алгоритмического программного комплекса на основе методологии численного объектно-ориентированного моделирования на примере формирования блока глобальных управляющих переменных с возможностью системной интеграции внешних приложений и позволяющей организовать итерационные взаимодействия действующих твердотельных 3D-моделей с

вычислительными системами и повышающих эффективность вычислительных систем на 20%.

Рекомендовано использовать результаты работы в преподавании учебной дисциплины «Проектирование изделий из полимерных композитов различного функционального назначения» (Конечно-элементное моделирование, Вычислительные эксперименты, Гидродинамическое моделирование). Направления подготовки 15.03.06 - Мехатроника и робототехника; 22.03.01 – Материаловедение и технологии материалов; 18.02.13 – Технология производства изделий из полимерных композитов.

**Объектом исследования** являются полимерные волокнистые армирующие структуры, полученные на основе целлюлозных волокон, а также углеродных волокон с заданной различной поверхностной плотностью и исследование их структурных характеристик.

**Предмет исследования:** численные модели, алгоритмы, методы синтеза и анализа систем из армирующих структур полимерных волокнистых композитных материалов.

**Методы и средства исследования.** При решении поставленных задач использованы средства и методы твердотельного моделирования армирующих структур полимерных волокнистых композитных материалов в пространственной области; метод субпиксельной обработки изображений поверхности волокнистого композитного материала; методы линейного программирования; теории алгоритмов; математической статистики и матричной математики.

**Соответствие паспорту специальности.** Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует научной специальности 2.6.16. «Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности» по направлениям исследований: п.2 проектирование структуры и прогнозирование показателей свойств и качества волокон, нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности;

п.7 цифровое прогнозирование, математические методы, информационные технологии моделирования технологических процессов первичной обработки сырья, организации производства и изготовления волокон, нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности.

**Личный вклад автора.** На всех этапах выполнения работы автор под руководством научного руководителя принимал личное участие в разработке стратегии исследований, формулировании и выполнении экспериментов, обсуждении полученных результатов, формулировании и проверке гипотез и выводов, подготовке материалов для публикаций совместно с соавторами. Постановка цели и задач, выбор методов теоретического и экспериментальных исследований, обобщение полученных результатов выполнены при участии научного руководителя. Доля соискателя в опубликованных с соавторами работах по теме диссертации составляет от 33 до 72 %.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Программный вычислительный алгоритмический комплекс, разработанный на основе интеграции систем инженерных научных расчетов на основе языка программирования сверхвысокого уровня и системы твердотельного моделирования с использованием адекватных математических моделей, воспроизводящих свойства и характеристики трёхмерных структур ПКМ на волокнистой основе, обеспечивающий функционирование и получение достоверного результата выходных параметров при заданных входных характеристиках исследуемого наполнителя ПКМ.

2. Методику и средства (устройство) интенсификации процесса инфузии-импрегнирования полимерных волокнистых композитных материалов.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, достигнута в результате:

- корректного использования адекватных численных моделей, воспроизводящих процессы взаимодействия и явления, изученные в настоящей работе;
- использования методов идентификации и верификации результатов анализа численных моделей, используемых при исследовании сложных технических систем.

**Апробация и публикации.** Материалы диссертации докладывались на Межвузовских научных конференциях аспирантов и студентов Поиск-2019, Поиск-2020, Поиск-2021, Поиск-2022, Международном научно-практическом форуме SMARTEX-2019, Международном научно-практическом форуме SMARTEX-2020, Международном научно-практическом форуме SMARTEX-2021.

По материалам диссертации опубликовано 5 статей в научном периодическом журнале из перечня ВАК, 2 статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях, 10 тезисов докладов в сборниках материалов международных научных конференций включая 5 статей в сборниках международных научно-практических форумов из перечня РИНЦ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, включающего 53 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 231 наименования и 4 приложения.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору исследований в области структурных особенностей конструкционных и функциональных композитных материалов и методам их получения.

Полимерный композитный материал представляет собой структуру, объединяющую в своем составе два или более компонентов различных по своей природе и обеспечивающих получение материала, обладающего комплексом физико-химических и механических свойств, отличающихся от свойств веществ его составляющих.

Компонента, образующая непрерывную среду во всем объеме композитного материала, называется матрицей, а компоненты, объединенные матрицей, являются армирующими или функциональными наполнителями. Рассмотрены различные варианты классификации композитных материалов. Среди наиболее часто встречающихся следует отметить варианты классификации по материалу матрицы и армирующих компонентов. Наибольшее внимание в обзоре уделено композитным материалам с матрицей из полимеров и тканым двумерно- и пространственно-армирующим структурам, а также системам с однонаправленным коротким волокном.

Многослойные армирующие наполнители позволяют получать полимерные композитные материалы любой заданной толщины без потери прочностных показателей, по сравнению со сборкой из однослойных ПКМ. При этом, полотняное переплетение, на котором основаны многослойные тканые армирующие структуры, позволяет наиболее эффективно осуществлять их пропитку полимерной композитной матрицей.

Рассмотрены различные технологические варианты получения композитных материалов и оценена их эффективность, а также возможность реализации непрерывных способов производства ПКМ.

**Во второй главе** представлены результаты анализа численной модели армирующей структуры ПКМ, полученной на основе геометрии строения однослойной ткани; проведено обоснование выбора средств программного обеспечения и методов компьютерного моделирования для решения задач процесса импрегнирования в синтезе капиллярно-пористой структуры (КПС) полимерного композитного материала. Выполнен синтез имитационной блочной модели гидродинамического процесса фильтрации рабочего раствора - матрицы через армирующую структуру (АС) как через пористую проницаемую перегородку.

Проведен численный анализ процесса массопередачи в системе обработки КПС волокнистого материала в пропиточной ванне. С целью численного анализа степени пропитки, характеризующего процесс массопереноса в процессе инфузии, выполнен ряд модельных экспериментов. Полученные результаты моделирования процесса пропитки углеродной структуры полимерной матрицы дают возможность использовать разработанную трехмерную параметрическую модель тканой структуры в широком спектре задач моделирования и проектирования изделий из ПКМ. Для математического описания моделируемой тканой армирующей структуры полимерного композита на данном этапе была применена параметрическая модель с линзовидным поперечным сечением нити, т.к. данный тип модели имеет более точное математическое описание и соответствие геометрическому представлению реальной тканой структуры. Через приведенные уравнения можно получить математическое описание и для других видов моделей полотняного переплетения, армирующих структур ПКМ.

Определены ключевые структурные этапы, являющиеся основой для реализации вычислительных процессов, обеспечивающих процедуры обработки заданных значений основных параметров нитей и трансляцию результатов предварительных вычислений во внешнюю базу данных.

Имитационная блочная модель (рис. 1), состоящая из ключевых пиктограмм блоков переменных и пиктограмм блоков выполняемых математических операций осуществляющая решение системы уравнений выполняет обработку заданных параметров и вычисление основных параметров нитей для параметрической 3D-моделей двумерной элементарной ячейки тканой структуры.

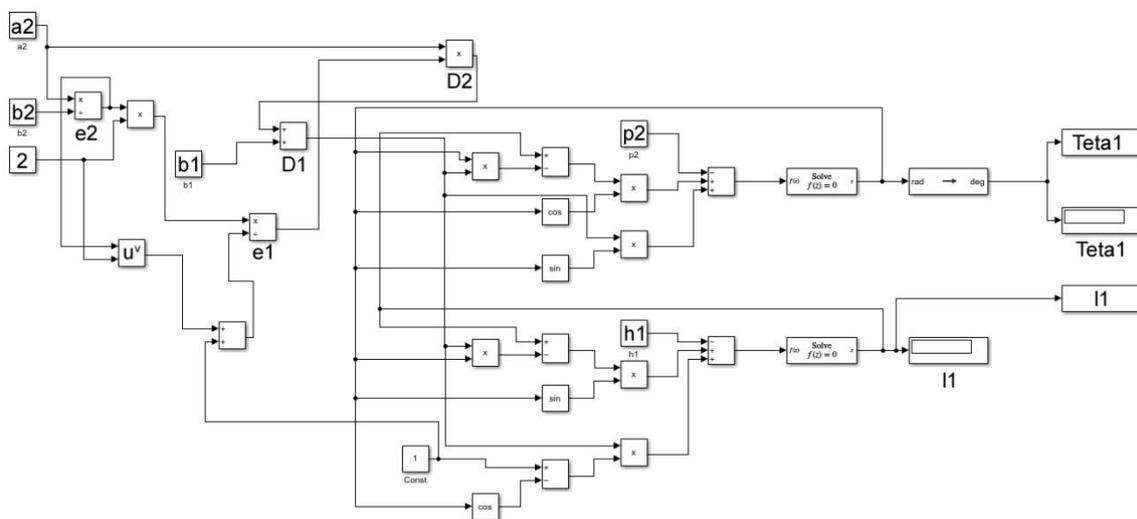


Рис. 1. Имитационная блочная модель Simulink, где индекс 1 соответствует нити основы, 2 нити утка

Для топологической оптимизации геометрических параметров моделей, таких как длина нити, радиусы окружностей и др., использовались глобальные управляющие переменные, объединяющие заданные размеры модели через математические уравнения. Глобальные переменные используются для управления уравнениями и измерениями, располагая свойством двунаправленности, чем обеспечивается взаимосвязь между определённой глобальной переменной и величинами соответствующих переменных.

Оценивая в целом различные варианты подходов к математическому описанию строения армирующей компоненты полимерного композитного материала, можно отметить, что большая часть из них основывается на разработке новых видов программного обеспечения независимо от того является наполнитель одно- или многослойным.

Развитие технологии синтеза системы композитного материала из капиллярно-пористых структур методами проектно-ориентированного моделирования в интегрированных САД-системах в совокупности с высокоуровневыми вычислительными системами на примере взаимодействия системы твёрдотельного моделирования Solidworks, системы MatLab и метода проектно-ориентированного моделирования в разработанном программном комплексе «Программа для геометрической оптимизации деталей из полимерных композиционных материалов» (Свидетельство. №2022661735) реализована возможность синтеза 3D-модели АС текстильного композита с обеспечением анализа параметров, определяющих направленность волокон в реальных нетканых структурах технического назначения. Решена задача численного моделирования элементарной ячейки волокнистой армирующей структуры. На основе полученных моделей разработана база данных с основными видами типоразмеров элементарных ячеек с заданной геометрией армирующей структуры.

**В третьей главе** рассмотрены методы компьютерного моделирования системы однонаправленных коротких волокон. Для обеспечения достоверности результатов моделирования в рамках алгоритмизации при исследовании использован метод бинаризации цифрового образа нетканой плоской структуры и полноты полученных данных, характеризующих закономерность распределения волокон, подтверждающий эффективность разработанного в рамках исследования программного комплекса - «Система для анализа качества текстильной поверхности волокноно-композитного слоя и определения её неравномерности в нетканых плоских структурах» (Свидетельство №2023610194).

В случае однонаправленных коротких волокон, бинарное изображение нетканой структуры рассматривается как матрица точек со значениями 0 и 1, где элементы матрицы со значением 1 (белые пиксели изображения) определяют линии волокон. Таким образом, разрешение изображения – количество пикселей по горизонтали и вертикали ( $w \times h$ ) – задает размер матрицы изображения, а выделенные линии волокон в изображении позволяют определить занимаемую ими часть площади в общей площади анализируемого образца структуры армирующего материала и оценить плотность их распределения, соответствующей её поверхностной плотности. Площадь, занимаемая волокнами, определяется авторами параметрической характеристикой  $k_S$  в долях от общей площади поверхности образца  $S$  нетканого материала. Величина  $k_S$  вычисляется из изображения нетканой структуры армирующей компоненты как

отношение числа элементов со значением 1 (белые пиксели) к суммарному количеству элементов в изображении (общее число точек изображения) по формуле:

$$k_s = \frac{\sum white\_px}{w \cdot h}, \quad (1)$$

Для определения неравномерности распределения волокон в образце рассчитывается параметрическая характеристика  $k_s$  для каждого из сегментов (рис. 2). Число сегментов зависит от разрешения изображения и реальной площади образца структуры, которая соответствует этому изображению, и может быть различным для каждого из образцов.

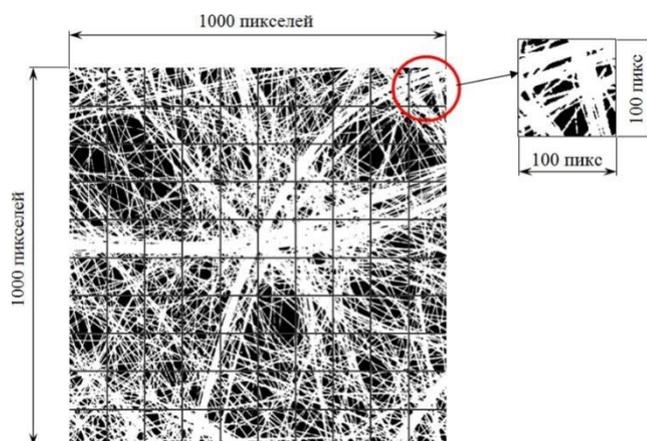
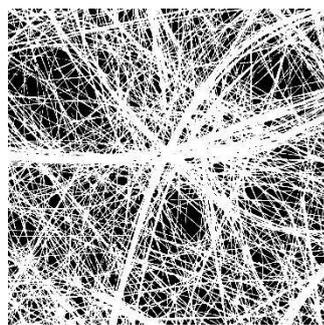
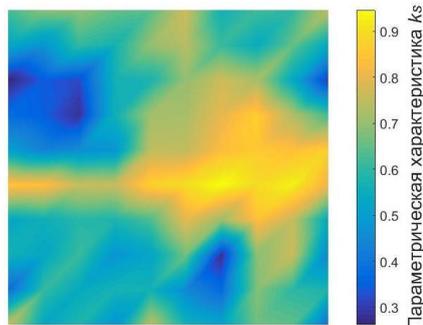


Рис.2. Разделение изображения нетканой структуры на сегменты

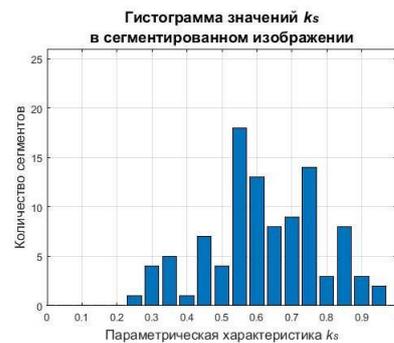
На рис. 3 (a1-a3) представлены полученные изображения исследуемых образцов нетканой структуры после процедур бинаризации, реализованных в соответствии с разработанным авторами алгоритмом. Цветовые карты (рис. 3. б1-б3) поверхности нетканой структуры, построенные программным комплексом по сегментированным изображениям для каждого из образцов, позволяют определить расположение областей с высокой и низкой поверхностной плотностью и упрощают визуальный контроль результатов численного анализа. Из гистограммы (рис. 3, в1) следует, что образец плоской нетканой структуры (a1) имеет самый широкий диапазон значений параметрической характеристики  $k_s$  среди приведённых образцов. Распределение значений  $k_s$  по сегментам изображения нетканой структуры (a1) расположено в диапазоне 0,25- 0,95, при этом 18 сегментов (наибольшее количество) имеют значение  $k_s=0,55$ . Для образцов (a2) и (a3) на рис. 3 диапазон значений параметрической характеристики  $k_s$  сокращается до значений 0,4 - 0,9 и 0,55 - 0,9, соответственно. Для изображения (a2, рис.3.) - 20 сегментов имеют значение  $k_s=0,75$ , а для изображения (a3) - 25 сегментов -  $k_s=0,8$ . Наблюдаемая из гистограмм на рис.3 (в1-в3) тенденция к увеличению концентрации значений параметрической характеристики  $k_s$  при уменьшении диапазона этих значений даёт возможность математически спрогнозировать неравномерность поверхностной плотности исследуемых образцов нетканого материала, а также их физико-механические свойства.



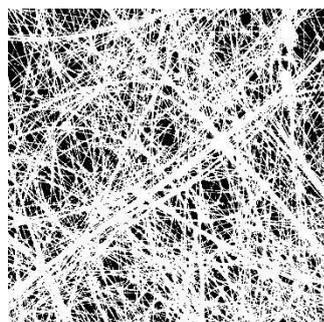
а1



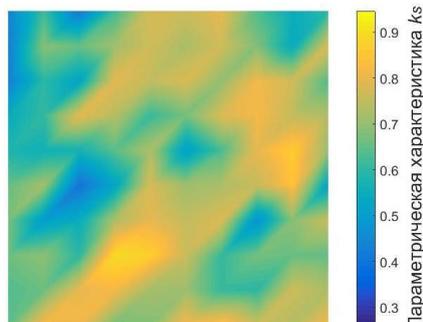
б1



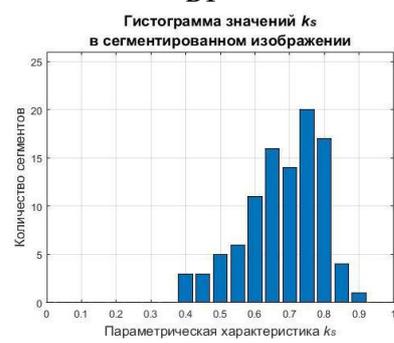
в1



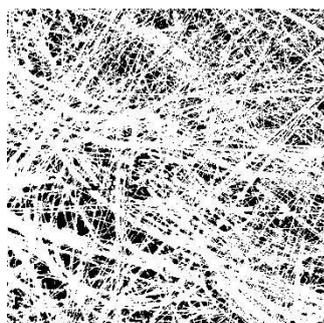
а2



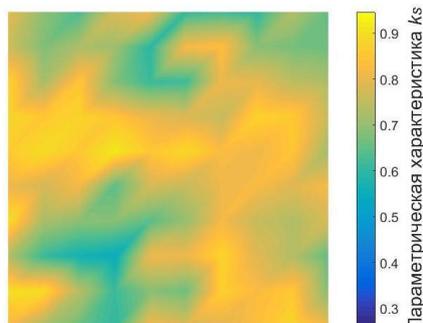
б2



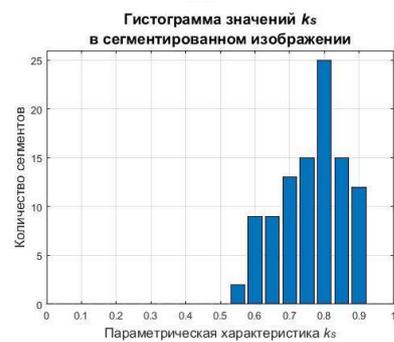
в2



а3



б3



в3

Рис. 3. Изображения исследуемых образцов нетканой структуры после процедур бинаризации; цветные карты поверхности нетканой структуры и гистограммы распределения значений параметрической характеристики  $k_s$

В четвертой главе приведены результаты разработки и компьютерный анализ имитационной модели процесса

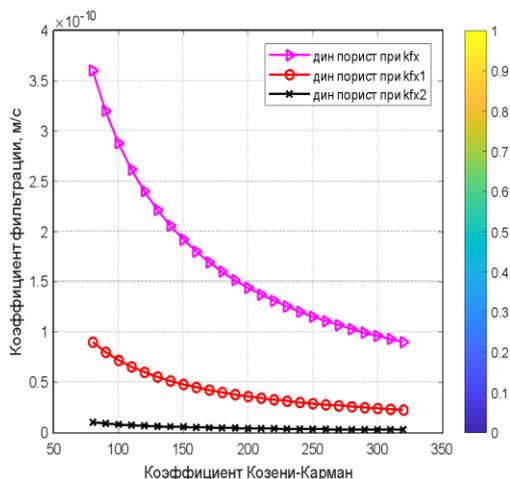


Рис. 4. Зависимость коэффициента фильтрации в функции показателя Козени-Кармана (коэффициенты фильтрации: kfx - хлопчатобумажной ткани, соответствующий динамической (эффективной) пористости 200 мкм; kfx1 – льняной ткани, соответствующий динамической (эффективной) пористости 280 мкм); kfx2 – углеродной ткани полотняного переплетения, соответствующий динамической (эффективной) пористости 250 мкм)

капиллярно-пористой структуры вязким связующим, и дающие возможность прогнозирования задаваемых структурных параметров синтезируемого композитного полимерного материала. Получены графические зависимости кинетики импрегнирования связующего в капиллярно-пористую структуру при различных значениях частот генерирования внешнего динамического режима процесса воздействия на систему ПКМ в форме ультразвуковых колебаний для различных коллоидных композиций связующего, динамической пористости армирующей компоненты, с величинами перепада давления на единичной длине диффузии применительно к методам получения полимерного композитного материала. Динамическая пористость армирующего материала определяется как дробный объем пор, сопоставимый по размеру с критическим диаметром молекул связующего. При этом пористость волокнистого армирующего наполнителя поддается варьированию как по величине общего объема пор, так и по изменению эффективного диаметра.

При этом, решая задачу синтеза функциональных параметров (геометрических и гидравлических) КПС ПКМ применительно к реализации процесса импрегнирования, предшествующие соображения дают возможность представить уравнение Дарси (3) посредством коэффициента проницаемости

$$Q = \frac{K_{\phi} S \Delta h}{H}, \quad (2)$$

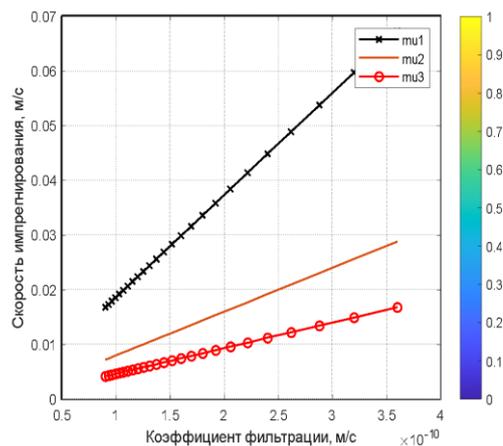


Рис. 5. Скорость импрегнирования в функции коэффициента фильтрации применительно к различным значениям динамической вязкости связующего ( $\mu_1=1,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  (ПВС марки 10/2);  $\mu_2=6,0 \text{ Па}\cdot\text{с}$  (ПВС марки 27/1) – для коллоидных композиций поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы;  $\mu_3=3,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  – для коллоидной композиции акрилатного полимера (оксалат жирных кислот – TUBIVISDRL 170))

импрегнирования армирующей

импрегнирования армирующей

где  $Q$  -пропускная способность КПС армирующей компоненты ПКМ, м<sup>3</sup>/с;  $K_{\phi}$ - коэффициент фильтрации, м/с;  $S$ – площадь поверхности КПС в горизонтальной плоскости армирующей компоненты ПКМ, м<sup>2</sup>;  $\Delta h$ - потери напора потока в КПС армирующей компоненты ПКМ, м;  $H$  - толщина слоя КПС, м.

$$Q = K_n S \left( \frac{P_f}{\mu H} \right), \quad (3)$$

где  $P_f$ – величина гидравлического вакуума – источника движущих сил процесса импрегнирования, Па. Для КПС армирующей компоненты ПКМ, имеющей поры в виде параллельного пучка капилляров с диаметрами одного порядка, коэффициент проницаемости

$K_{\Pi}$  может быть определен как:

$$K_{\Pi} = \frac{\pi d_K^4}{128n} \quad (4)$$

где  $d_K$  - диаметр капилляра, м;

$n$  - количество пор на единицу поверхности КПС, м<sup>2</sup>;

При использовании коэффициента проницаемости в критериях, характеризующих процесс течения связующего через КПС армирующей компоненты, имеет место линейная зависимость между этими критериями в соответствии с гипотезой Козени–Кармана (рис.4). Однако, отклонение от линейности закона процесса импрегнирования может наступить при различных пороговых значениях, определяемых критерием Рейнольдса для различных параметров функционирования (гидродинамических параметров) КПС КПКМ. Это объясняется наличием в поровых каналах местных сопротивлений, вследствие чего многоструйный поток жидкости движется через пористую структуру по криволинейным траекториям с непрерывно изменяющимися скоростями и ускорениями, причем в один и тот же момент времени в различных поровых каналах одной фильтрующей КПС эти показатели могут существенно различаться, следствием чего является

Прогнозируя геометрические параметры КПС, задавшись значениями  $d_K$ ,  $n$  и имея в виду, что средняя скорость

импрегнирования – заполнения пор КПС -  $v_{\phi} = Q/S$ , получим графическую зависимость скорости импрегнирования от коэффициента фильтрации для различных значения коэффициента динамической вязкости связующего (рис. 5). Полученные графические зависимости дают возможность визуализации местных значений скорости импрегнирования в КПС ПКМ с возможностью расчета значения пропускной способности КПС по заданной величине гидравлического вакуума в системе КПС.

Так как большинство КПС армирующей компоненты ПКМ имеет поры неправильной формы и переменного сечения, расположенные произвольно по пути движения связующего, то реальное значение коэффициента проницаемости  $K_{\Pi}$  этих

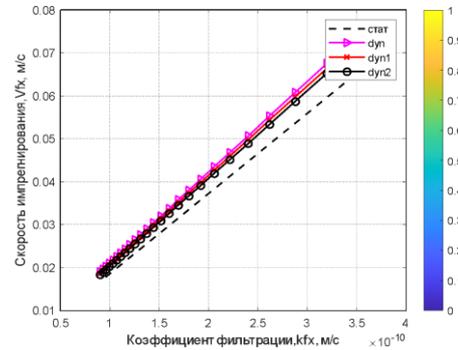


Рис. 6. Зависимости скорости импрегнирования связующего через КПС от коэффициента фильтрации в статическом и динамическом режимах при заданных частотах колебаний ультразвукового генератора: dyn– 50 кГц; dyn1- 42кГц; dyn2 -35 кГц

материалов, возможно, определить только экспериментально или прогнозировать методами синтеза и анализа стохастических моделей. Одним из направлений повышения производительности процесса импрегнирования капиллярно-пористой структуры рассматривается возможность воздействия на систему ультразвуковых колебаний, создающих при динамическом режиме знакопеременное давление  $P_w$ , носящее волновой характер, вследствие чего выражение, определяющее скорость импрегнирования имеет вид:

$$V_{\phi} = \frac{K_{\phi}}{\mu} \cdot \frac{D_p + P_w}{1} \quad (5)$$

Таким образом, при динамическом режиме скорость  $V_{\phi}$  движения частиц связующего через КПС имеет большую величину, чем при статическом режиме нагружения за счет дополнительного знакопеременного давления  $\Delta P$ . Подключая в численную модель дополнительные параметры генерирующего динамического режима процесса импрегнирования, получаем зависимости скорости движения связующего в КПС для различных значений частот ультразвуковых колебаний, действующих на КПС (рис. 6).

Задачи сравнительного анализа кинетики процесса импрегнирования системы композитной структуры в режимах статического и динамического нагружения решены средствами разработанной в рамках исследования «Программы для анализа кинетики вакуумной пропитки в капиллярно-пористой волокнистой структуре при статическом и динамическом воздействии». (Свидетельство. №2023617265).

На рис. 7 представлена принципиальная технологическая схема общего вида устройства для ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов. Пропиточная часть устройства содержит ванну 1, приводные ролики 2, герметичный корпус 4, концентратор колебаний 3 и излучающую плоскую поверхность, связующие 6, движущееся полотно 5 многослойного волокнистого материала АС.

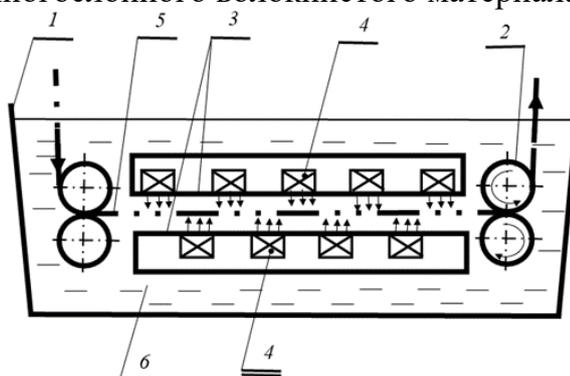


Рис. 7. Технологическая схема устройства для ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов

Устройство позволяет интенсифицировать процесс ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов различными полимерными связующими и может быть использовано в производстве препрегов композиционных материалов (стеклопластиков, органопластиков, углепластиков, в том числе и многослойных) для машиностроительной, авиационной, судостроительной, нефтегазовой и строительной промышленности и бытовых целей.

На рис. 8, представлен алгоритм численного анализа процесса синтеза капиллярно-пористой структуры волокнистого композитного материала, в котором указаны процедуры ввода данных, таких как:

**ВВОД ДАННЫХ** (перепад давления на единичной длине среды ( $dP$ , Па), коэффициент динамической вязкости связующего (Па с), параметр Козени-Кармана (от 80 до 320), средний диаметр волокон (мм), динамическая пористость армирующей структуры (мкм), плотность связующего ( $\text{кг/м}^3$ );

**ВЫЧИСЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА** (скорость фильтрации в статике: от коэффициента фильтрации, от вязкости связующего, скорость фильтрации от коэффициентов фильтрации и от перепада давления, критическое значение числа Рейнольдса, критерий гомохронности);

**ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА** (скорость импрегнирования динамическая (м/с), сравнение скоростей процесса импрегнирования: статической с динамической при равнозначных динамических вязкостях и коэффициентах фильтрации, при различных значениях частот ультразвуковых воздействий на систему с ПКМ, но при равном перепаде давления);

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА МАТРИЦЫ В ПРОЦЕССЕ ИМПРЕГНИРОВАНИЯ** (Критерий Рейнольдса  $Re$  в зависимости от коэффициента проницаемости при статическом и динамическом режимах; критерии Эйлера  $Eu$  и Лагранжа  $La$  в функции коэффициента проницаемости при статическом и динамическом режимах импрегнирования; критерий  $No$ , в функции коэффициента проницаемости при статическом и динамическом режимах по значениям динамической вязкости связующей; модифицированный критерий Эйлера в функции критерия гомохронности  $No$  - при статическом и динамическом режимах импрегнирования).



Рис. 8. Алгоритм численного анализа процесса синтеза капиллярно-пористой структуры волокнистого композитного материала

## ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

На основании проведённых в диссертационной работе исследований решена задача по созданию и реализации алгоритмического программного комплекса на основе метода численного объектно-ориентированного моделирования на примере формирования блока глобальных управляющих переменных с возможностью системной интеграции внешних твердотельных 3D-моделей с вычислительными системами и регулирования значения параметров 3D-модели двумерной элементарной ячейки тканой армирующей структуры ПКМ, являющихся основой построения численной модели в системе варьирования значениями из блока управляющих

переменных и внешней базы данных, обеспечивающих получение детальной информации о тканой структуре наполнителя композиционного материала.

В процессе выполнения исследования получены следующие результаты:

1. Определены направления развития технологии цифрового синтеза композитных материалов из капиллярно-пористых структур методами проектно-ориентированного моделирования в интегрированных САД-системах. Определено, что разница между коэффициентом фильтрации в функции показателя Козени-Кармана хлопчатобумажной ткани и углеродной ткани полотняного переплетения составляет 29 раз, составляющая существенную величину при проектировании технологического оборудования использующего инфузионный метод для разных типов композитов с тканой или нетканой АС.

2. Разработаны и реализованы процедуры численного анализа имитационной блочной модели гидродинамики процесса фильтрования рабочего раствора - матрицы через капиллярно-пористую армирующую структуру как через проницаемую перегородку (кинематическая вязкость матрицы, скорость фильтрации матрицы, геометрические параметры поперечного сечения АС с изменением его толщины);

3. Разработан программный комплекс твердотельного моделирования волокнистых капиллярно-пористых армирующих структур с возможностью синтеза 3D-модели текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования и обеспечивающий анализ параметров, определяющих направленность волокон в нетканых структурах технического назначения.

4. Средствами программного комплекса «Система для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя и определения её неравномерности в нетканых плоских структурах» обеспечена оценка плотности распределения волокон в плоских нетканых структурах – армирующих компонентах вновь синтезируемого композитного материала, по их цифровому изображению методом бинарной пороговой сегментации, при помощи которого удалось снизить нагрузку на вычислительную мощность в 24 раза. Для первого исследованного образца максимальное количество сегментов составило 16 сегментов при  $k_s=0.55$ , для второго 20 сегментов при  $k_s=0.75$ , для третьего 25 сегментов при  $k_s=0.5$ , что является одним из основных показателей плотности распределения волокон в нетканой структуре, определяющим её количественные и качественные характеристики.

5. Установлено влияние воздействия ультразвуковых колебаний на кинетику процесса пропитки при синтезе структуры полимерного композитного материала, разница между статическим и динамическим режимами составляет порядка 20%. Рекомендовано использовать УЗ воздействие с частотой 35кГц.

6. Разработаны методические основы интенсификации пропитки при динамическом внешнем нагружении армирующей волокнистой капиллярно-пористой структуры на примере устройства для ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов.

7. Результаты идентификации модели процесса пропитки составляют 87,48% совпадения модельного выхода с измеренным по скорости пропитки. Результаты численного моделирования кинетики процесса пропитки армирующей КПС вязким связующим, дают возможность прогнозирования задаваемых структурных параметров

синтезируемого композитного полимерного материала и предпосылки к прототипированию технологического оборудования для реализации процесса пропитки с оптимальными технико-экономическими показателями.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследований**

Проведенные исследования являются комплексом разработок технологического плана, направленных на создание композитных материалов и технологий их получения, предназначенных для импортозамещения в различных отраслях промышленности. Созданные разработки являются основой для обеспечения требуемого уровня качества и конкурентоспособности, производимых в Российской Федерации композитных материалов.

На основе анализа и обобщения результатов исследований и разработанной методики прогнозирования общих закономерностей и частные решения по обеспечению конструкционных параметров текстильного композиционного материала в функции его структурных, эксплуатационных параметров на основе методов численного стохастического моделирования, обеспечивающих адекватные результаты прогнозирования отклика на внешнее динамическое воздействие реального синтезированного объекта, заключающиеся в -разработке технологии производства разнообразных деталей из ПКМ с учетом условий эксплуатации конечного изделия; в проведении комплекса натуральных испытаний конечных изделий из ПКМ для оптимизации их конструкционных характеристик; в разработке математических моделей для перспективных ПКМ с целью выбора их оптимальной структуры и эксплуатационных параметров.

### **Публикации, отражающие основное содержание диссертации**

*Статьи в журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук»*

1. Суворов И. А. Проектирование твердотельной модели тканой армирующей структуры полимерного композитного материала с использованием управляющих переменных / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, С. О. Кожевников [и др.]. – Текст непосредственный // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 6. – С. 36–44. – 0,5 п.л. / 0,18 п.л.

2. Суворов, И. А. Метод бинаризации как основа структурного анализа поверхностной плотности нетканого наполнителя композитного материала / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, С. О. Кожевников [и др.]. – Текст непосредственный // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 1. – С. 9–19. – 0,68 п.л. / 0,25 п.л.

3. Суворов И. А. Анализ плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности / С. В. Ершов, И. А. Суворов, Е. Н. Калинин. – Текст непосредственный // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 2. – С. 194–200. – 0,43 п.л. / 0,18 п.л.

4. Суворов И. А. Синтез 3D-модели тканой армирующей структуры текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, Е. Н. Никифорова [и др.]. – Текст непосредственный // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 1. – С. 114–119. – 0,37 п.л. / 0,12 п.л.

5. Суворов И. А. Влияние динамического воздействия на кинетику процесса импрегнирования в синтезе полимерного композитного материала / С. В. Ершов, Е. Н. Калинин, В. Б. Кузнецов [и др.]. – Текст непосредственный // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 6. – С. 195–204. – 0,62 п.л. / 0,18 п.л.

### ***Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях***

1. Суворов И. А. Многофункциональный анализ параметров тканой армирующей структуры по функциональным свойствам элементарной периодической ячейки композитного материала / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, Е. Н. Никифорова [и др.]. – Текст непосредственный // Пластические массы. – 2022. – № 9-10. – С. 31–34. – 0,25 п.л. / 0,12 п.л.

2. Суворов И. А. Численная параметризация структурной 3-D геометрии армирующей компоненты композита на волокнистой капиллярно-пористой основе / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, Е. Н. Калинин [и др.]. – Текст непосредственный // Пластические массы. – 2023. – № 9-10. – С.12–14. – 0,18 п.л. / 0,06 п.л.

### ***Объекты интеллектуальной собственности***

1. Патент № 2774244 С2 Российская Федерация, МПК В05С 3/12. Устройство для ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов : № 2020141347: заявл. 15.12.2020 : опубл. 16.06.2022 / Кузнецов В. Б., Суворов И. А., Калинин Е. Н., Ершов С. В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет». – Текст непосредственный.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661735 Российская Федерация. Программа для геометрической оптимизации деталей из полимерных композиционных материалов : №2022660886 : заявл. 11.06.2022 : опубл. 24.06.2022 / Суворов И. А., Калинин Е. Н., Блинов О. В., Кузнецов В. Б. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет». – Текст непосредственный.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612811 Российская Федерация. Система для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя и определения её неравномерности в нетканых плоских структурах : № 2023610194 : заявл. 10.01.2023 : опубл. 08.02.2023 / Суворов И. А., Калинин Е. Н., Кузнецов В. Б., Ершов С. В. ; заявитель ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «М СТРУКТУРС». – Текст непосредственный.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617265 Российская Федерация. Программа для анализа кинетики вакуумной инфузии в капиллярно-пористой волокнистой структуре при статическом и динамическом воздействии : № 2023615798 : заявл. 29.03.2023: опубл. 07.04.2023 /

Суворов И. А., Калинин Е. Н., Кузнецов В. Б. [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет». – Текст непосредственный.

### *Материалы научно-технических конференций различных уровней*

1. Суворов, И. А. Определение поверхностной плотности нетканых плоских структур методом анализа изображений / С. В. Ершов, И. А. Суворов. – Текст непосредственный // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – Иваново : ИВГПУ, 2018. – № 1-2. – С. 19–23. – 0,25 п.л. / 0,12 п.л.

2. Суворов, И. А. Разработка программного модуля для геометрической оптимизации тканых структур в MatLab / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, Е. Н. Калинин, И. А. Суворов. – Текст непосредственный // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – Иваново . ИВГПУ, 2020. – № 1. – С. 105–108. – 0,25 п.л. / 0,12 п.л.

3. Суворов, И. А. Разработка программного комплекса для трехмерного моделирования волокнистых армирующих структур и расчета их оптимальной геометрии по заданным структурным параметрам тканого полотна и нитей / И. А. Суворов, В. Б. Кузнецов, Е. Н. Калинин, Б. Е. Манин, Т. Грис. – Текст непосредственный // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – Иваново : ИВГПУ, 2021. – № 1. – С. 325–328. – 0,25 п.л. / 0,18 п.л.

4. Суворов, И. А. Разработка структурной схемы имитационной блочной модели для геометрической оптимизации нити с помощью системы блочного моделирования Simulink / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, Е. Н. Калинин // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – Иваново : ИВГПУ, 2022. – № 1. – С. 321–324. – 0,25 п.л. / 0,18 п.л.

5. Суворов, И. А. Разработка параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композиционного материала / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, И. А. Суворов. – Текст непосредственный // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – Иваново : ИВГПУ, 2019. – № 1. – С. 310–312. – 0,18 п.л. / 0,06 п.л.

6. Суворов, И. А. Разработка специализированного программного средства для построения базы управляющих параметров геометрической модели тканой структуры / С. В. Ершов, В. Б. Кузнецов, Е. Н. Калинин, И. А. Суворов. – Текст непосредственный // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – Иваново : ИВГПУ, 2020. – № 1. – С. 650–652. – 0,18 п.л. / 0,06 п.л.

7. Суворов, И. А. Анализ параметров поверхности текстильного волоконно-композитного слоя с использованием цифровых систем обработки изображения / С. В. Ершов, И. А. Суворов. – Текст непосредственный // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – Иваново : ИВГПУ, 2021. – № 1. – С. 131–132. – 0,12 п.л. / 0,06 п.л.

8. Суворов, И. А. Адекватность геометрической модели тканой структуры армирующего слоя композита в функции конструктивных параметров текстильного волоконно-композитного слоя / Е. Н. Калинин, И. А. Суворов. – Текст непосредственный // Молодые ученые – развитию Национальной технологической

инициативы (ПОИСК). – Иваново : ИВГПУ, 2021. – № 1. – С. 132–133. – 0,12 п.л. / 0,06 п.л.

9. Суворов, И. А. Моделирование скорости потока жидкости сквозь элементарную ячейку полимерной структуры / Е. Н. Калинин, И. А. Суворов. – Текст непосредственный // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – Иваново : ИВГПУ, 2022. – № 1. – С. 1100–1101. – 0,12 п.л. / 0,06 п.л.

10. Суворов, И. А. Разработка автоматизированной системы для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя с использованием систем обработки изображений / И. А. Суворов. – Текст непосредственный // Известия высших учебных заведений. Экономика, финансы и управление производством. – 2022. – № 3(53). – С. 101–108. – 0,5 п.л. / 0,5 п.л.

Подписано в печать 27.06.2024 года.  
Формат 60x84 1/16.  
Плоская печать.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,11. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

---

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический  
университет»  
Редакционно-издательский отдел УИРиК  
153000 г. Иваново, Шереметевский пр., д. 21.