

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ивановский государственный политехнический университет»

*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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

д-р техн. наук, профессор,  
Калинин Евгений Николаевич

Иваново – 2024

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>7</b>
<b>Глава1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>14</b>
1.1. Классификация композитных материалов и армирующих структур.....	14
1.2. Совершенствование технологии и оборудования для производства полимерных композиционных материалов .....	22
1.2.1. Физические методы интенсификации процесса пропитки наполнителей полимерных композитных материалов в периодических процессах.....	23
1.2.1.1. Использование предварительного прогрева .....	24
1.2.1.2. Использование токов высокой или сверхвысокой частоты .....	26
1.2.1.3. Использование вакуумирования .....	27
1.2.1.4. Использование ультразвуковых колебаний .....	28
1.3. Периодические способы получения композитных материалов..	30
1.3.1. Контактное формование.....	30
1.3.2. Напыление .....	31
1.3.3. Прессование.....	33
1.3.4. Намотка .....	35
1.3.5. Вакуумное формование.....	36
1.3.6. Вакуумная инфузия .....	37
1.3.7. Формование с подачей смолы .....	38

1.4. Поточные способы получения композитных материалов ..... 39

**Глава2. СИНТЕЗ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОЙ НА ОСНОВЕ ТЕКСТИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ..... 42**

2.1. Концептуальные предпосылки синтеза и анализа численной гидродинамической модели системы «капиллярно пористая армирующая структура - матрица» ..... 42

2.1.1. Разработка концептуальной модели процесса взаимодействия армирующей структуры - текстильного материала с матрицей как системы..... 42

2.2. Обоснование выбора средств программного обеспечения и методов компьютерного моделирования для решения задач процесса инфузии - импрегнирования в синтезе капиллярно-пористой структуры полимерного композитного материала..... 46

2.3. Системный анализ явления массопереноса в процессе вакуумной инфузии армирующей структуры и матрицы как вязкой компоненты ..... 49

2.4. Численный анализ процесса массопередачи в системе обработки капиллярно пористой армирующей структуры волокнистого материала в инфузионной ванне ..... 51

2.5. Направления развития технологии синтеза композитных материалов из капиллярно-пористых структур методами проектно-ориентированного моделирования в интегрированных CAD-системах ..... 54

2.6. Синтез 3D-модели тканой армирующей структуры текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования..... 56

2.7. Разработка программного комплекса твёрдотельного моделирования волокнистых армирующих структур и расчета их

архитектуры по заданным геометрическим параметрам тканого полотна и нитей .....	64
2.8. Исследование скорости потока жидкости в модели элементарной ячейки тканой структуры .....	68
<b>Глава3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АРМИРУЮЩИХ СТРУКТУР .....</b>	<b>72</b>
3.1. Анализ параметров, определяющих направленность волокон в нетканых структурах технического назначения .....	78
3.2. Метод бинаризации как основа структурного анализа поверхностной плотности нетканой армирующей структуры композитного материала .....	84
<b>Глава 4. РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕДАЧИ В ЗОНЕ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ И АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ НАПОЛНИТЕЛЯ.....</b>	<b>94</b>
4.1. Численная модель переходных состояний процесса массопередачи в зоне вакуумной инфузии полимерной матрицы и армирующей структуры наполнителя.....	94
4.2. Анализ влияния внешнего динамического воздействия на кинетику процесса пропитки в синтезе полимерного композитного материала .....	102
4.3. Идентификация численной модели переходных состояний массопереноса в процессе инфузии матрицы в армирующей структуре волокнистого композитного материала.....	122
4.3.1. Особенности задач идентификации .....	122

4.3.2. Решение задачи идентификации численной модели переходных состояний процесса массопередачи при инфузионной обработке капиллярно пористой структуры волокнистого материала . 123

4.4. Разработка методики синтеза системы ультразвукового устройства с армирующей структурой волокнистого композитного материала в динамическом режиме внешнего нагружения..... 129

4.4.1. Физические особенности гидродинамического процесса кавитации при вакуумной инфузии армирующей структуры ..... 129

4.4.2. Синтез устройства ультразвуковой интенсификации процесса вакуумной инфузии армирующей структуры композита на основе многослойных волокнистых материалов..... 135

4.4.3 Эффективность и перспективность использования технологии ультразвуковых колебаний на эксплуатационные характеристики композитного материала ..... 143

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**..... Ошибка! Закладка не определена.

**Литература** ..... 151

**Приложение 1** ..... 179

**Приложение 2** ..... 181

**Приложение 3** ..... 182

**Приложение 4** ..... 186

### **Перечень условных обозначений:**

АС – армирующая структура

УЗУ – ультразвуковое устройство

ВКМ – волокнистый композитный материал

КПС – капиллярно пористая структура

ПКМ – полимерный композитный материал

ПО – программное обеспечение

МКЭ – метод конечных элементов

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность 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.

Полимерные композитные материалы представляют собой многокомпонентные структуры, состоящие, как правило, из матрицы, армированной наполнителями. Полимерные композитные материалы 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 как функциональным, так и по конструктивным параметрам.

**Степень разработанности темы исследования** вопросы совершенствования методов синтеза объектов из полимерных композитных материалов 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 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 фильтрования 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 твёрдотельного 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 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 получены следующие новые результаты:

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

- разработаны методические основы синтеза системы импрегнирования при динамическом внешнем нагружении армирующей волокнистой капиллярно-пористой структуры на примере ультразвукового воздействия.

**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%. Также рекомендовано использовать результаты работы в преподавании учебных дисциплин по проектированию изделий из полимерных композитов различного функционального назначения.

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

**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.** По материалам диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых изданиях, в которых излагаются основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, 5 статей в сборниках международных научно-практических форумов из перечня РИНЦ, а также 10 тезисов докладов в сборниках материалов международных научных конференций.

Работа выполнена в рамках:

- Совместной программы DAAD и Министерства науки и высшего образования РФ «Михаил Ломоносов», на тему: «Исследование качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя с использованием систем обработки изображений» Институт текстильных технологий Рейнско-Вестфальского технического университета г. Ахен.
- Гранта Российского фонда фундаментальных исследований на тему: «Развитие научных основ прогнозирования функциональных и конструкционных параметров, синтезируемых полимерных волокнистых композитных систем».

- Гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере на тему: «Разработка программного модуля для геометрической оптимизации деталей из полимерных композиционных материалов».
- Гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере на тему: «Разработка автоматизированной системы для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя с использованием систем обработки изображений».

# **Глава 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

## **1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И АРМИРУЮЩИХ СТРУКТУР**

Композитный материал (КМ) – 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.

Компонент, образующий непрерывную среду во всем объеме композитного материала, называется матрицей, а компоненты, разъединенные матрицей, называются армирующими или наполнителем.

В настоящее время существует множество вариантов классификации композитных материалов по различным признакам. Среди наиболее часто встречающихся [1] следует отметить варианты классификации по материалу матрицы и армирующих компонентов, которые представлены на рис. 1-2.

Оценивая представленный на рис. 1 вариант классификации, следует обратить внимание на группу композитных материалов с матрицей из полимеров, являющихся наиболее широко распространенными конструкционными композитами. Эту группу материалов зачастую называют полимерными композитными материалами (ПКМ) по материалу используемой матрицы, в качестве которой могут выступать эпоксидные, полиэфирные, полиамидные, акрилатные и другие термореактивные и термопластичные смолы.

Композитные материалы этой группы технологичны и просты в обработке, а также обеспечивают возможность получения сложно

профильных и крупно габаритных изделий как промышленного, так и бытового назначения и могут использоваться в авиа-, корабле-, автомобилестроении, промышленном и гражданском строительстве и других отраслях хозяйственной деятельности.

На протяжении нескольких десятилетий, начиная с 70-х – 80-х годов прошлого века, данная группа ПКМ получает все большее распространение и развитие за счет совершенствования используемых армирующих структур, применяемых матричных составов, обладающих новым комплексом физико-химических свойств, а также внедрения высокоэффективных технологических процессов получения конструкционных материалов.



Рис. 1. Классификация композитных материалов по материалу матрицы

Немаловажное значение в определении механических и физико-химических, а в целом и эксплуатационных свойств, и характеристик полимерных композитных материалов играет армирующая структура ПКМ, природа составляющих ее волокон, а также геометрические особенности наполнителя.

Представленная на рис. 2 классификация армирующих структур свидетельствует о широком спектре наполнителей для ПКМ, отличающихся по их конструктивному признаку.

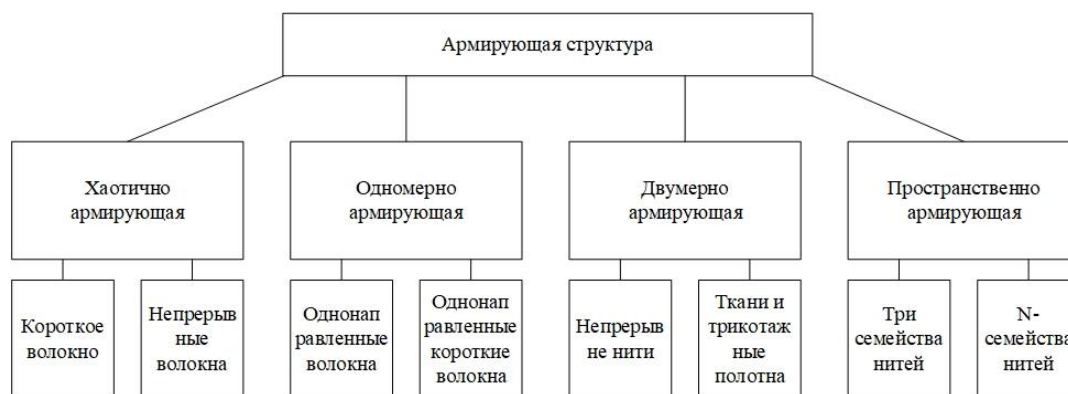


Рис. 2. Классификация армирующих структур полимерных композитных материалов по конструктивному признаку наполнителя

Необходимо отметить, что помимо конструктивных особенностей, наполнители для ПКМ отличаются природой волокон, их составляющих [2].

В качестве волокон для армирующих структур могут использоваться как природные волокна – хлопок и лен, так и синтетические –полиэфирные, полиамидные, ацетатные, полипропиленовые и ряд других, а также их смеси с природными. Особого внимания заслуживают стеклянные и базальтовые волокна и нити и получившие в последние десятилетия широкое распространение углеродные нити и волокна [3-6].

Различная природа волокон и нитей оказывает существенное влияние на качественные и эксплуатационные характеристики полимерных композитных материалов. В первую очередь это проявляется в их адгезионной способности при взаимодействии с полимерной матрицей, что отражается на прочностных показателях ПКМ. Кроме того, различные физико-химические свойства волокон оказывают значительное влияние на устойчивость материалов к различного рода воздействиям, в том числе и агрессивных сред.

Однако, гораздо более значительное влияние на качественные показатели полимерных композитных материалов оказывает конструктивная особенность и архитектура армирующих структур. При этом необходимо



отметить, что строение наполнителя существенно влияет на прочностные показатели ПКМ, увеличивая их, в ряде случаев, до 10 раз [1].

Среди представленных на рис. 2 вариантов армирующих структур для полимерных композиционных материалов, наиболее простыми, с точки зрения конструктивного строения и технологичности производства, являются [1,7,8] нетканые материалы, входящие в группу хаотично армированных и одномерно армированных наполнителей. При этом, в качестве неоспоримого достоинства, необходимо отметить их низкую стоимость, поскольку для изготовления хаотически армированных коротковолокнистых наполнителей могут использоваться отходы производства натуральных и синтетических волокон, а также стекло- и углеродных волокон.

Однако прочностные характеристики подобных армирующих структур крайне низки и практически не оказывают влияния на готовый композитный материал, прочность которого будет в этом случае всецело определяться полимерной матрицей. Это в полной мере касается одномерно армированных структур, хотя их прочностные характеристики несколько выше.

Следует отметить, что в качестве наполнителей, обладающих более высокими прочностными характеристиками, могут использоваться вязально – прошивные и иглопробивные нетканые материалы. Но и в этом случае увеличение прочностных характеристик готового полимерного композитного материала будет несущественно.

Значительно более высокими прочностными характеристиками обладают двумерно армированные наполнители. Наибольший интерес среди них представляет подгруппа трикотажных полотен и тканей, обеспечивающая гораздо более широкие возможности с точки зрения ассортимента и области применения полимерных композитных материалов.

Важнейшей характеристикой трикотажных полотен является переплетение, которое определяет качественные характеристики и свойства трикотажа: прочность, поверхностную плотность, толщину, растяжимость,

распускаемость и т.д. [8]. Ассортимент переплетений трикотажных полотен многообразен и включает главные, производные, рисунчатые и комбинированные, а также кулирные (поперечно-вязанные) и основовязанные (продольно-вязанные).

Основовязанные трикотажные полотна являются наиболее предпочтительными из всего ассортимента трикотажа с точки зрения их использования в производстве полимерных композитных материалов. Это обусловлено тем, что другие типы переплетений обладают гораздо более подвижной структурой, негативно влияющей, в конечном итоге, на качество полимерных композитных материалов. Структура полотна может формироваться в соответствии с заданными требованиями, а в качестве сырья используются полиамидные, полиэфирные волокна или стеклонити и т.п. [9].

Основовязанные трикотажные полотна обладают более высокими прочностными характеристиками по сравнению с неткаными материалами, поскольку системы нитей в них пересекаются многократно. Кроме того, повышению их прочности и выносливости способствует использование вытянутых высокопрочных нитей в направлении петельных рядов и петельных столбиков [10].

Еще одним вариантом создания высокопрочных основовязанных трикотажных технических полотен является использование уточных нитей, проходящих в различных направлениях и под разными углами в несколько слоев [11]. Наиболее предпочтительны для этих полотен карбоновые и стекловолокна. Данные полотна широко распространены в качестве основы для композитных материалов при изготовлении ветросиловых установок. Они достаточно широко используются в таких отраслях как кораблестроение, авиастроение, автомобилестроение, строительство, при изготовлении спортивных изделий и т.д.

Следует отметить, в качестве одного из преимуществ технического трикотажа, возможность варьирования толщины и получение трикотажных полотен с количеством слоев от 2 до 7 [12].

В тоже время сложная структура основовязаного трикотажа, обеспечивая с одной стороны более высокую прочность ПКМ, с другой - затрудняет равномерность ее заполнения полимерной матрицей. Кроме того, не смотря на высокую плотность нитей и сложность строения структуры, она остается достаточно подвижной. В конечном итоге это несколько сужает возможности использования основовязаного трикотажа при изготовлении полимерных композитных материалов, сокращая их ассортимент.

В связи с этим, заслуживает пристального внимания другой вид текстильного материала, входящего в подгруппу двумерных армирующих материалов, а именно тканые полотна.

Тканые полотна представляют из себя системы нитей, называемых основой и утком располагающихся перпендикулярно друг другу и связанных определённым переплетением [13-17]. При этом основа располагается вертикально, а уток – горизонтально.

Тканые полотна классифицируются по типу переплетений на главные и производные, а по назначению на бытовые и технические. При этом и бытовые и технические ткани могут вырабатываться как на основе главных, так и производных переплетений.

Важно отметить тот факт, что ткани главных переплетений имеют однородную, гладкую поверхность на всем своем протяжении, в то время как тканые полотна производных переплетений отличаются наличием рельефа, зачастую неравномерно распределенного по поверхности материала.

Поэтому, с точки зрения использования тканых полотен в качестве армирующих основ для полимерных композиционных материалов целесообразно рассматривать только ткани главных переплетений и, в первую очередь, полотняного. В полотняном переплетении [13,16,17] нити основы и

утка переплетаются перпендикулярно друг другу, образуя условные ячейки, размер которых зависит от поверхностной плотности текстильного материала, а именно, от количества нитей в основе и утке, а также их линейной плотности. Подобная структура материала обеспечивает гораздо более равномерное заполнение его объема полимерной матрицей, что положительно отражается на качестве изготавливаемого ПКМ.

Ткани подобного переплетения просты в изготовлении, и, следовательно, позволят снизить себестоимость конечного продукта. Кроме того, использование природных, синтетических, смесовых, стеклянных, углеродных или неорганических основных и уточных нитей позволит варьировать в широких пределах прочностные показатели армирующих структур по сравнению с использованием нетканых материалов и трикотажа. Это, в свою очередь, существенно расширит ассортимент ПКМ, их эксплуатационные характеристики и области применения при оптимизации расходов на производство.

При этом следует обратить внимание на использование углеродных волокон [18], получивших значительное распространение в последние три десятка лет, для изготовления изделий в ракетно-космической и оборонной отраслях. Углеродные материалы сочетают в себе высокие прочностные показатели, химическую и термическую стойкость, электро- и теплопроводность, биологическую инертность, наряду с низкой плотностью. Однако высокая стоимость данных волокон в значительной степени сдерживает их использования в изделиях гражданского назначения.

Несмотря на то, что тканые наполнители по своим характеристикам значительно превосходят нетканые и трикотажные, они не лишены недостатков, напрямую не связанных с их строением, а проявляющихся при получении ПКМ, имеющих значительную толщину. Поскольку тканые армирующие наполнители и полимерные материалы на их основе практически двумерны (длина и ширина) возникают определенные проблемы, связанные с

получением объемных ПКМ на их основе. В этом случае приходится формировать некую слоистую структуру из отдельных двумерных полимерных композитов, дополнительно связывая их матрицей. В результате возникает опасность разрушения композита по линии соединения слоев.

В связи с этим, представляет интерес пространственные армирующие структуры, представленные на рис. 2 и объединенные в группу многослойных переплетений.

Существует несколько способов классификации многослойных переплетений, большинство из которых основано на таком критерии как слойность. Однако наиболее предпочтительной является классификация по способу и порядку соединения слоев [19].

Ткани, образуемые данным видом переплетений, представляет собой три и более семейств нитей [13,14,16,17]. Наиболее простым вариантом многослойной структуры является двухслойная ткань, отдельные полотна которой соединены за счет нитей основы, составляющих слой ткани, или с помощью дополнительной основы [17].

Основой для многослойных тканей служит полотняное переплетение, обеспечивающее в пределах каждого слоя наиболее прочную связь, что в свою очередь позволяет существенно повысить прочностные характеристики готового полимерного композитного материала по сравнению с многослойным ПКМ, собранным из отдельных однослойных материалов. Кроме того, полотняное переплетение предпочтительнее других вариантов с точки зрения заполнения его матрицей при получении ПКМ.

В последнее время ассортимент полимерных композитных материалов постоянно расширяется, причем в том числе и с учетом увеличении их толщины. Это, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к армирующей структуре ПКМ, которая должна обеспечивать требуемую прочность изделий и их эксплуатационные характеристики, в том числе и за счет использования волокон различной природы или их комбинаций.

В результате внимание к многослойным тканям, как армирующим основам для ПКМ все более увеличивается и в первую очередь за счет совершенствования их структуры в том числе и методами компьютерного моделирования [20-22].

Среди подобных разработок можно отметить четырехслойные ткани и ткани с повышенной износостойкостью, а также обладающих различными физико-химическими и механическими свойствами [23-26].

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

## **1.2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методы и способы получения изделий из полимерных композиционных материалов, или изготовления препрегов ПКМ, отличаются разнообразием технологических приемов, видами оборудования и могут быть выделены в две большие группы: периодические и непрерывные [27,28].

Основной задачей обоих вариантов является достижение высокого качества, прочностных и эксплуатационных характеристик композитного материала за счет максимально равномерного распределения полимерной матрицы в структуре армирующего наполнителя.

### **1.2.1. Физические методы интенсификации процесса пропитки наполнителей полимерных композитных материалов в периодических процессах**

Обработка текстильных материалов в жидкой фазе сопровождается многочисленными видами технологических процессов, связанных с производством текстильной продукции или изделий из нее. Огромное количество научных исследований посвящено установлению взаимосвязи между структурой текстильного материала и продвижением жидкости в капиллярно-пористых телах, а также влиянию различных физических факторов на эффективность указанного процесса.

По мнению многих исследователей [29-31], существенным препятствием для проникновения жидкости в капиллярно-пористую структуру волокнистого материала является воздух, располагающийся в порах, капиллярах и структуре материала, образованного природными волокнами или их смесями с синтетическими.

Не менее важным фактором, влияющим на пропитку, является протяженность поверхности смачивания, участвующая в процессе [32,33], что более характерно для наполнителей, образованных гидрофобными волокнами такими как синтетические, углеродные и стеклянные.

При этом смачивающая способность волокон указанной природы напрямую связана и с их адгезионными характеристиками при взаимодействии с полимерными связующими.

Безусловным фактором, оказывающим существенное влияние на качество пропитки армирующих структур, оказывает их строение [34]. Чем она плотнее, особенно в случае многослойных структур, тем сложнее добиться равномерного распределения полимерного связующего, его однородности по объему изделия из ПКМ.

В связи с этим, целесообразно рассмотреть такие физические методы интенсификации процесса пропитки, которые оказывали бы влияние как на

армирующую структуру полимерного композитного материала, так и на связующее, скорость и степень его проникновения и распределения в объеме наполнителя.

К таким методам относятся предварительный прогрев текстильного материала, вакуумирование в процессе пропитки наполнителя и подача связующего на армирующий материал под давлением. Еще одним методом интенсификации является использование волнового динамического воздействия, такого как ультразвуковые колебания на систему «армирующий наполнитель – связующее».

#### **1.2.1.1. Использование предварительного прогрева**

Эффект предварительного прогрева армирующей структуры на качество пропитки обусловлен комплексом процессов, зависящим, в том числе, и от природы наполнителя и его строения, что оказывает влияние на физическую сущность происходящих процессов. При этом способ подвода тепловой энергии конвективный, контактный, радиационный или комбинированный не влияет на степень последующей пропитки, а определяется лишь температурой армирующего материала [35].

Интенсифицирующее действие предварительного прогрева обусловлено появлением разрежения в порах наполнителя за счет уменьшения объема нагретого воздуха при его охлаждении в пропитывающем связующем, если речь идет о текстильных материалах из природных волокон или их смесей с синтетическими [35]. В результате происходит эффективное и более равномерное заполнение как армирующей структуры, так и внутреннего объема волокон, что положительно сказывается на качестве полимерного композитного материала.

В случае, если в качестве наполнителя используются структуры из синтетических волокон, тепловое воздействие вызывает изменение их гладкой



поверхности, связанное с ее небольшой деструкцией и появлением шероховатостей и микротрещин [35]. В результате существенно увеличивается площадь взаимодействия полимерного связующего с отдельными волокнами и нитями, а также армирующей структурой в целом.

Интенсифицирующее действие предварительного прогрева армирующих структур, сформированных стеклянными, углеродными или неорганическими волокнами, типа базальтовых, обусловлено явлениями адгезии [36-39]. В этом случае происходит с одной стороны уменьшение краевого угла смачивания поверхности нагретых волокон полимерным связующим, а с другой – увеличение протяженности поверхностей их взаимодействия.

Оборудование для предварительного прогрева армирующих наполнителей отличается большим разнообразием для реализации контактного, конвективного и радиационно-термического нагрева [35, 39-43]. Для реализации контактного нагрева могут использовать металлические барабаны с различными вариантами обогрева: паровой, масляный, электрический. Сопловые устройства различной конструкции используются для подвода горячего воздуха к армирующему наполнителю с целью его прогрева. Однако наиболее эффективным можно считать радиационно-термический нагрев, создаваемый инфракрасными или галогеновыми излучателями. В этом случае, в отличие от первых двух вариантов, тепловая энергия поводится непосредственно к обогреваемому материалу, а не растрачивается на нагрев окружающей среды, что делает его экономически более выгодным.

### **1.2.1.2. Использование токов высокой или сверхвысокой частоты**

Значительный интерес к возможностям диэлектрического нагрева в процессах обработки текстильных материалов и, в частности, в вопросах их пропитки полимерными связующими возник на рубеже 80-х годов прошлого века [44-47].

Диэлектрический нагрев отличается высокими скоростями и равномерностью тепловыделения, в отличие от вышеописанных способов прогрева, при полном отсутствии теплоносителя. Тепло генерируется внутри полярного диэлектрика под воздействием внешнего электромагнитного поля высокой (ВЧ) или сверхвысокой частоты (СВЧ).

При этом токи ВЧ и СВЧ наряду с тепловым воздействием на полимерные диэлектрики вызывают в них интенсивную колебательную активацию полярных групп [48,49]. Кроме того, изменение надмолекулярной структуры волокон приводит к повышению прочностных показателей текстильных материалов [50].

Использование электромагнитного поля высокой или сверхвысокой частоты повышает скорость диффузионных процессов примерно в 60 раз по сравнению с наиболее эффективными вариантами прогрева текстильного материала с нанесенным на него связующим.

Отмечая высокую эффективность токов высокой и сверхвысокой частоты для интенсификации процесса пропитки, необходимо отметить, что наилучшие результаты достигаются при использовании тяжелых тканых материалов с поверхностной плотностью выше 200 г/м<sup>2</sup>. [50] Это обусловлено способностью диэлектрического нагрева генерировать тепловую энергию только в достаточно объемных структурах.

В связи с этим, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективно применение токов ВЧ и СВЧ может быть реализовано для интенсификации распределения полимерного связующего в многослойных армирующих структурах.

### 1.2.1.3. Использование вакуумирования

В качестве еще одного из методов интенсификации процесса пропитки текстильных материалов могут быть использованы предварительное вакуумирование или предварительное запаривание [35,51-55].

Предварительное вакуумирование обеспечивает максимальное значение степени пропитки при глубине вакуума  $\geq 0,8 P_{\text{атм}}$ , которое технически несложно обеспечить [35,52-57]. В результате создается разрежение во всем объеме текстильного наполнителя и в его порах, если используются природные волокна. Однако технология предварительного вакуумирования может быть реализована только в периодических способах пропитки армирующих структур, поскольку ряд конструктивных и эксплуатационных проблем ограничивают ее использование в поточных технологических процессах.

С технической точки зрения более простой технологией вакуумирования является способ предварительного запаривания текстильных структур перед их пропиткой вязким связующим, который может быть реализован и в непрерывных процессах. Физическая сущность данного процесса [58-61] также обусловлена появлением разрежения в структуре и порах текстильного наполнителя, которое создается в результате конденсации горячего теплоносителя (насыщенного пара) с раствором или полимерной связующей, имеющими более низкую температуру. Создаваемое разрежение и является движущей силой при интенсификации процесса пропитки.

В тоже время, существует опасность того, что при использовании в качестве текстильных наполнителей природных волокон в их микропорах будет присутствовать некоторое количество влаги, которая не позволит эффективно заполнить весь объем. В результате может наблюдаться снижение прочностных показателей изделия, что ограничивает ассортимент выпускаемой продукции. Использование предварительного запаривания

синтетических материалов перед пропиткой в меньшей степени сказывается на качестве изделий из них, поскольку они не имеют капиллярной структуры. Это касается и армирующих структур из стеклянных, углеродных или неорганических волокон.

#### **1.2.1.4. Использование ультразвуковых колебаний**

Одним из перспективных направлений интенсификации процессов пропитки капиллярно-пористых тел является использование ультразвуковых колебаний. Первые попытки использования акустических полей в текстильной промышленности относятся к 80-тым годам прошлого века [47]. Применение УЗ-колебаний дает возможность получения большой интенсивности потока энергии при сравнительно небольших амплитудах колебаний, которая пропорциональна квадрату частоты [62,63].

Основные физико-химические эффекты, возникающие в жидкости под действием акустических полей обусловлены явлением кавитации [64-67]. Акустическая кавитация — это рост в УЗ-поле пузырьков из имеющихся субмикроскопических зародышей газа или пара в жидкостях до размеров доли миллиметра, которые начинают пульсировать с частотой ультразвука и захлопываются в положительной фазе давления. При захлопывании пузырьков газа возникают большие локальные давления, образуются сферические ударные волны и акустические микропотоки. Кавитация является эффективным механизмом локального концентрирования относительно невысокой средней энергии акустического поля в очень малых объемах жидкости, что приводит к созданию исключительно высокой плотности энергии и ускоряет тепло-массообменные процессы в том числе и за счет развития высоких температур [69].

В связи с этим явлению кавитации посвящено большое количество исследований [62,63,70-83], которые привели к появлению технологических

приемов и разработке оборудования для использования УЗ-колебаний в различных отраслях промышленности.

Широкое распространение УЗ-технологии получили в отделочных производствах текстильной промышленности. Акустическое воздействие эффективно используется для очистки тканей от загрязнений при промывке [84-92], а также для интенсификации процессов беления и крашения текстильных материалов [93-98].

Другим направлением использования акустических колебаний является УЗ-сварка полимерных материалов или текстильных изделий с полимерным покрытием [99,100].

Безусловный интерес представляет воздействие УЗ-колебаний на полимерные системы, в результате которого в них происходит комплекс физико-химических процессов, а именно, увеличивается степень полимеризации полимеров [101]; в гетерогенных системах улучшается процесс смачивания [102] и в целом улучшается переработка высоковязких полимерных материалов и композиций на их основе [103].

Указанные явления могут служить основой для интенсификации процессов пропитки при получении полимерных композитных материалов, что послужило созданию различных устройств УЗ-пропитки [104-106]. Качество пропитки ПКМ напрямую связано с достижением требуемых прочностных и эксплуатационных характеристик. Это особенно важно при пропитке многослойных объемных армирующих структур.

Преимуществом использования устройств, основанных на акустических колебаниях, является возможность обеспечения их функционирования без необходимости применения мощных ультразвуковых генераторов.

## **1.3. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **1.3.1. Контактное формование**

Контактное или ручное формование является наиболее простым и известным способом получения изделий из полимерных композитных материалов, известным с 40-х годов прошлого века. Сущность способа заключается в том, что в форму (рис. 3) необходимой конфигурации первоначально закладывается армирующий материал (нетканый материал, трикотажное полотно, ткань и т.п.). Затем с помощью кисти или мягкого валика вручную наносится полимерный материал. После чего происходит дополнительная обработка изделия жестким валиком с целью удаления пузырьков воздуха из ПКМ, выравнивания его поверхности и равномерного распределения матрицы в структуре наполнителя. Затем изделие подвергается термической обработке или сушке в зависимости от того является оно готовым продуктом или заготовкой, предназначенной для последующей обработки.

Неоспоримыми достоинствами данного способа изготовления полимерного композитного материала является широта ассортимента используемого армирующего наполнителя и полимерного связующего. Кроме того, процесс не требует специального оборудования, квалификации персонала и, соответственно, отличается низкой себестоимостью производства продукции.

Наряду с вышеприведенными достоинствами процесс имеет и существенные недостатки. К ним, в первую очередь относится низкая прочность полимерного композитного материала, обусловленная, с одной стороны, наличием пузырьков воздуха в структуре ПКМ, которые невозможно полностью удалить при прокатывании изделия жестким роликом вручную. Снижению прочностных характеристик способствует и высокое содержание смолы, нанесение которой невозможно контролировать при ручном способе дозирования. Кроме того, это приводит к существенному увеличению массы

изделия и неоправданному перерасходу связующего. Еще одним недостатком данного способа является его низкая производительность.

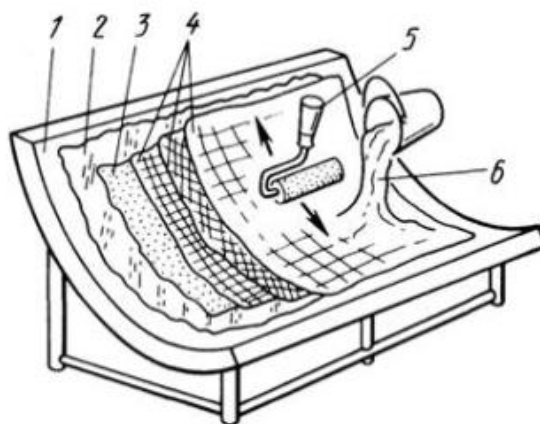


Рис. 3. Элементы конструкции формы и изделия при формировании ручной укладкой: 1 – форма, 2 – разделительная пленка, 3 – наружный смоляной слой, 4 – стекловолокно, 5 – ручной валик, 6 смола в смеси с катализатором.

### 1.3.2. Напыление

Данный способ получения полимерных композитных материалов используется для мелкосерийного или среднесерийного производства и является в некоторой степени комбинацией ручного и механизированного способа изготовления ПКМ.

В этом случае с помощью специального устройства (рис. 4), типа форсунки, происходит смешение армирующего наполнителя с полимерным связующим и подача полученной композиции на поверхность формы, предназначенной для изготовления изделия. Затем полученный композит уплотняют вручную жестким прокатным валиком. Далее изделия также подвергается последующей сушке или термообработке в зависимости от организации технологического процесса.

Использование специального устройства для нанесения композиции позволяет существенно увеличить скорость формования изделия и, следовательно, повысить производительность процесса, а также его экономичность. Кроме того, использование специального устройства для нанесения смеси наполнителя и полимера позволит более точно контролировать расход связующего, что важно не только с экономической точки зрения, но и с точки зрения получения требуемых прочностных и эксплуатационных характеристик ПКМ.

В тоже время, данному способу производства полимерных композитных материалов присущи и существенные недостатки. Наиболее существенным из них является ограниченность в выборе типа армирующих наполнителей. Через форсунку вместе со связующих можно подавать только лишь волокна ограниченного по длине размера, как например, используемые при формировании холста нетканого материала. При этом необходимо отметить, что ограничений в плане природа наполнителя не существует. В равной степени могут использоваться природные, синтетические, углеродные, стеклянные или неорганические, типа базальтовых, волокна, что существенно расширяет ассортимент и область использования полимерных композитных материалов. В качестве недостатка следует указать невысокую производительность и низкую прочность получаемых изделий. В результате, несмотря на широкую линейку волокнистых материалов и ассортимент изделий ПКМ, технология не получила достаточного распространения.



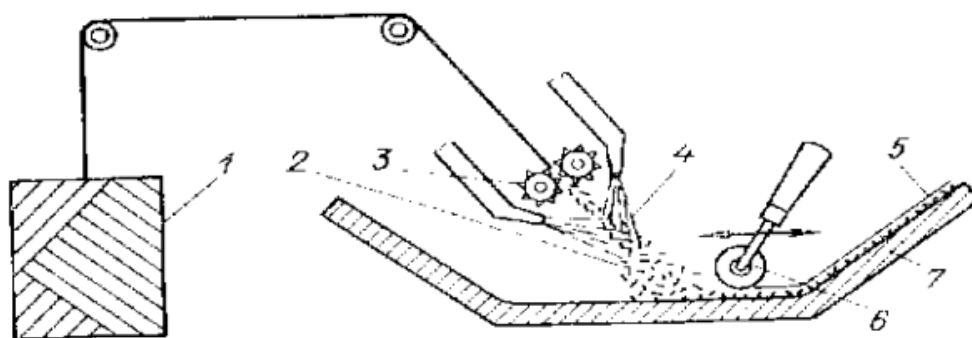


Рис. 4. Воздушная система напыления с двумя емкостями: 1 – ровинг, 2 – смола с катализатором, 3 – рубильное устройство, 4 – смола с ускорителем отверждения, 5 – уплотненный слой, 6 – валик, 7 – форма

### 1.3.3. Прессование

Прессование только отчасти можно назвать самостоятельным способом получения изделий из композитных материалов, поскольку он представляет собой заключительную стадию, которой предшествует процесс получения препрега. Препрег – это полуфабрикат композиционного материала, состоящий из волокнистого армирующего наполнителя и нанесённого с двух сторон связующего. Физическая сущность процесса прессования заключается в том, что под воздействием внешнего высокого давления в препреге происходит его уплотнение и частичная деструктуризация прежней структуры (рис. 5). Трение между частицами ПКМ вызывает появление тепловой энергии, что в свою очередь ведет к плавлению связующего компонента. Результатом этих процессов является переход ПКМ в вязкопластичное состояние и образование целостной и уплотненной структуры.

Существует одностадийный способ прессования, когда процесс осуществляется одновременно с пропиткой армирующей структуры полимерной матрицей (рис. 6). Однако он менее распространен в отличие от двухстадийного, поскольку разделение на две операции существенно сокращает время изготовления изделий.

К достоинствам метода прессования следует отнести простоту процесса, особенно если он осуществляется в две стадии, возможность использования различных видов армирующих структур, низкая себестоимость процесса при одновременном обеспечении требуемого качества и эксплуатационных характеристик изделий.

В качестве недостатков нужно отметить мелкосерийность производства, наличие дополнительных площадей в случае реализации двухстадийного процесса и сложность оборудования – для одностадийной технологии.

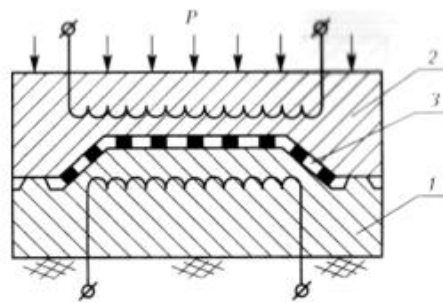


Рис. 5. Формирование прессованием: 1 и 2 нижняя и верхняя части пресс формы, 3 – листовый формовочный материал

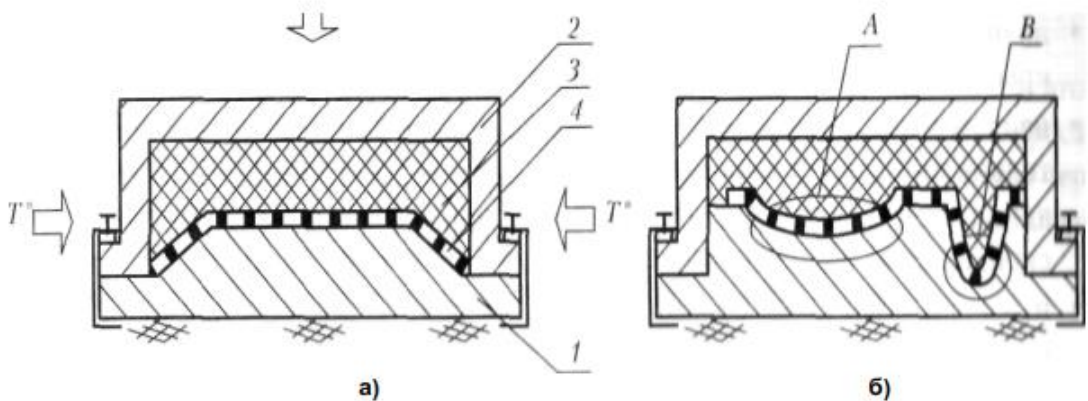


Рис. 6. Термокомпрессионное формирование: 1 и 2 нижняя и верхняя части контейнера, 3 – кремнийорганическая резина, 4 – препрег

### 1.3.4. Намотка

Одним из самых перспективных методов формования изделий из стеклопластика и подобного типа инертных волокон является метод намотки. Сущность метода состоит в том, что на вращающуюся оправку наматывается армирующий материал (рис. 7). Материал наматывается в виде полос, плотно примыкающих друг к другу, либо перекрывающимися слоями. Как и в случае метода прессования, полимерное связующее наносится либо во время намотки, либо наполнитель предварительно пропитывается перед началом процесса (рис. 8).

К достоинствам данного метода можно отнести высокие скорости проведения процесса, контроль за дозированием полимерного связующего, что позволяет получать изделия с малым весом и высокими прочностными характеристиками, а также сравнительно низкую себестоимость производства.

Недостатком метода можно считать ограничение ассортимента армирующих материалов, который сводится практически к двум типам волокон – углеродным и стеклянным. Другим недостатком является получение изделий только определенной формы – цилиндр, труба, тьюбинг.

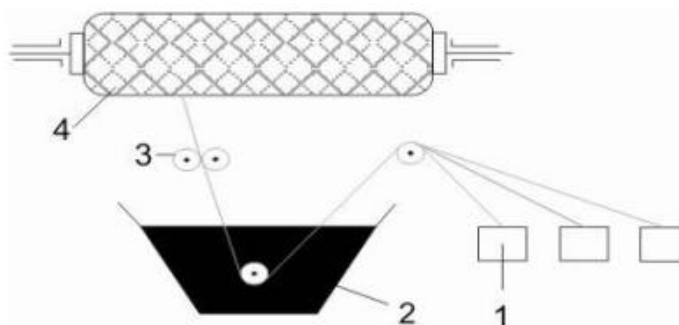


Рис. 7. Схема «мокрой» намотки: 1 – шпулярник с армирующим волокном, 2 – пропиточная ванна со связующим, 3 – отжимные ролики, 4 – вращающаяся оправка

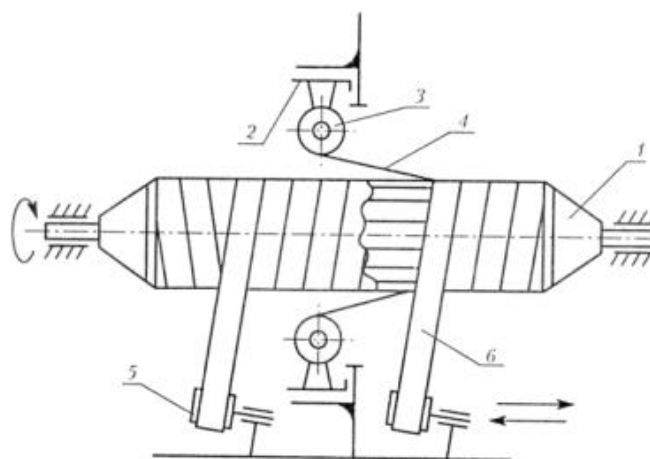


Рис. 8. Схема продольно-поперечной намотки: 1 – отправка, 2 – вертлог, 3 – шпули, 4 – ленты продольной укладки, 5 – поперечные раскладчики, 6 – ленты поперечной намотки

### 1.3.5. Вакуумное формование

Сущность метода заключается в комбинации ручного формования и вакуумирования. После пропитки вручную армирующего наполнителя связующим, материал помещают в вакуумный мешок (рис. 9). В нем создается остаточное давление, которое способствует удалению излишков смолы и воздуха из структуры ПКМ. Преимуществом данной технологии является равномерность распределения смолы, отсутствие воздушных пузырей в матрице и получение наиболее гладкой поверхности материала. Среди недостатков можно отметить требования к обеспечению безопасности производства и высокой квалификации персонала, что увеличивает себестоимость производства продукции.

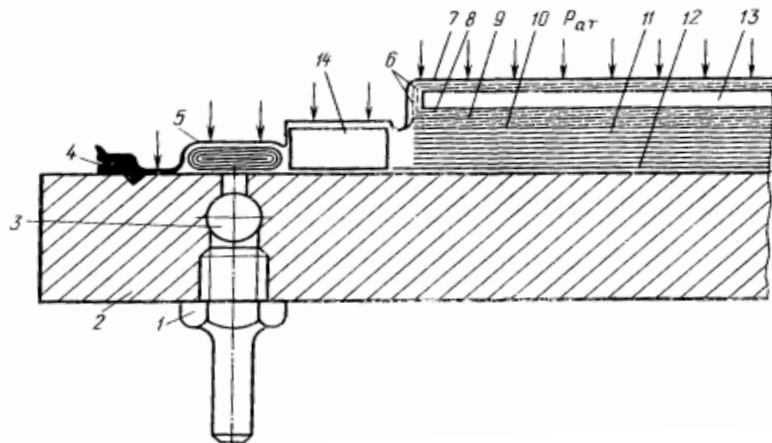


Рис. 9. Вакуумное формование с эластичной диафрагмой: 1 – штуцер для присоединя вакуума, 2 – плита формы, 3 – коллектор для удаления воздуха, 4 – уплотнение диафрагмы, 5 – боковое выпускное отверстие, 6 – слой с вентиляционными отверстиями, 7 – диафрагма, 8 – перфорированные слои, 9 – впитывающие слои, 10 – разделительная ткань, 11 – слоистый пластик, 12 – внешний слой, 13 – промежуточная ткань, 14 – эластичная перегородка

### 1.3.6. Вакуумная инфузия

Развитием технологии вакуумного формования является метод вакуумной инфузии, отличительной особенностью которого является создание разрежения внутри вакуумного мешка, что и является движущей силой процесса пропитки армирующего наполнителя. Метод позволяет добиться лучшего соотношения наполнитель/полимерная матрица, что положительно сказывается на прочностных и эксплуатационных характеристиках полимерного композитного материала, при одновременной экономии связующего за счет его рационального использования. Обеспечивается высокое качество пропитки, возможность изготовления изделий значительных размеров и безопасные условия труда.

Недостатками метода является использование сложного вакуумного оборудования, использование широкого ассортимента вспомогательных

материалов, высокие требования к квалификации персонала и, как следствие, увеличении себестоимости продукции.

### 1.3.7. Формование с подачей смолы

Метод получения полимерных композитных материалов основан на том, что в форму (пенопласта с сообщающимися порами) с наполнителем связующее подается под давлением иногда в сочетании с вакуумированием. Несмотря на то, что данная технология позволяет обеспечивать хорошую пропитку армирующей компоненты, отсутствие воздушных пузырьков и минимизацию отходов материалов, широкого распространения не получила из-за высоких затрат на оборудования для создания давления (рис. 10).

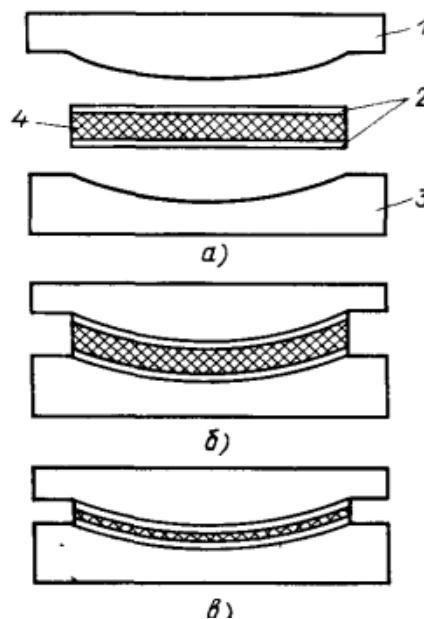


Рис. 10. Схема процесса формования «вспененной ёмкостью»: а – форма открыта, б – форма частично закрыта, в – форма полностью закрыта, пенопласт сжат, смола выжимается в наружные слои; 1 – пуансон, 2 – сухой волокнистый армирующий материал, 3 – матрица, 4 – пропитанный смолой пенопласт

#### 1.4. Поточные способы получения композитных материалов

Пултрузия – практически единственный способ получения полимерных композитных материалов непрерывным способом.

Возможна реализация двух вариантов данной технологии. Классический, который заключается в протягивании нитей армирующей компоненты через полимерное связующее с последующим формированием готового изделия или препрега (рис. 11). Второй вариант заключается только в получении препрега за счет пропитки текстильного наполнителя – нетканого, трикотажного, или тканого полотна.

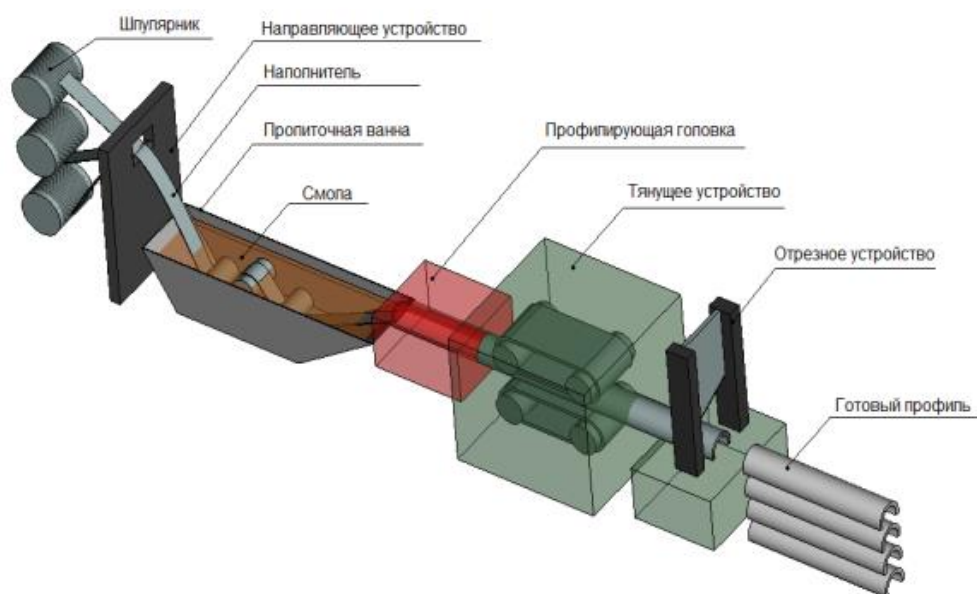


Рис. 11. Схема процесса пултрузии

Реализация второго варианта возможна на линии, включающей пропиточную секцию и секцию термической обработки. В качестве секции для пропитки могут быть использованы различные варианты двух- или многовальных плюсовых вертикального или горизонтального исполнения, в том числе с гравированными валами, сагрегированные с контактными, конвективными или радиационно-термическими установками для фиксации

связующего [35,39,40]. Поточные линии могут быть оснащены различными средствами интенсификации процесса пропитки.

Особенность пултрузионной переработки состоит в том, что в полученных изделиях весь наполнитель ориентирован только в одном направлении, совпадающем с вектором протяжки. Следовательно, по свойствам такие изделия сильно анизотропны. Их прочность в продольном направлении существенно выше, чем в поперечном. В то же время деформируемость изделия в поперечном, по отношению к их геометрической оси, направлении существенно выше, чем в продольном. Это качество может быть использовано как в технологических, так и в эксплуатационных целях. Изделия, полученные пултрузией, по свойствам могут превосходить детали, сделанные традиционными методами формирования. Более высокая стоимость оборудования компенсируется рядом преимуществ, характерных для этого процесса, строгим контролем натяжения и ориентации волокон, поддержанием постоянного содержания волокна в композите.

Армированный стеклопластиковый профиль, полученный с помощью пултрузии - строительный композитный материал XXI века с уникальным сочетанием свойств дерева, металла, полимера: высокой прочностью, низкой теплопроводностью, устойчивостью к агрессивным средам и резким перепадам температур, био-, влаго-, атмосферостойкостью. Результаты исследований показали [40], что долговечность конструкций с применением стеклопластика и стеклопластиковых профилей значительно превосходит срок службы аналогичных конструкций из других материалов. Стеклопластиковый профиль, полученный с помощью пултрузии, находит широкое применение в изготовлении окон, витражей и ограждающих конструкций, облицовки и арматуры электротехнического профиля, стеклопластиковой арматуры для бетона, элементов крепежных дюбелей, несущих (силовых) конструкций. Разработана технология производства стеклопластиковых труб и освоено оборудование для их производства. Такие



трубы конкурентоспособны со стальными, чугунными, полиэтиленовыми, ПВХ - трубами. При этом стеклопластиковые трубы имеют такие значительные преимущества как высокая удельная прочность: высокая коррозионная стойкость, надежность и долговечность (50-50 лет); отсутствие "зарастания" внутренней поверхности и разрушения при замерзании в них воды. Затраты на монтаж и обслуживание таких труб минимальны, высокая ремонтпригодность. Стеклопластиковые трубы пригодны для всех видов трубопроводов: холодного и горячего водоснабжения, канализации, химических трубопроводов, водостоков, мусоропроводов, вентиляции и др.

## **Глава2. СИНТЕЗ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОЙ НА ОСНОВЕ ТЕКСТИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

### **2.1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ЧИСЛЕННОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «КАПИЛЛЯРНО ПОРИСТАЯ АРМИРУЮЩАЯ СТРУКТУРА - МАТРИЦА»**

#### **2.1.1. Разработка концептуальной модели процесса взаимодействия армирующей структуры - текстильного материала с матрицей как системы**

Разработанная компьютерная модель, которая позволяет исследовать переходные состояния процесса массообмена при обработке текстильного материала в инфузионной-пропиточной машине и оптимизировать параметры этого процесса.

Оптимизация функции селективности армирующей структуры композита, как мезофльтрационной перегородки по отношению к параметрам капиллярно-пористой системы, является начальным этапом синтеза проблемно-ориентированной численной модели, обеспечивающей прогнозирование заданных конструктивных параметров синтезируемого композитного материала. Это особенно важно с точки зрения оценки процесса массопередачи при импрегнировании вязкой матрицей наполнителя ПКМ в условиях гидравлического вакуума, создаваемого в армирующей КПС и обеспечивающего возникновение движущих сил для заполнения ее объема. При этом создается возможность учесть влияние динамического воздействия на процесс синтеза ПКМ на основе моделирования переходных состояний системы в функции входных параметров процесса массопередачи.

Вышеизложенное является логическим звеном в процессе создания компьютерной модели переходных состояний процесса массообмена при обработке текстильного материала в инфузионной-пропиточной машине. Концептуальная модель взаимодействия с рабочим раствором-матрицей должна воспроизводить логику функционирования исследуемой технической системы, ее структуру и свойства элементов, образующих эту систему, её входных и выходных параметров. При этом нет необходимости для проникновения в суть механизма технологических явлений, происходящих как в самом [107] техническом объекте (технологическая машина, устройство), так и в обрабатываемом волокнистом материале [108, 109].

Для такого рода анализа нами использовано принятое в кибернетике понятие «черного ящика» [111]. На рис. 12 представлена концептуальная модель процесса взаимодействия волокнистого материала [107] – армирующей структуры (АС) с рабочим раствором - матрицей, работающим в динамическом режиме внешнего нагружения, в которой инфузионная машина и выступает в роли «черного ящика».

Воспользуемся понятием «черного ящика» и рассмотрим входные и выходные параметры исследуемой системы [113].

Входными параметрами на рассматриваемом уровне детализации системы в диссертационной работе приняты:

$I_1$  – геометрические характеристики рабочих органов – рабочая ширина исполнительных органов устройства  $b$ , диаметры  $D$  рабочей части транспортирующих роликов и диаметры  $d_i$  их цапф (случай непрерывного процесса инфузии), моменты инерции поперечного сечения ролика; компоновка устройства, технологическая схема расположения транспортирующих роликов;

$I_2$  – кинематические параметры устройства – окружная  $V$  и угловая  $\omega$  скорости приводного органов, их угловое ускорение,  $\varepsilon$ ;

$I_3$  – динамические параметры рабочих органов и исполнительных механизмов устройства – массы, моменты инерции масс, динамическая жесткость роликов и остова [107];

$I_4$  – нагрузки, создаваемые в устройстве:  $I_{41}$  – динамические нагрузки – дополнительная внешняя динамическая составляющая статической нагрузки  $P_f$  при динамическом режиме нагружения исполнительных органов, момент  $M_H$  пары сил от их общей неуравновешенности;

$I_5$  – свойства армирующей структуры (текстильного материала) – геометрические характеристики: ширина полотна АС  $a$ , м; длина полотна АС  $b$ , м; его толщина в свободном состоянии  $h_{тк}$ , м; влажность текстильного материала  $\delta$ , %;

$I_6$  – скорость транспортировки полотна  $V$ , м/с (в непрерывном режиме работы).

К выходным параметрам следует отнести:

$O_1$  – величину поверхностью взаимодействия АС с площадью зоны питания матрицы – капиллярно-пористой структуры, характеризуемой статическим  $O_{11}$  и динамическим состоянием  $O_{12}$  системы;

$O_2$  – угол контакта (обхвата) полотном АС рабочей поверхности транспортирующего ролика вдоль образующей и по его окружности;

$O_3$  – общие силовые характеристики, определяемые величиной натяжения полотна АС, приходящееся на создание удельной технологической нагрузки  $O_{31}$ , необходимой для создания заданных компрессионных параметров АС, и гидравлического давления  $O_{32}$  в матрице, необходимого для создания гидродинамического напора в капиллярно-пористой структуре АС;

$O_4$  – кинематическая вязкость матрицы, заполняющей капиллярно-пористую структуру, АС,  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с;



Рис. 12. Концептуальная модель системы непрерывного взаимодействия «Текстильная армирующая структура – машина пропиточная»

$O_5$  – температура жидкости в капиллярно-пористой АС,  $t$ , °С;

$O_6$  – скорость фильтрации матрицы  $V_{\phi}$ (м/с) в АС; коэффициент фильтрации ткани  $k_{\phi}$ , (м/с);

$O_7$  - геометрические параметры поперечного сечения АС с изменением его толщины - определяемые мгновенным значением толщины, деформированной - сжатой АС;

$O_8$  – качественные показатели воздействия на АС, характеризующиеся выходной (остаточной) влажностью АС – равномерностью пропитки - инфузии капиллярно-пористой структуры - АС по ее объёму, а также показателей, характеризующих достижение соответствующих конструктивных, функциональных эффектов.

Сформированная нами концептуальная модель процесса

взаимодействия АС с рабочим раствором матрицы и рабочими органами инфузионной – пропиточной – импрегнирующей машины, воспроизводящая гидродинамическое воздействие на обрабатываемую текстильную АС, [114] без усложнения и излишней на данном этапе постановки задачи детализации системы воспроизводит логику функционирования рассматриваемой технической системы и дает возможность перейти к дальнейшему решению поставленных задач исследования [107].

## **2.2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СРЕДСТВ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЦЕССА ИНФУЗИИ - ИМПРЕГНИРОВАНИЯ В СИНТЕЗЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА**

В соответствие с разработанной концептуальной моделью процесса взаимодействия АС с рабочими органами инфузионной – пропиточной – импрегнирующей машины и рабочим раствором - матрицей, нами определен объект исследования, который представляет собой процесс гидродинамического воздействия на АС текстильного материала, способствующий интенсификации процесса инфузии - импрегнирования между матрицей и АС.

Традиционным решением обозначенных задач является использование фундаментальных закономерностей теории процесса массопереноса, которые формулируются в виде дифференциальных уравнений в частных производных [115-117]. Недостатком такого метода является то, что в каждом конкретном случае дифференциальные уравнения требуют индивидуальных подходов к их решению. Решения при этом всегда носят частный характер, соответствуя фиксированным значениям параметров системы и начальных условий. Поэтому для всестороннего анализа исследуемой системы приходится многократно моделировать ее процесс функционирования, варьируя значения

начальных данных. Это существенно снижает универсальность таких моделей, их детализацию и в значительной степени влияет на полноту значений и точность результатов выходных данных. Моделирование процесса массопереноса значительно усложняется, когда процесс является нестационарным [107].

Пакет Simulink является инструментальным приложением к системе MatLab. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, из библиотеки стандартных блоков создается модель исследуемого объекта и осуществляются расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю достаточно знаний той предметной области, в которой он работает. Пакет Simulink является достаточно самостоятельным инструментом системы Matlab, реализующим технологию блочного моделирования. Следует отметить, что доступ к функциям Matlab и другим его возможностям остается открытым и их можно интегрировать с функциями Simulink, например, LTI-Viewer приложения Control System Toolbox –пакета для разработки систем управления.

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков. В ходе моделирования имеется возможность наблюдать за процессами, исследуемыми в системе. Simulink представляет собой мощный и точный способ моделирования процесса массопереноса во времени, дающий возможность решения поставленной задачи с требуемым уровнем детализации, вычислительной эффективностью и скоростью расчета [107].

Обязательным условием успешного проведения аналитических исследований геометрической модели объекта ПКМ методом конечных элементов является построение адекватной геометрической модели по его входным параметрам. При этом базовая модель «Гибкой нити» Пирса

считается началом моделирования по геометрическим параметрам нитей [108], которая предполагает, что нити, имеющие круглое поперечное сечение [109], обладают высокой степенью несжимаемости. Средствами программных процедур необходимо выполнить обработку заданных геометрических параметров нитей основы и утка, углов их плетения. При этом возможно использовать среду динамического моделирования сложных технических систем средствами Simulink, как инструмент для модельно-ориентированного проектирования, в которую заложены математические процедуры и ключевые переменные, получаемые средствами системы MatLab [109]. Для этого должен быть разработан алгоритм синтеза 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композитного материала с использованием созданной программной среды для расчета глобальных переменных и использующей методологию численного объектно-ориентированного моделирования таких свойств программируемой системы, как инкапсуляция и обобщённое программирование (полиморфизм) – позволяющие обобщить информационные ресурсы для синтеза и анализа 3D-модели, управляющие параметры которой выражены средствами глобальных переменных.

Таким образом, полученная 3D-модель синтезированной тканой структуры в целях идентификации КМ, может быть трансформирована для получения задаваемых параметров анализируемой многокомпонентной информационной системы путем варьирования значений управляющих переменных, соответствующих решаемой задаче.

В результате, необходимо решить задачу по созданию и реализации программного комплекса, обеспечивающего численный параметрический анализ геометрической модели армирующей структуры композита с возможностью её последующего пространственного моделирования и корректировки полученной модели [110].

Таким образом, помимо использования широко применяемого программного обеспечения при решении научных и инженерных задач,



возникает необходимость в разработке 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 [111], например, MatLab и SolidWorks, с функциями управления значениями параметров 3D-модели двумерной элементарной ячейки тканой армирующей структуры ПКМ, являющихся основой построения 3D-модели в системе твёрдотельного моделирования путем варьирования значений из блока управляющих переменных и внешней базы данных, обеспечивающих получение детальной информации о тканой структуре ПКМ и оценить уровень погрешности модельного выхода 3D-модели параметров тканой структуры относительно физического объекта – армирующей структуры ПКМ.

### **2.3. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЯ МАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ И МАТРИЦЫ КАК ВЯЗКОЙ КОМПОНЕНТЫ**

Эффективность пропитки текстильной АС в пропиточных - инфузионных машинах зависит от качественных и количественных показателей массообменных процессов, протекающих в волокнистой капиллярно-пористой структуре обрабатываемого материала. Определённый интерес представляют переходные состояния массообменного процесса, имеющие место в зонах контакта с рабочими органами технологического оборудования: натяжение АС, вакуум в рабочей-технологической зоне. Возникающие при этом дополнительные напряжения в волокнистой структуре АС создают сопротивление движению жидкости через нее.

В результате является актуальным необходимость разработки программного комплекса для расчета переходных состояний процесса массопереноса при инфузии – пропитки АС и оценки финишного состояния исследуемой системы методами компьютерного моделирования.

Для оценки фильтрующих свойств пористых материалов, работающих в системе синтеза структуры композитного материала на основе капиллярно-пористой структуры, используем основной закон фильтрации (Закон Дарси), который выражается уравнением

$$V = k_{\phi} \frac{dH}{dL}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость фильтрации через пористый материал, м/с;

$k_{\phi}$  – коэффициент фильтрации материала

$H$  – гидродинамический напор, м;

$L$  – путь, пройденный частицами жидкости при фильтровании, м.

В уравнении (1) перейдем к переменной по времени  $t$ , для этого представим дифференциал  $dL$  в виде  $dL = Vdt$  в результате получим

$$V^2 = k_{\phi} \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

Производительность процесса фильтрования определяется как

$$Q = VS \quad (3)$$

где  $S$  – площадь поверхности фильтрующего слоя, м<sup>2</sup>.

Основной закон фильтрации теряет силу, если скорость фильтрации превышает свое критическое значение  $V_K$

$$V_K = \frac{v(0,75m+0,23)Re_k}{d} \quad (4)$$

где:  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  
 $m$  – пористость фильтрующей перегородки;  
 $Re_k$  – число, аналогичное числу Рейнольдса,  $Re = (7...9)$ ;  
 $d$  – приведённый диаметр пористой фильтрующей перегородки, м.  
Напор  $H$  определяется в соответствии с выражением

$$H = \frac{p}{\rho g} \quad (5)$$

где  $p$  – давление в насосе, Па;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

#### **2.4. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ КАПИЛЛЯРНО ПОРИСТОЙ АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА В ИНФУЗИОННОЙ ВАННЕ**

Реализация приведенной в разделе 2.3 последовательности вычислений с использованием процедур системы Matlab явилась основой для разработки Программного комплекса для расчета процесса массопередачи при пропитке текстильного материала АС [108].

С целью численного анализа степени пропитки, характеризующего процесс массопереноса в процессе инфузии, в диссертационной работе выполнен ряд модельных экспериментов с использованием разработанного Программного комплекса. Исходными данными для расчета, характеризующими процесс инфузии, приняты: натяжение полотна  $S_0$  (Н), диаметр ролика  $D$  (мм), частота вращения ролика  $n$  (об/мин), мощность привода ролика  $N$  (кВт), ширина  $b$  (мм) и толщина  $\delta$  (мм) полотна обрабатываемого текстильного материала. Численные значения исходных данных приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ткани и технические характеристики оборудования

Исходные данные	Значение
Натяжение ткани $S_0$	15 (Н)
Диаметр ролика $D$	200 (мм)
Частота вращения ролика $n$	100 (об/мин)
Мощность привода ролика $N$	10 (кВт)
Ширина полотна $b$	1,5 (м)
Толщина полотна $\delta$	1,5 (мм)

В ходе модельного эксперимента были выявлены зависимости:

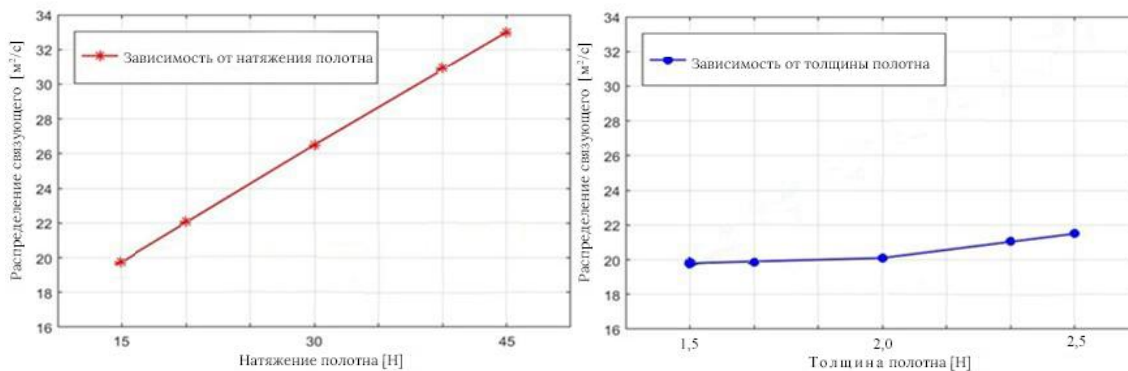
- изменения значений степени диффузии  $W$  (распределения связующего,  $\text{м}^2/\text{с}$ ) от изменения натяжения полотна  $S_0$  (первый модельный эксперимент),
- толщины тканого полотна  $\delta$  (второй модельный эксперимент) и
- частоты вращения ролика  $n$  (третий модельный эксперимент).

Для каждого параметра были выбраны по три значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Результаты модельного эксперимента

Изменяемый параметр	Натяжение тканого полотна, Н				
	15	20	30	40	45
Степень остаточной влажности, %	19,8	22	26,5	30,5	33
Изменяемый параметр	Толщина тканого полотна, мм				
	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5
Степень остаточной влажности, %	19,8	20	20,1	20,5	21,5



а)

б)

Рис. 13. Иллюстрация процесса диффузии в капиллярно-пористой структуре на примере воды при фильтрации, а) зависимость от натяжения полотна б) зависимость от толщины тканого полотна

Из графика видно, что увеличение толщины текстильного материала приводит к повышению степени распределения связующего, но к менее значительному, это объясняется тем, что текстильный материал с большей толщиной при одинаковой ширине содержит в свой капиллярно-пористой структуре большее количество фильтруемого связующего. При изменении толщины полотна с 1,5 мм до 2,5 мм степень диффузии увеличилась лишь на 1,7%.

Таким образом, разработанный нами программный комплекс для расчета процесса массопередачи при пропитке расправленного текстильного материала [112] даёт возможность оценить степень инфузии в зоне взаимодействия АС с исполнительными органами технологического оборудования и определить технологические параметры процесса для наиболее эффективной пропитки.

## **2.5. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУР МЕТОДАМИ ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ CAD-СИСТЕМАХ**

Проблемы синтеза конструкционных композитных материалов связаны с необходимостью прогнозирования и технологического обеспечения их функциональных свойств.

Методика проектно-ориентированного моделирования применительно к поставленной проблеме сочетает в себе: достижение заданных показателей точности определения результатов синтеза композитного материала; их согласованность с современными стандартами и методологией адаптации этапов реализации проекта, обусловленным широким спектром задаваемых физико-механических параметров материала-объекта; входные параметры условий функционирования; гибкость в применении для проектирования широкого класса компьютерных систем, реализующих технологии численного моделирования, для различных типов объектов с разработкой научных основ прогнозирования характеристик композитных систем с учётом реологии полимерной матрицы и волокнистого наполнителя на макро-, мезо-, и микроуровне и компьютерном моделировании nano-технологических процессов, обеспечивающих гарантии качества результатов проектирования-синтеза и преемственность результатов, накопленных в ходе решения предшествующих задач [116].

В связи с этим актуальной задачей является разработка методологии синтеза композитных материалов из капиллярно-пористых структур на основе систем управления процессами в проектно-ориентированном моделировании в интегрированных CAD-системах с привлечением информационного обеспечения из сформированной области знаний [117].

Теоретически обоснованные и точные результаты численного синтеза композитной системы зачастую основываются на недостоверной информации,

полученной на основе результатов невоспроизводимых экспериментальных аналитических действий.

Основываясь на принципах формирования композитных структур, отражающих их функциональные характеристики, отметим три этапа. Первый этап – геометрический, обуславливающий формирование армирующей компоненты прототипа изделия, а именно синтез 3D-модели структур, с анализом статических и динамических режимов нагружения отдельных объемов армирующей компоненты изделия. Второй этап – определение и анализ направленности волокон в реальных волокнистых структурах технического назначения с учётом влияния пиксельной характеристики цифрового изображения волокнистой структуры на точность результатов определения структурных параметров их компьютерного анализа [118].

Третий этап заключается в визуализации адгезионного взаимодействия компонентов композита методами молекулярного моделирования, создающего предпосылки к реализации процедур прогнозирования трибомеханических параметров в слоях, формирующих композитный материал как единый объект [119].

В основу завершающего этапа, определяемого как метод динамического синтеза, сопровождаемого анализом численной феноменологической 3D-модели прототипа изделия, заложены методы идентификации и верификации моделей функциональных параметров изделия с целью формирования массива данных, обеспечиваемые методами интеграции систем проектно-ориентированного моделирования, который принят за основу создания обобщенной стохастической модели разрабатываемого объекта по заданным функциональным характеристикам прототипа изделия.

Таким образом, дальнейшее развитие технологий синтеза композитных материалов из капиллярно-пористых структур методами интеграции систем в технологиях проектно-ориентированного моделирования, в основу которых

заложены этапы численного анализа структурных, молекулярных, динамических и стохастических моделей, является основой успешного решения задач создания композитной структуры и позволяет избежать погрешностей, обусловленных наличием упрощений, допущений, заложенных в широко используемых, при проектировании волокнистых структур в композитных материалах, САД-системах.

## **2.6. СИНТЕЗ 3D-МОДЕЛИ ТКАНОЙ АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ТЕКСТИЛЬНОГО КОМПОЗИТА СРЕДСТВАМИ МЕТОДОЛОГИИ ЧИСЛЕННОГО ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Разработанный алгоритм синтеза 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композитного материала с использованием разработанной программной среды для расчета глобальных переменных и использующей методологию численного объектно-ориентированного моделирования таких свойств программируемой системы, как инкапсуляция и обобщённое программирование (полиморфизм) – позволяющие обобщить информационные ресурсы для синтеза и анализа 3D-модели, управляющие параметры которой выражены средствами глобальных переменных. Таким образом, полученная 3D-модель синтезированной тканой структуры в целях, например, идентификации системы, может быть трансформирована для получения задаваемых параметров анализируемой многокомпонентной системы путем варьирования значений управляющих переменных, соответствующих решаемой задаче [120,121].

Целью разработки является создание алгоритма для формирования программных средств, позволяющих определить численные значения управляющих параметров синтезируемой геометрической модели тканой структуры, формирующей основу дальнейшего создания трехмерной



твердотельной модели тканого наполнителя полимерного композитного материала.

Традиционно для построения трехмерных моделей тканой структуры используются геометрические модели, разработанные применительно к нитям, образующим эту структуру, с круглым, эллиптическим, линзовидным сечениями [123]. Ранее нами уже были разработаны их трехмерные твердотельные модели [124]. Однако, эти модели были реализованы для ограниченного набора геометрических параметров армирующей структуры и не позволяли выполнять их трансформацию без редактирования самих моделей.

Такой подход к моделированию тканых армирующих структур ПКМ оказался неэффективным с точки зрения трудоёмкости решения задач моделирования и проектирования изделий из ПКМ в широком диапазоне изменяющихся параметров как самих структур, так и физико-механических характеристик волокнистых материалов.

Для математического описания моделируемой тканой армирующей структуры полимерного композита на данном этапе была применена параметрическая модель с линзовидным поперечным сечением нити [123], эта расширенная модель (лентикулярное поперечное сечение) сохранила все допущения, использованные с аналогичными сечениями, за исключением формы поперечного сечения и рассматривается как производная проанализированных моделей. т.к. она имеет более точное математическое описание и соответствие геометрическому представлению реальной тканой структуры.

Поэтому через приведенные уравнения можно получить математическое описание и для других видов моделей, армирующих структур ПКМ. Система уравнений для линзовидной геометрической модели, использованной в настоящей работе, имеет вид [123]:

$$\begin{aligned}
 h_o + h_y &= b_o + b_y \\
 p_y &= (l_o - D_o \theta_o) \cos \theta_o + D_o \sin \theta_o; \\
 h_o &= (l_o - D_o \theta_o) \sin \theta_o + D_o (1 - \cos \theta_o); \\
 D_o &= 2R_o + b_y; \\
 e_y &= a_y / b_y; \\
 l_y &= D_o \theta_o,
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где,  $h_o, h_y$  - высота полуволны (мм);  $a_o, b_o$ —ширина/высота линзовидного сечения нити (мм);  $D$  – диаметр кривизны оси изогнутой нити (мм);  $p_o, p_y$ - расстояние между нитями основы и утка соответственно (мм);  $l_o, l_y$  - длины нитей основы и утка;  $\theta_o, \theta_y$  - углы переплетения нитей основы и утка (град.),  $e$  – коэффициент смятия нити. Индексы ‘о’ и ‘у’ в приведенных выше переменных относятся к нитям основы и утка соответственно [123].

Для разработки алгоритма по расчету глобальных управляющих переменных в качестве среды и реализации численной модели использована система MatLab, обладающая возможностью математического анализа и передачи информационных ресурсов для дальнейшего анализа обработанных данных в CAD/CAM-комплекс твердотельного моделирования SolidWorks [125], обладающий рядом таких достоинств, как возможность тонкой настройки сетки; опциональные модули, позволяющие расширить базовые функции; а также возможность системной интеграции с другими внешними приложениями и позволяющий организовать итерационные взаимодействия действующих твердотельных моделей со средой MatLab.

Имитационная блочная модель Simulink (рис. 14), состоящая из ключевых пиктограмм блоков переменных и пиктограмм блоков выполняемых математических операций осуществляющая решение системы уравнений для элементарной периодической ячейки. Пиктограммы блоков объединены связаны соединительными линиями – связями, после решения

системы данные поступают в блок отображения одновременно с блоком переменной. Данные переменной автоматически передаются в среду MATLAB, в качестве решения системы. В среде MATLAB происходит формирование базы данных и исследование точности разработанных алгоритмов расчета [141]. Таким образом, разработанная модель с помощью системы блочного моделирования Simulink выполняет обработку заданных параметров и вычисление основных параметров нитей.

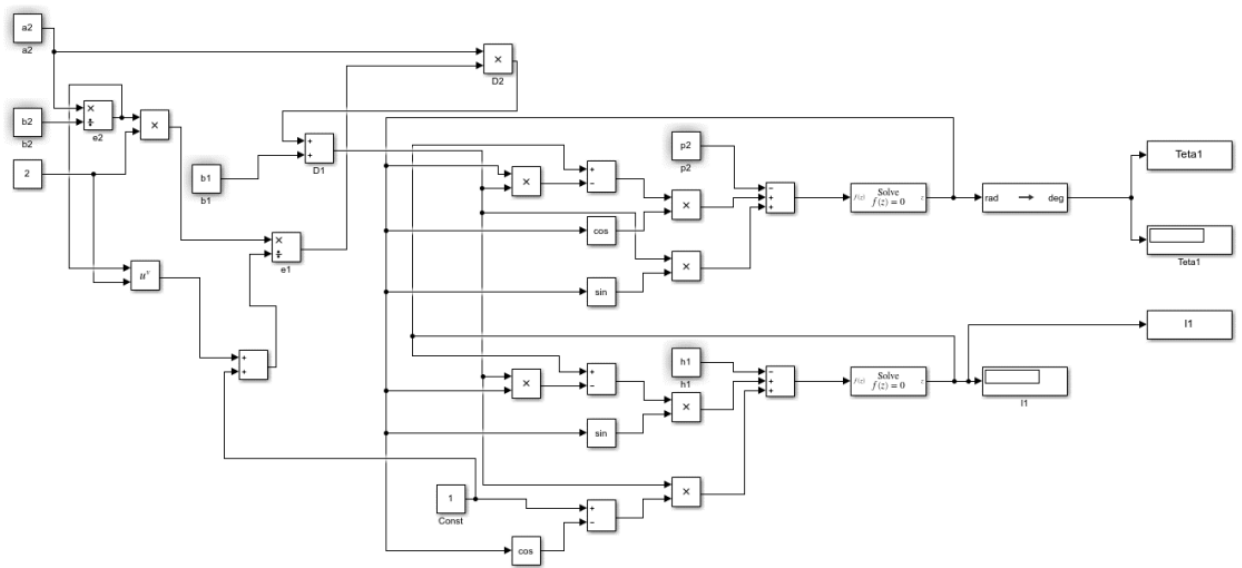


Рис. 14. Имитационная блочная модель Simulink, где индекс 1 соответствует нити основы, 2 нити утка

Ключевые структурные этапы, образующие блок-схему (рис. 15), являющуюся основой для реализации вычислительных процессов, обеспечивающих процедуры обработки заданных значений основных параметров нитей и обеспечение трансляции результатов предварительных вычислений во внешнюю базу данных, представляют:

- операции по анализу данных;
- обработка данных;
- построение трехмерной модели тканой структуры.

При этом, дополнительное преобразование полученных результатов под спецификации программного комплекса SolidWorks осуществляется перед загрузкой во внешнюю базу данных.

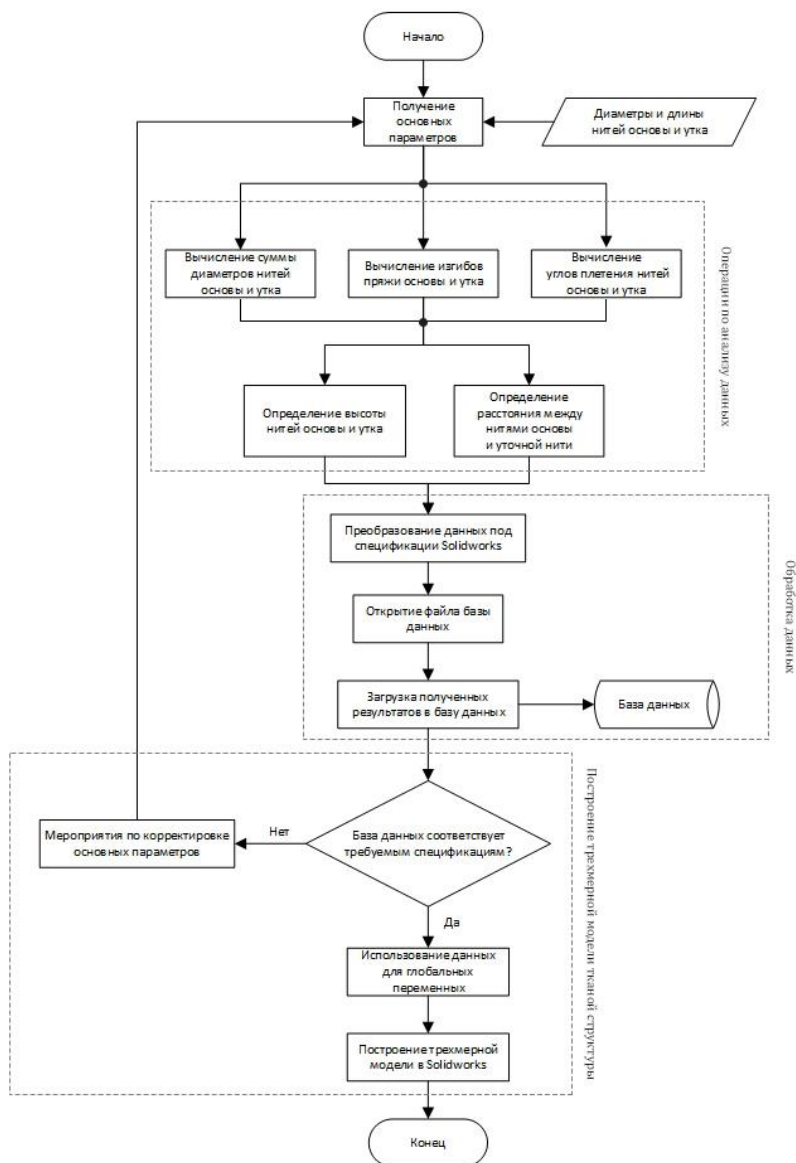


Рис. 15. Алгоритм обработки основных параметров нитей и обеспечения трансляции результатов предварительных вычислений во внешнюю базу данных

По приведенным выше зависимостям системы уравнений (6) геометрической модели тканой армирующей структуры концептуальная параметрическая 3D-модель (рис. 16) представлена нами в виде двумерной

элементарной ячейки, которая построена путем наложения линейных геометрических параметров нитей и их поперечных сечений для получения заданной конфигурации.

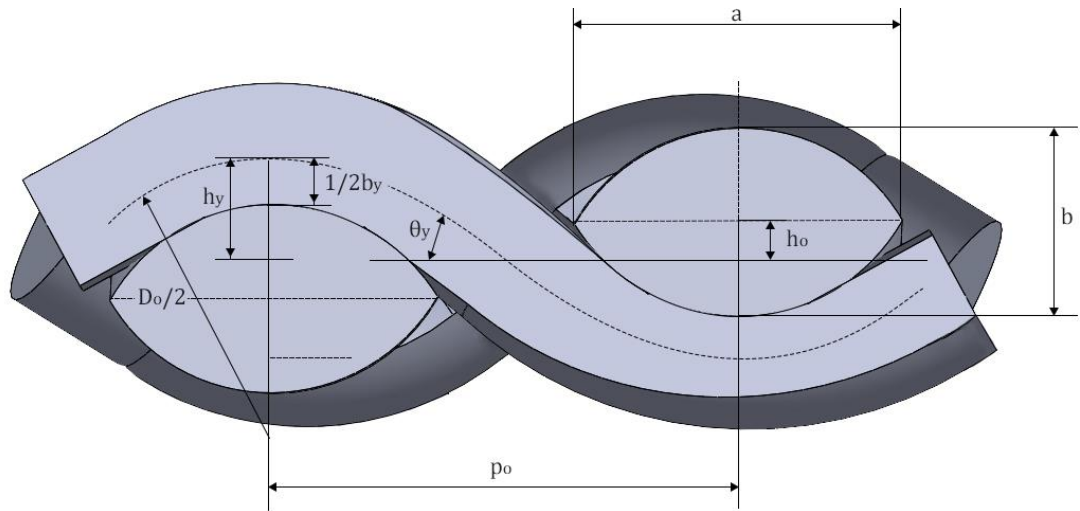


Рис. 16. Параметрическая 3D-модель двумерной элементарной ячейки тканой структуры

На рис. 17 показаны аксонометрические проекции параметрических 3D-моделей элементарной ячейки тканой армирующей структуры ПКМ. Для топологической оптимизации геометрических параметров моделей, таких как длина нити, радиусы окружностей и т.д., использовались глобальные управляющие переменные, объединяющие заданные размеры модели через математическое уравнение (6). Глобальные управляющие переменные могут использоваться для управления уравнениями и измерениями, располагая свойством двунаправленности, чем обеспечивается взаимосвязь между определённой глобальной переменной и величинами соответствующих переменных [142].

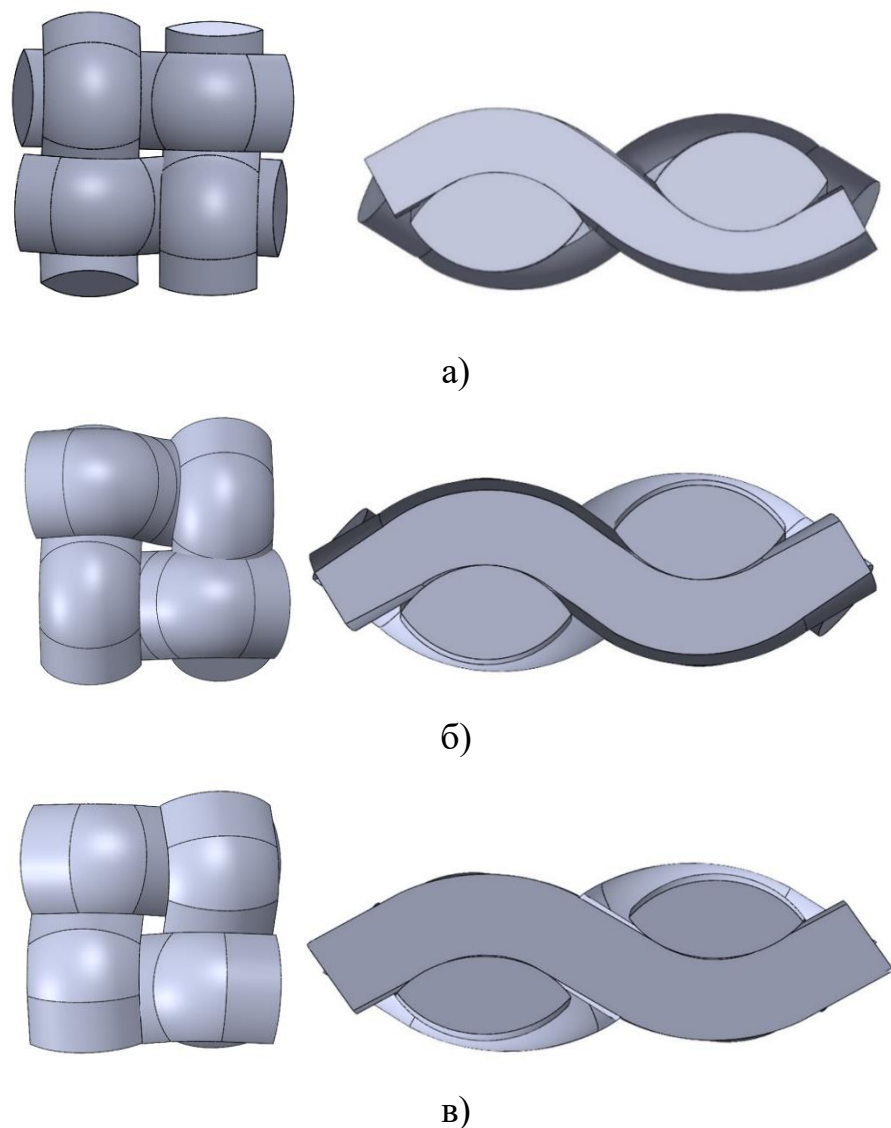


Рис. 17. Фронтальные проекции/проекции в разрезе параметрических 3D-моделей, с абстрактными данными для моделирования для определения работоспособности моделей, для модели: а) а - 8 мм; б - 5 мм;  $p_o, p_y$  - 10 мм;  $h_o, h_y$  - 7.5 мм, для модели б) а - 6 мм; б - 3,5 мм;  $p_o, p_y$  - 8 мм;  $h_o, h_y$  - 2.3 мм, для модели в) а - 14 мм; б - 10 мм;  $p_o, p_y$  - 16 мм;  $h_o, h_y$  - 5.6 мм

В соответствии с геометрическими значениям параметрической 3D-модели двумерной элементарной ячейки тканой армирующей структуры ПКМ построены 3D-модели в системе твёрдотельного моделирования SolidWorks. Применение методологии численного объектно-ориентированного

моделирования [143] на примере формирования блока глобальных управляющих переменных с возможностью системной интеграции с другими внешними приложениями и позволяющей организовать итерационные взаимодействия действующих твердотельных моделей с вычислительной системой, например, MatLab и SolidWorks, позволяет регулировать значения параметров модели применительно к конкретной решаемой задаче путем варьирования значений одной или нескольких управляющих переменных, получая детальную информацию о тканой структуре ПКМ и оценить уровень погрешности модельного выхода параметров 3D-модели относительно физического объекта – армирующего наполнителя ПКМ, воспроизведенного на технологическом оборудовании в соответствии с параметрами из блока глобальных управляющих переменных и внешней базы данных.

Таким образом, 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, например, MatLab и SolidWorks, и регулировать значения параметров 3D-модели двумерной элементарной ячейки тканой армирующей структуры ПКМ являющихся основой построения 3D-модели в системе твердотельного моделирования путем варьирования значений из блока управляющих переменных и внешней базы данных, обеспечивающих получение детальной информации о тканой структуре ПКМ и оценить уровень погрешности модельного выхода 3D-модели параметров тканой структуры относительно физического объекта – армирующего наполнителя ПКМ.

На основе полученных результатов моделирования тканых структур сделан вывод об успешном взаимодействии разработанного алгоритмического программного комплекса в виде файлов MatLab [144-146] для расчета

управляющих переменных геометрической модели тканой структуры и комплекса твердотельного моделирования SolidWorks.

## **2.7. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ТВЁРДОТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ АРМИРУЮЩИХ СТРУКТУР И РАСЧЕТА ИХ АРХИТЕКТУРЫ ПО ЗАДАНЫМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ТКАНОГО ПОЛОТНА И НИТЕЙ**

Ранее были определена актуальность разработки программного обеспечения для трехмерного моделирования волокнистых армирующих структур в плане перспектив использования для синтеза полимерных композитных материалов на основе созданных параметрических 3D-моделей [123].

Цель работы заключается в разработке программного инструмента с графическим пользовательским интерфейсом для твердотельного моделирования полимерных волокнистых армирующих структур и расчета их оптимальной геометрии по заданной топологии структурных параметров тканого полотна.

Особое внимание при разработке уделялось выбору архитектуры функционирования программного инструмента. Наиболее предпочтительной и широко поддерживаемой, среди разработчиков прикладного программного обеспечения для операционных систем Windows/Linux, является архитектура AMD64. Использование архитектуры AMD64 обеспечивает поддержку 16-битного и 32-битного кода приложений и операционных систем без необходимости их модификации или перекомпиляции. Это обеспечивает высокую совместимость программного комплекса с широким спектром существующего программного обеспечения и упрощает его внедрение в рабочую среду. Для проектирования инструмента использована программная среда Matlab, а также модуль GUIDE.



На рис. 18 показан пример графического пользовательского интерфейса программного комплекса для трехмерного моделирования волокнистых армирующих структур и расчета их геометрии по заданным структурным параметрам тканого полотна и нитей, состоящий из полей для ввода заданных структурных параметров нитей и окна для отображения получаемой 3D модели элементарной ячейки. В качестве стиля оформления графического интерфейса пользователя с целью придания уникальности оформлению разработанного нами программного комплекса использован так называемый параллакс-эффекта, определяемый в системе Fluent Design System.

При построении трёхмерной модели в графическом интерфейсе программного комплекса используются разработанные модели-шаблоны в формате \*.stl. Применение моделей в формате \*.stl дает возможность их корректировки в средах для 3D - моделирования [125].

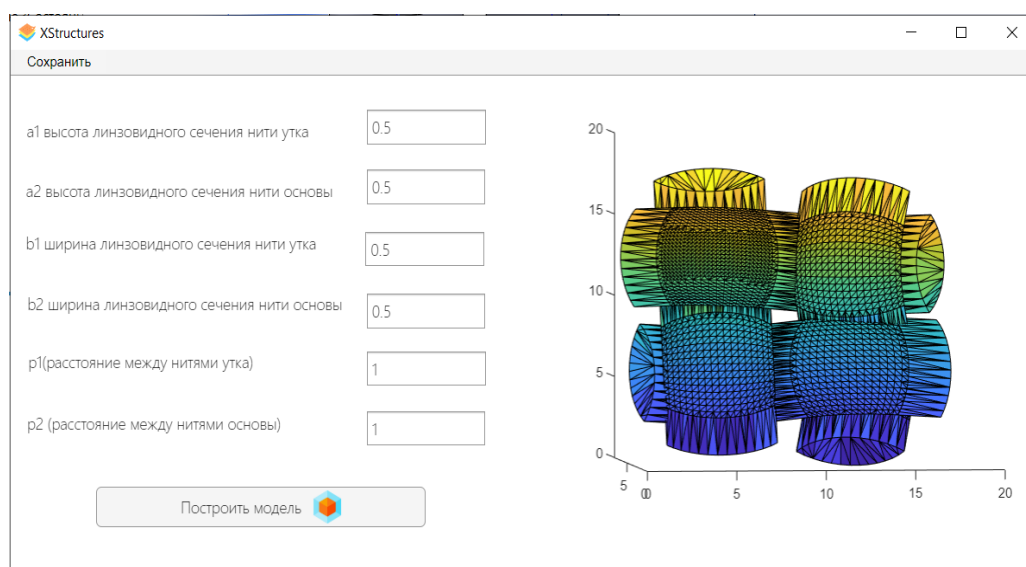


Рис. 18. Графический интерфейс программного комплекса

На рис. 18 изображен модуль коррекции параметров 3D - модели элементарной ячейки армирующей структуры по геометрическим параметрам [123,124], который позволяет производить тонкую настройку параметров полученной геометрии нитей. Для работы с 3D - моделями элементарной

ячейки в разработанном нами модуле используется формат \*.wrl. Данный формат представляет собой файл трехмерного векторного изображения, который включает данные о координатах начальной точки обзора, координатах вершин и граней, цветах поверхности, прозрачности, что позволяет выполнять детальную настройку функциональных возможностей разрабатываемой модели.

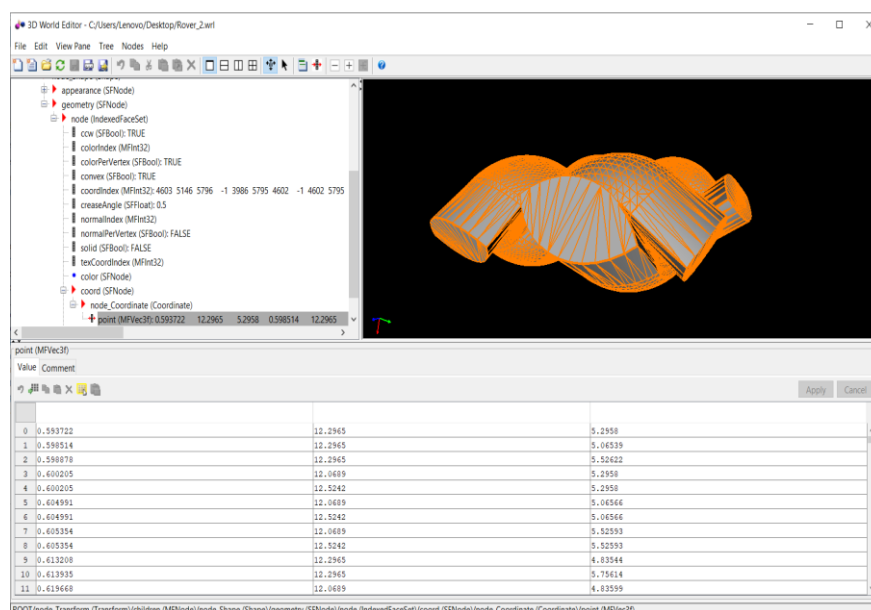


Рис. 19. Графический интерфейс модуля коррекции параметров 3D модели элементарной ячейки

В результате разработки получен программный инструмент [228] с графическим интерфейсом обеспечивающий численный параметрический анализ геометрической модели армирующей структуры композита с возможностью её последующего пространственного моделирования и возможностью ее корректировки [129].

Системные требования, используемые для запускаемого программного комплекса: количество требуемой оперативной памяти, составляет 10 Гб, процессор 3.3 ГГц или более, 4 ядра и более и видеокарта 4 Гб, с поддержкой OpenGL. Используемые параметры обеспечивают высокую эффективность и производительность.

При разработке программного комплекса для проектирования и расчета элементарной ячейки текстильного материала, как армирующей составляющей композита, в качестве входных параметров модельного эксперимента в работе использованы данные, полученные из результатов анализа образцов (рис. 21) изображения поверхности текстильной структуры, позволившие внести необходимые коррективы, повышающие точность программного решения поставленных задач.

В процессе разработки программного комплекса [129] для трехмерного моделирования волокнистых армирующих структур и расчета их оптимальной геометрии по заданным структурным параметрам тканого полотна реализован графический пользовательский интерфейс и алгоритм его реализации. Для реализации программного комплекса выбрана архитектура процессора, и из полученных результатов сделан вывод об эффективности применения разработки.

## 2.8. ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ ТКАНОЙ СТРУКТУРЫ

На микроскопическом изображении (рис. 20) видны пустоты, образовавшиеся между нитями показывающие качество заполнения эпоксидной смолой.

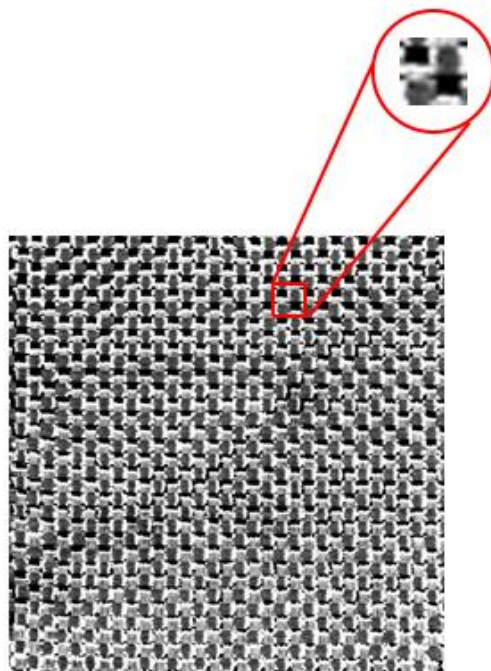


Рис. 20 Изображение углеродной ткани HP-P195C, с выделенной ячейкой

Технические спецификации (табл. 3) использовались для выполнения имитационного моделирования скорости течения матрицы углеродной структуры полимерной матрицы.

Таблица 3

Технические спецификации ткани HP-P195C

Масса образца 10×20 см, г	3,4±5%
Тип пряжи в основе	карбон
Толщина, мм	0,28±5%
Линейная плотность, г/см	1,8±2%
Тип переплетения, HT-fibre	3К 200

HT-fibre\*- карбоновая ткань, полотняного плетения

Плотность - 200 г/м<sup>2</sup>

ЗК - пучок имеет 3000 углеродных волокон

Исследование параметров тканого полотна с целью выделения элементарной периодической ячейки, регулярно повторяющейся в структуре материала проведены с использованием оборудования Рейнско-Вестфальского технического университета, световым микроскопом Keyence VHX 700 и полировальной машиной Struers LaboPol-1 с механизмом перемещения образцов LaboForce.

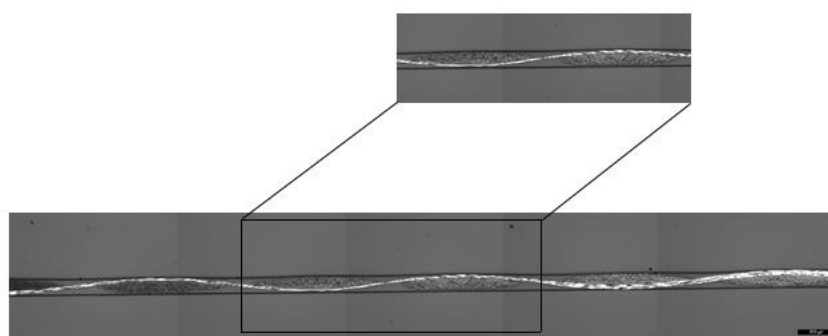


Рис. 21 Микроскопическое изображение полученного образца однослойного углеродного материала (масштаб: 500 мкм)

С использованием многофункционального растрового графического редактора получены размеры из микроскопического изображения (рис. 21),  $p_2$  - 0,412мм;  $h_1$  - 0,036мм;  $h_2$  - 0,023мм. Используя параметры, полученные из микроскопического изображения (рис. 21) в работе приведены результаты моделирования скорости потока жидкости сквозь элементарную ячейку полимерной структуры. Для исследования потока жидкости, элементарная ячейка была помещена в четырёхугольную призму (рис. 22) и с двух сторон созданы заглушки.

Заглушки представляют собой объекты, которые эмитируют поток жидкости (подачу эпоксидной смолы) и создания давления. На входном сечении расчетной области задавалась начальная скорость потока жидкой среды, а на выходном сечении задавалось давление окружающей среды, для

фиксирования потока задан параметр граничного условия «реальной стенки» (соответствует сплошной границе) [130]. В качестве входных данных выбран внутренний тип моделируемой задачи, то есть поток обтекает твердое тело. Из физических моделей выбраны: течение жидкости и дополнительно выбрана не стационарность - так как рассматриваемый переходный поток, то есть меняющийся со временем.

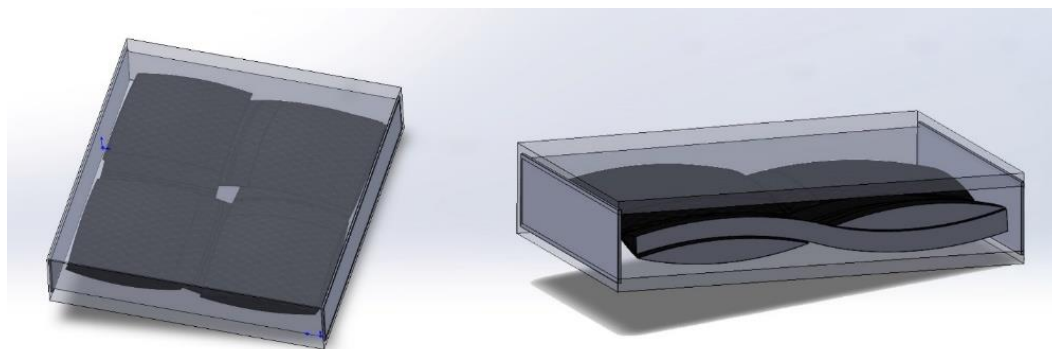


Рис. 22 Модель элементарной ячейки

Для получения более точных результатов использовалась функция «Адаптация сетки», данный параметр означает дробление ячеек сетки таким образом, чтобы общее количество ячеек увеличивалось до достижения заданного разрешения.

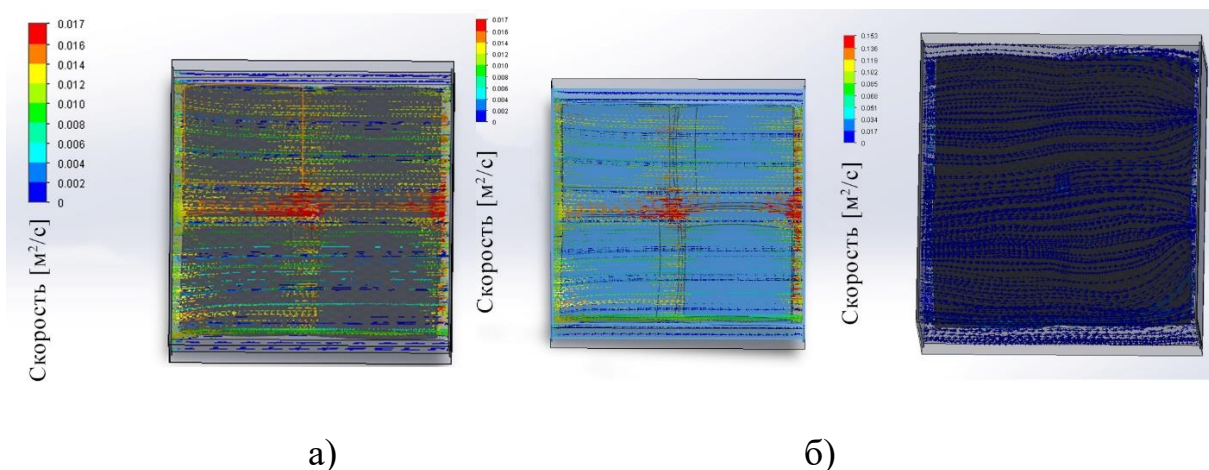


Рис. 23 Скорость потока жидкости в модели элементарной ячейки: а) из 1 слоя б) из 4 слоев

На основе полученных моделей выполнена имитация процесса пропитки элементарной периодической ячейки тканой структуры. Полученные цветовые диаграммы позволяют охарактеризовать динамику изменения скорости траектории потока жидкости через тканую структуру, поскольку скорость по краям ячейки меньше, чем в центре, заполняемость эпоксидной смолой лучше. 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.

### **Глава3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АРМИРУЮЩИХ СТРУКТУР**

Особый интерес представляет моделирование структуры и свойств композиционных материалов, в том числе полимерных композиционных материалов. Этот класс материалов успешно конкурирует и вытесняет многие традиционные материалы в самых различных областях техники.

Большой спектр свойств композиционных материалов, достигаемых путем варьирования видов компонентов, их долей, форм, а также характером распределения в веществе делает их максимально конкурентоспособными в сравнении с традиционными материалами. Поэтому разработка новых композиционных материалов и прогнозирование их свойств является одной из важных задач материаловедения [131].

Различают несколько вариантов моделирования армирующих структур. Одним из таких является метод объектно-ориентированного моделирования [132-134], целью которого является получение полного, точного и адекватного описания системы, имеющее конкретное назначение. Осуществляемое в рамках этого метода визуальное моделирование дает возможность построения графической модели с помощью зрительных абстракций, воспроизводящих понятия и объекты реального мира. Графические модели представляют собой средства для визуализации, описания, проектирования и документирования архитектуры системы.

Другим вариантом, получившим достаточно широкое распространение, стал метод структурно-параметрического моделирования [133,134] основанный на использовании параметров элементов модели и соотношения между ними. В случае геометрического проектирования создается математическая модель объектов с параметрами, при изменении которых происходит изменение конфигурации объекта. Трехмерное параметрическое твердотельное моделирование и двумерное параметрическое моделирование –



CAD-системы получили развитие начиная с 90-х годов XX века. Твёрдотельное моделирование позволяет осуществлять контроль взаиморасположенных деталей, достоверное представление любого по сложности объекта, имеющего все признаки физического тела. К достоинствам твёрдотельного моделирования следует отнести хорошую визуализацию трёхмерной модели; быстроту и лёгкость внесения изменений и корректировок; скорость проектирования. Существует достаточное количество программных продуктов для твёрдотельного моделирования. Среди них можно отметить такие как Компас 3D, Autodesk версия AutoCad, NX Siemens, а также SolidWorks. Последний представляет серьёзную конкуренцию на рынке программного обеспечения (ПО) в связи с достаточно широкими возможностями и значительно более низкой стоимостью по сравнению с другими программами. В связи с этим, следует отметить, что использование программного обеспечения SolidWorks с использованием привычного графического интерфейса Matlab Simulink становится все более распространённым [136].

Совершенствование и разработка программного обеспечения для моделирования тканых структур процесс непрерывный и сопровождается появлением новых видов ПО. К ним можно отнести векторный метод описания структуры многослойной ткани [137], предполагающий независимость описания каждой нити относительно соседних. Существенное преимущество этого метода перед матричным, который положен в основу программного продукта WiseTex [138, 139], является возможность реализовать модели абсолютно любых трёхмерных материалов на базе универсальных CAD – систем.

Ещё одним широко распространённым методом моделирования свойств и эксплуатационных характеристик полимерных композиционных материалов является метод конечных элементов (МКЭ) [144-147]. Это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также

интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, тепломассообмена, гидродинамики, электродинамики и топологической оптимизации.

Прогнозирование осуществляется путем построения математических моделей, которые описывают свойства ткани как свойства составляющих ее нитей, опосредованные структурой переплетения. При этом свойства нитей считаются заданными. Другими словами, в цепочке преобразования текстильных волокнистых материалов волокно -> нить -> ткань-> изделие рассматривается лишь выделенный переход, оставляя вопросы прогнозирования свойств нитей по заданной их структуре и свойств тканых изделий по заданной их конструкции за пределами работы. Содержанием моделей является математический аппарат и алгоритмические средства, позволяющие по заданным свойствам нитей и структуре их переплетения рассчитать геометрию внутреннего строения ткани и характеристики ее сопротивления деформированию. Методы прогнозирования реализуются в виде программных комплексов, использующих разработанные алгоритмические средства [142] и позволяющих рассчитать разнообразные геометрические характеристики тканей – поверхностную плотность, толщину, размеры и форму пор.

Автором [148] предложены новые методы, позволяющие прогнозировать строение и физико - механические свойства пряжи и тканей, а также проектировать текстильные материалы с заранее заданными свойствами методами применения теории подобия и анализа размерностей при решении сложных многопараметрических зависимостей оценки свойств тканей.

В работе [149] исследована возможность создания численных моделей нити и тканого материала, позволяющих оценивать деформационные характеристики текстильных материалов в условиях их дальнейшей переработки и эксплуатации в изделии. Построена параметрическая

трехмерная конечно-элементная модель нити, позволяющая осуществлять численные эксперименты по определению деформационных характеристик при внешних воздействиях, а также параметрическая модель тканого материала полотняного переплетения в трехмерной постановке с учетом пространственных взаимодействий нитей основы и утка. Получена удобная для анализа и расчетов на мезо-уровне модель ткани с псевдоплоской геометрией и физико-механическими свойствами эквивалентными трехмерной постановке и разработана программная среда текстильного моделирования AusTEX, позволяющая автоматизировать процесс создания моделей нитей и тканей.

В работах [150,151] предложена конечномерная динамическая модель формирования элемента ткани, которая при малом числе параметров позволяет исследовать формирование элементов ткани в области прибойной полоски. Модель пригодна как для однослойных, так и многослойных тканей независимо от особенностей переплетения. При этом с помощью метода конечных элементов [153,154] исследована деформация нитей основы и в системе Comsol построена модель удлинения основной нити. А также рассмотрена компьютерная модель сил трения между волокнами и нитями в волокнистых материалах [156] позволяющая на основе метода статистического моделирования оценить влияние указанных сил трения на прочностные свойства волокнистых материалов.

Разработаны методы [157,159] численного прогнозирования процессов релаксации текстильных эластомеров с учетом различных вариантов предложенных математических моделей. Полученные численные характеристики изменяющегося напряжения в ходе процесса релаксации текстильных эластомеров могут быть использованы для проведения качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств на основе их системного анализа.

Все более широкое использование объемных 3D тканых материалов как для производства текстильных композитов, так и полимерных композитных материалов требует новых подходов к прогнозированию их свойств. Предложен [161] новый подход к прогнозированию свойств 3D-структур на уровне одиночного тканого переплетения основной и уточной нитей – вокселя с использованием конечно-элементной модели для заданной детали и разработано соответствующее ПО для создания двойника детали в программном обеспечении LS-Dyna.

Для разработки новых 3D-структур 3D-ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования наиболее эффективным инструментом являются программные комплексы, реализующие метод конечных элементов [162].

Моделирование структуры текстильного материала близкой к реальному строению является актуальной задачей в области прогнозирования свойств армирующих основ для композитов. Для моделирования участка ткани с заданным раппортом разработано программное обеспечение на языке функционального программирования Haskell [163]. Оно позволяет изобразить трехмерную модель каждого волокна в нити в виде линий, совокупности точек или трубочек заданного диаметра.

Построение геометрических моделей различных тканых структур представляет для исследователей значительный интерес с точки зрения их адаптации к реальным условиям.

В работе [165] предложено программное обеспечение, позволяющее строить геометрические модели различных структур фильтрующего материала с возможностью их последующего экспорта в CAE/CAD –системы для проведения анализа на гидро- и газодинамику. В качестве переменных задаются параметры геометрии: толщина, ширина, длина, внутренний и внешний объем, угол сегмента, толщина слоя, угол наклона пор и т.д., по которым и осуществляется построение модели.

Предложена новая концепция разработки программного обеспечения [166,167] с применением CAD –системы SolidWorks и языка Visual Basic позволяющая моделировать 3D-структуру по двум направлениям – моделирование 3D – преформ примитивных форм и 3D – преформ сложных пространственных конфигураций.

Армирующие структуры на основе углеродных волокон являются наиболее предпочтительными для создания полимерных композитных материалов, обладающих высокими прочностными характеристиками. Поэтому моделирование их строения вызывает значительный интерес исследователей. В работах [168,170] разработаны математические модели для прогнозирования параметров строения углеродной ткани полотняного переплетения. Разработан алгоритм создания материала в виртуальной среде, включающей волокна, нити их геометрическое расположение, расстояние между нитями основы и утка, структуру материала. Алгоритм реализован в программной среде 3D Studio Max. Получены экспериментальные микросрезы ткани, с использованием в качестве матрицы эпоксидной смолой [170]. Расхождение экспериментальных и расчетных данных составило не более 3%, что говорит о корректности созданной математической модели.

Для описания строения нитей в тканях полотняного переплетения [171] предложено математическое выражение, с помощью которого возможно построение поверхностей текстильного материала. С этой же целью в работе [173-175] предложен алгоритм для расчета координат вершин полигонов, образующих поверхность нити в ткани и программное обеспечение в среде Borland Delphi с применением графической библиотеки OpenGL, позволяющее строить трехмерные модели ткани и проектировать структуры ткани на различных этапах формирования однослойных переплетений.

Оценивая в целом различные варианты подходов к математическому описанию строения армирующей компоненты полимерного композитного материала, можно отметить, что большая часть из них основывается на

разработки новых видов программного обеспечения независимо от того является наполнитель одно- или многослойным. Другим направлением является возможность использования имеющегося программного обеспечения тяжелого или среднего уровня. Однако исследователи уделяют недостаточно внимания таким видам экономичного программного обеспечения как SolidWorks с использованием привычного графического интерфейса Matlab Simulink.

### **3.1. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НАПРАВЛЕННОСТЬ ВОЛОКОН В НЕТКАНЫХ СТРУКТУРАХ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Точность и достоверность представленных результатов анализа программно-сгенерированных образцов на примере нетканых структур с заданными параметрами начального расположения волокон позволили использовать разработанный нами программный комплекс [178,180] для исследования физических образцов углеродных нетканых структур технического назначения. Однако, их реальные изображения, получаемые с помощью цифровых камер, сканеров, оптических или цифровых микроскопов, представляют собой полноцветные изображения, в которых довольно часто не используется весь диапазон значений интенсивностей, присутствуют искажения яркости и ее неравномерность. Все это отрицательно отражается на качестве визуальных данных и в большинстве случаев не позволяет четко выделить линии волокон в нетканой структуре [181, 184].

Поэтому, для анализа изображений реальных образцов нетканой структуры дополнительно нами разработан алгоритм их предварительной обработки с целью максимально четкого выделения линий волокон. Процедура обработки включала в себя следующую последовательность действий. Полноцветное изображение нетканой структуры конвертировалось в полутоновое изображение, представляющее плавный переход от черного

через серый к белому. При этом волокна, которые образуют структуру нетканого материала, представлялись светлыми линиями на темном фоне. Затем настраивались параметры контрастности, яркости и резкости полутонового изображения с целью разделения волокон и усиления четкости их границ на общем фоне.

Описанная процедура коррекции изображений достигнута с использованием функций Matlab [187], на основе которых нами создан программный блок, позволивший реализовать процесс обработки изображений автоматически при загрузке их параметров в разработанный нами программный комплекс для определения направления волокон в нетканом материале. Для коррекции изображений нетканого материала применяется следующая последовательность процедур:

```
>>G=rgb2gray(f); % Преобразование оригинального изображения  
нетканого материала f в полутоновое изображение G
```

```
>>Q=imadjust(G); % Изменение контрастности полутонового  
изображения нетканого материала G
```

```
>>H = fspecial('unsharp',1); % Создание фильтра H для коррекции  
параметров яркости и резкости
```

```
>>L = imfilter(Q,H,'replicate'); % Применение фильтра H к изображению  
Q
```

```
>>imshow(L) % Вывод на экран обработанного изображения нетканого  
материала
```

На рис. 24, А-В представлено преобразование оригинального изображения нетканой структуры  $f$  (А) в полутоновое изображение с увеличенной контрастностью  $Q$  (Б) и финальное изображение  $L$  после применения фильтра коррекции параметров яркости и резкости (В).

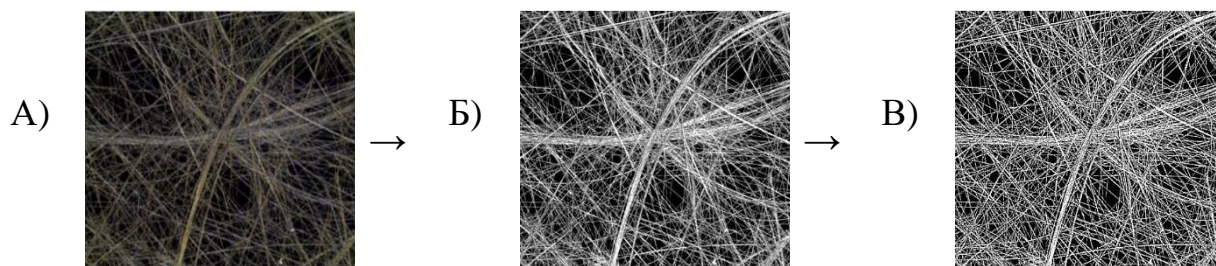


Рис. 24. Преобразование оригинального изображения нетканой структуры в полутоновое изображение

Таким образом, переходя к анализу [188] углеродных нетканых структур технического назначения, в работе проведено исследование трех образцов нетканого материала из углеродных волокон. В процессе производства структура исследуемых нетканых материалов была сформирована аэродинамическим методом. Используя оптический микроскоп высокого разрешения, нами были получены цифровые изображения каждого образца нетканой структуры, и для каждого образца сделаны по три изображения из трех различных областей исследуемой нетканой структуры, соответственно (рис. 25). Для реализации процедуры анализа [186] параметры полученных изображений были загружены в разработанный нами [186] программный комплекс для определения направленности волокон в нетканых материалах и автоматически обработаны в соответствии с описанным выше алгоритмом. Направленность волокон была определена для каждого изображения, а затем вычислено среднее значение по трем изображениям для каждого образца углеродной нетканой структуры (рис. 25).



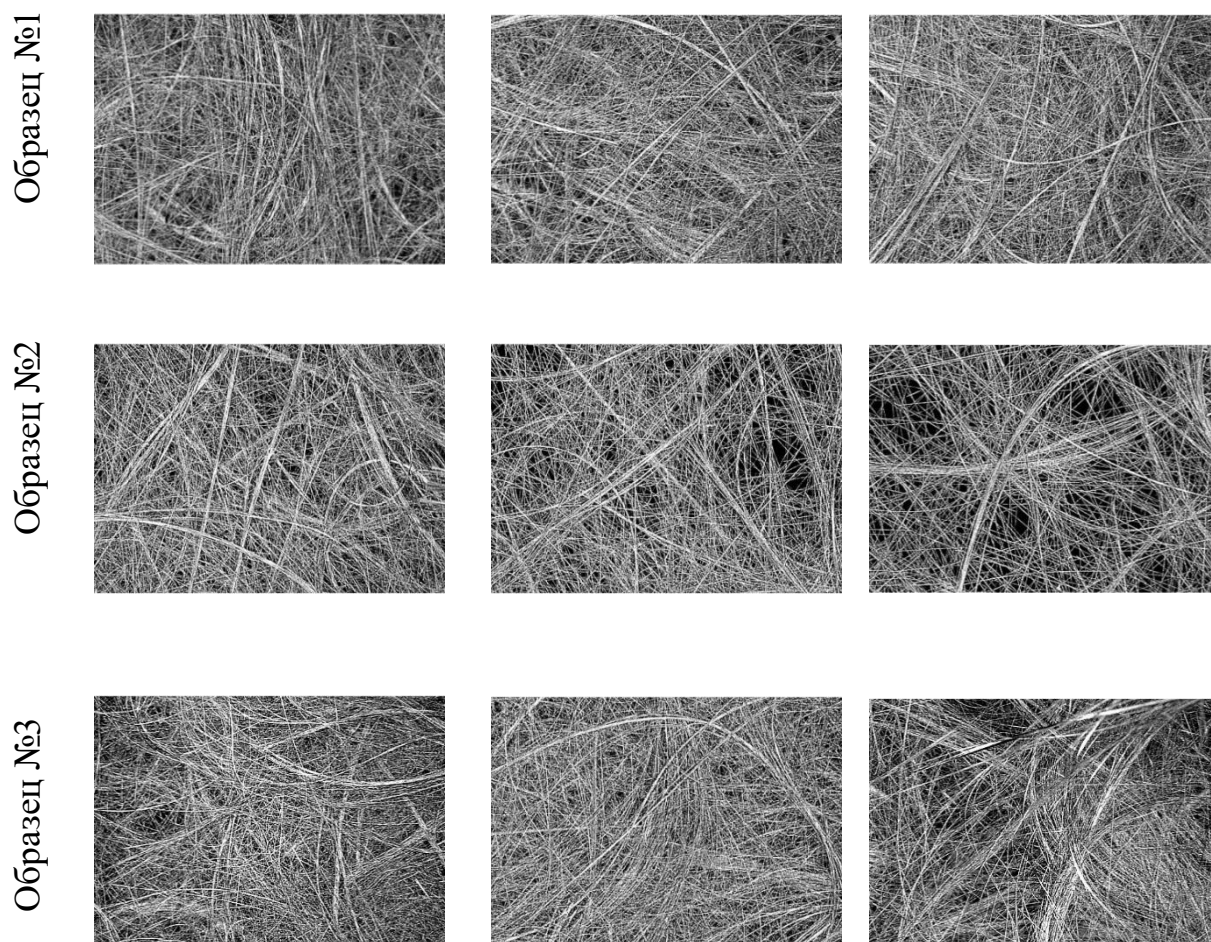


Рис. 25. Цифровые изображения нетканой структуры

Как видно из рис. 26-28, распределение волокон для образцов №1, №2 и №3 не имеет ярко выраженных вершин, что свидетельствует о равномерном распределении волокон в структуре нетканого материала под углами в диапазоне от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , т.е. исследуемые образцы нетканого материала имеют структуру, близкую к изотропной, с одинаковыми физическими свойствами во всех направлениях. А так как изотропная структура нетканого полотна, полученного в результате процесса производства, является главной особенностью её формирования аэродинамическим методом, результаты анализа исследуемых образцов из углеродных волокон с высокой степенью точности позволяют характеризовать и технологический процесс их производства.

Для определения величины угла  $\mu$ , являющегося средним значением в направлении волокон для исследуемых образцов нетканого материала, и величины отклонения от среднего значения  $\sigma$  [178] нами использован пакет Fitting Distribution Toolbox системы Matlab [187]. Загружая в Fitting Distribution Toolbox данные о направлении волокон, полученные в результате анализа изображений углеродных нетканых структур, нами построены графики их нормального распределения в зависимости от угла (рис. 28-30,). Графики описываются следующей функцией, из которой определяются величины  $\mu$  и  $\sigma$ :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (7)$$

Численные значения результатов анализа реальных образцов углеродных нетканых структур технического назначения приведены в табл.4.

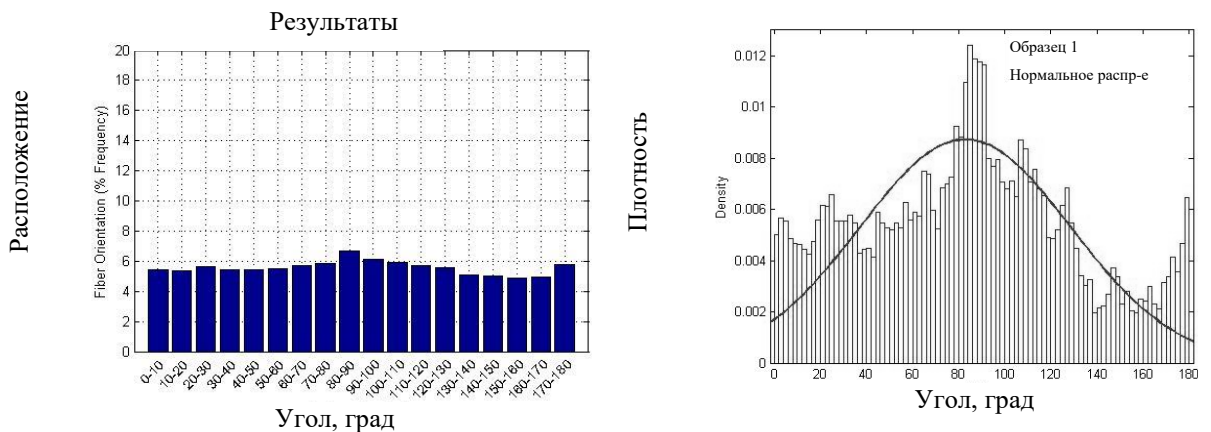


Рис. 26. График нормального распределения

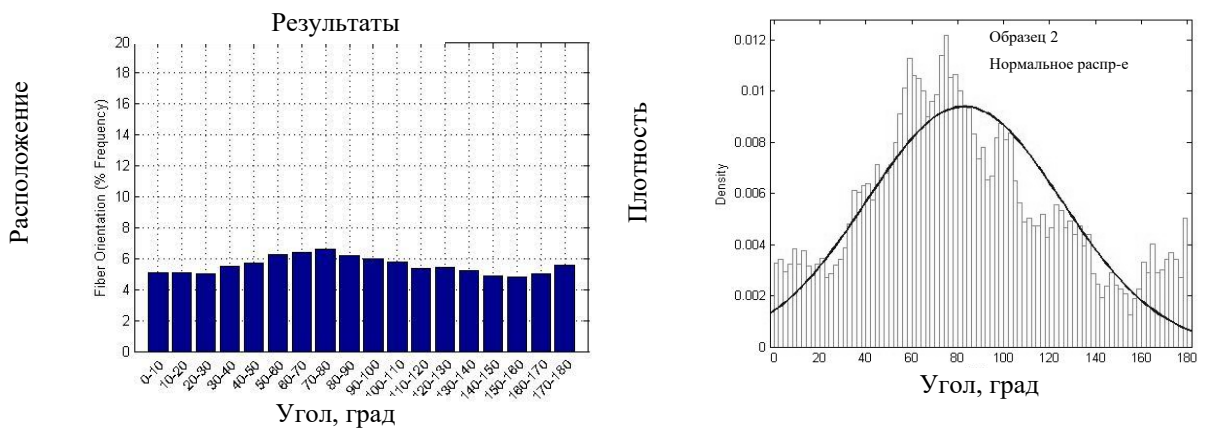


Рис. 27. График нормального распределения

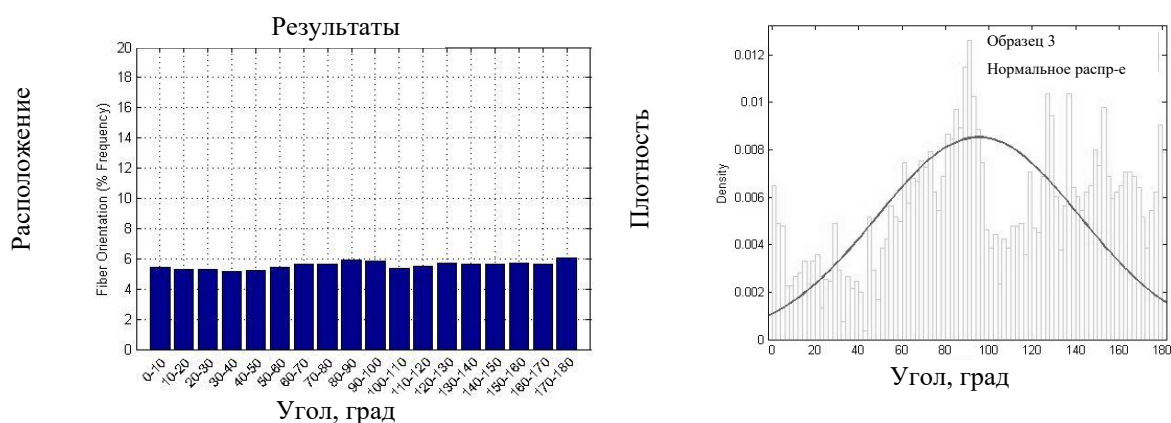


Рис. 28. График нормального распределения

Таблица 4

Результаты анализа физических образцов

Изображение нетканого материала	Направленность волокон		Максимальное значение распределения волокон, %	Минимальное значение распределения волокон, %	Коэффициент анизотропии
	Среднее значение, град	Отклонение от среднего значения, град.			
Образец №1	82,9	45,71	6,65	4,88	1,36
Образец №2	82,81	42,46	6,63	4,78	1,39
Образец №3	95,22	46,75	6,08	5,18	1,17

Таким образом, результаты проведенного в рамках работы анализа физических образцов углеродных нетканых структур позволяют сделать вывод об эффективности применения разработанного нами программного комплекса для определения направленности волокон в работе с неткаными структурами, а полнота выходных данных дает возможность дальнейшего достоверного прогноза физико-механических свойств мультиаксиальной структуры синтезированной нетканой волокнистой матрицы композиционного материала.

### **3.2. МЕТОД БИНАРИЗАЦИИ КАК ОСНОВА СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ НЕТКАНОЙ АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА**

Плотность распределения волокон (поверхностная плотность) является одной из важнейших структурных характеристик плоских нетканых армирующих структур – одного из видов основополагающих структур композита, а возможность ее инструментального контроля в процессе производства является актуальной задачей [178]. Анализ поверхностной плотности волокнистой структуры позволяет в комплексе с другими структурными характеристиками спрогнозировать физико-механические свойства композита, сформированного на ее основе.

Развитие функциональных возможностей разработанного нами программного комплекса [187], обеспечивает выполнение процедур анализа плотности распределения волокон - поверхностной плотности и определение ее неравномерности в нетканых плоских структурах – армирующей компоненты полимерного композита по изображениям их поверхности.

Численный анализ изображения применительно к оценке плотности распределения волокон в нетканой структуре полотна заключается в идентификации геометрии волокон, образующих структуру нетканого армирующего компонента. С этой целью в работе использован метод бинаризации изображений [180], который позволяет преобразовать полноцветное изображение нетканой структуры в черно-белое, пиксели которого имеют только два значения – 0 и 1. В результате волокна, образующие структуру армирующей компоненты [186], представляются как светлые линии на темном фоне (или наоборот в зависимости от типа волокон), что радикально уменьшает количество анализируемой информации. Метод бинаризации активно применяется для анализа изображений волокнистых структур [181, 184]. Однако процесс бинаризации всегда сопровождается появлением искажений, таких как, разрывы в линиях, потеря значащих

деталей изображения, появление «шума» и непредсказуемое искажение структуры по причине неоднородности фона [180], может существенно снизить точность результатов анализа [186].

Разработанный нами алгоритм [177] обработки цифрового изображения плоской нетканой структуры позволяет исключить дефекты процедуры бинаризации и включает в себя ряд последовательных действий:

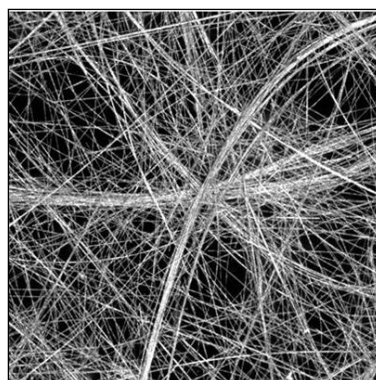
- на первом этапе изображения (рис. 29,а) нетканой структуры, полученные непосредственно с оптических приборов, обрабатываются с использованием разработанного нами ранее программного блока [187,188] в результате чего полноцветные изображения нетканой структуры конвертируются в полутоновые изображения [177], представляющие плавный переход от черного цвета через серый к белому (рис. 29, б);

- затем примененные на этом этапе методы обработки изображения в пространственной области: преобразование яркости [177], гамма-коррекция и т.д., обеспечивают необходимую цветовую детализацию и компенсируют потери резкости изображения нетканой структуры (рис. 29, в).

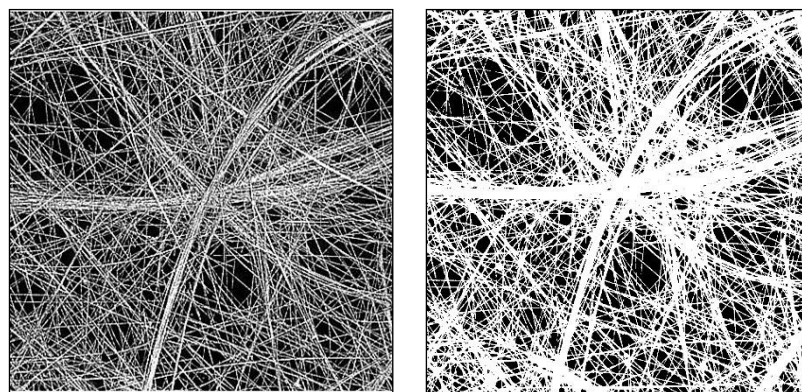
- последующее преобразование изображений заключается в применении метода бинаризации, а именно, в бинарной пороговой сегментации по методу Оцу (Otsu's method) [180], которая обеспечивает идентификацию линий волокон в нетканой структуре (рис. 29, г).



а)



б)



в)

г)

Рис. 29. Пошаговое преобразование изображений с применением метода бинаризации

Разработанный нами алгоритм реализован в виде программного блока с использованием функций платформы для модельно-ориентированного проектирования MatLab.

Переходя к анализу, 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 (рис. 29, г). Таким образом, разрешение изображения – количество пикселей по горизонтали и вертикали ( $w \times h$ ) – задает размер матрицы изображения [186], а выделенные таким образом линии волокон в изображении позволяют определить занимаемую ими часть площади в общей площади анализируемого образца структуры материала и оценить плотность их распределения, соответствующую её поверхностной плотности [186].

Принимая площадь  $S$  поверхности исследуемого образца одинаковой и постоянной, различие в плотности распределения волокон (поверхностной плотности) для образцов будет определяться различием масс  $m$  волокон, образующих нетканую структуру. В свою очередь, для плоских нетканых структур сравнение образцов по массе может быть заменено сравнением по величине площади, которую суммарно занимают изображения волокон в образцах [176].

Площадь, занимаемая волокнами, определяется нами параметрической характеристикой  $k_S$  в долях от общей площади поверхности образца Шетканого материала. Величина  $k_S$  вычисляется [186] из изображения нетканой структуры армирующей компоненты как отношение числа элементов со значением 1 (белые пиксели) к суммарному количеству элементов [186] в изображении (общее число точек изображения) по формуле:

$$k_S = \frac{\sum white\_px}{w \cdot h}, \quad (8)$$

Для определения неравномерности распределения волокон в образце программным комплексом выполняется разделение изображения на сегменты и рассчитывается параметрическая характеристика  $k_S$  для каждого из них (рис. 30). Число сегментов зависит от разрешения изображения и реальной площади образца структуры, которая соответствует этому изображению, и может быть различным для каждого из образцов. Для рассматриваемого случая нами принято разрешение изображения  $1000 \times 1000$  пикселей, которое разработанный нами программный комплекс разбивает на 100 сегментов размером  $100 \times 100$  пикселей. Таким образом, принятый размер изображения является достаточным для обеспечения приемлемой точности выходного результата, обеспечивая при этом высокую скорость вычислительного процесса [189].

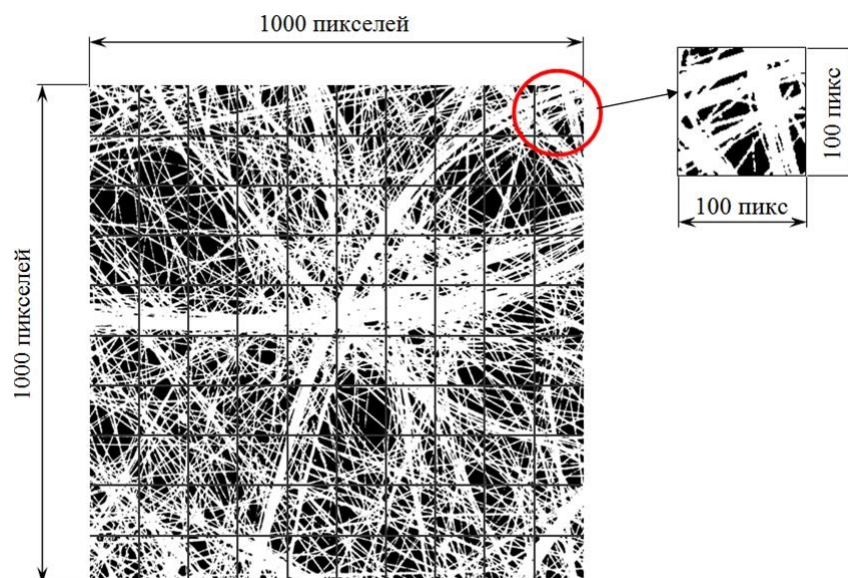


Рис. 30. Разделение изображения на сегменты

На рис. 31 (а1-а3) представлены полученные изображения исследуемых образцов нетканой структуры после процедур бинаризации, реализованных в соответствии с приведённым выше алгоритмом [186]. На рис. 31 (б1-б3) приведены цветовые карты поверхности нетканой структуры, построенные программным комплексом по сегментированным изображениям для каждого из структурных образцов. Цветовые карты поверхности позволяют определить расположение областей нетканой структуры с высокой и низкой поверхностной плотностью и упрощают визуальный контроль результатов анализа. Также по сегментированным изображениям исследуемых образцов в виде гистограмм нами определены диапазон и частота распределения значений параметрической характеристики  $k_S$  (рис. 31 (в1-в3)). Для построения гистограмм значения параметрической характеристики  $k_S$  округлены с точностью до 0,05.

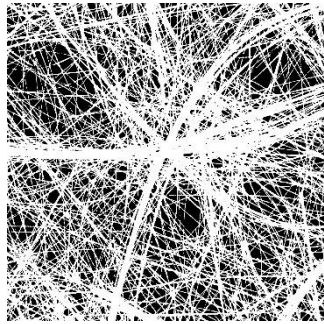
Из гистограммы на рис. 31 (в1) следует, что образец плоской нетканой структуры (а1) имеет самый широкий диапазон значений параметрической характеристики  $k_S$  среди приведённых образцов. Распределение значений  $k_S$  по сегментам изображения нетканой структуры (а1) расположен в диапазоне (0,25- 0,95), при этом 18 сегментов (наибольшее количество) имеют значение



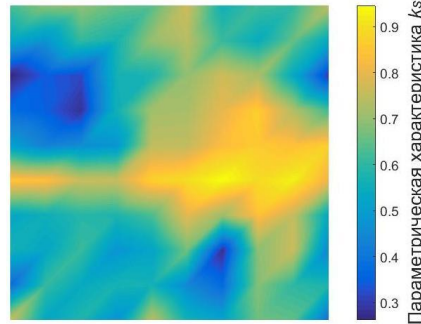
$k_S=0,55$ . Для образцов (а2) и (а3) на рис. 31 диапазон значений параметрической характеристики  $k_S$  сокращается до значений [186] в диапазоне от 0,4 до 0,9) и от 0,55 до 0,9, соответственно. При этом пиковое количество сегментов изображений с равными значениями  $k_S$  увеличивается. Для изображения на рис. 31 (а2) - 20 сегментов имеют значение  $k_S=0,75$ , а для изображения на рис. 31 (а3) - 25 сегментов -  $k_S=0,8$ . Наблюдаемая из гистограмм на рис. 31 (в1-в3) тенденция к увеличению концентрации значений параметрической характеристики  $k_S$  около определенных величин [186] при уменьшении диапазона этих значений даёт возможность математически спрогнозировать неравномерность [177] поверхностной плотности исследуемых образцов нетканого материала в соответствии с законом нормального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

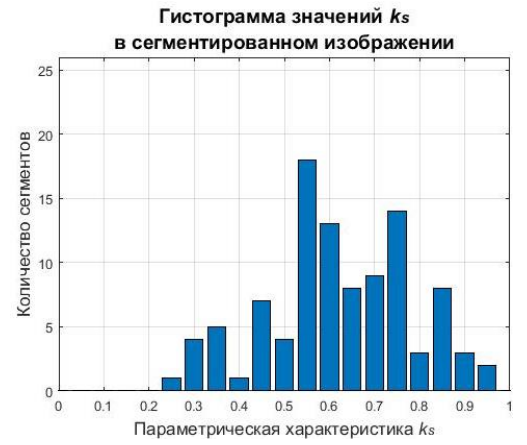
где  $\mu$ — это математическое ожидание, т.е. среднее значение параметрической характеристики  $k_S$ , определяющей плотность распределения волокон в исследуемом образце ( $k_{S\_CP}$ ), а  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение значений  $k_S$ , определяющее форму кривой распределения.



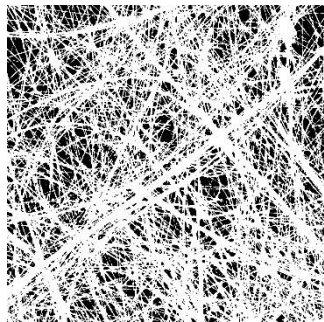
a1)



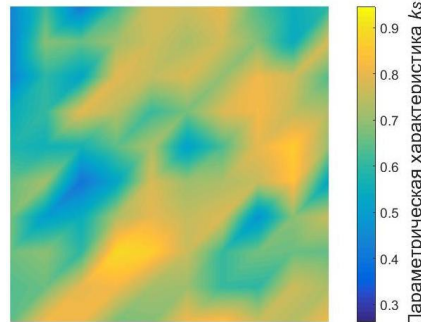
б1)



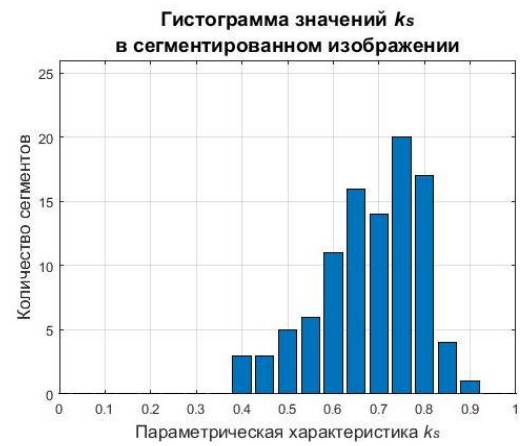
в1)



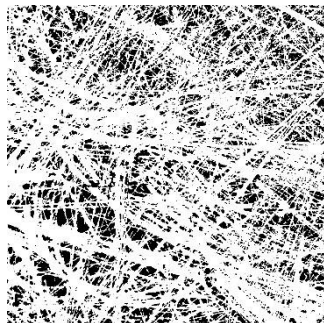
a2)



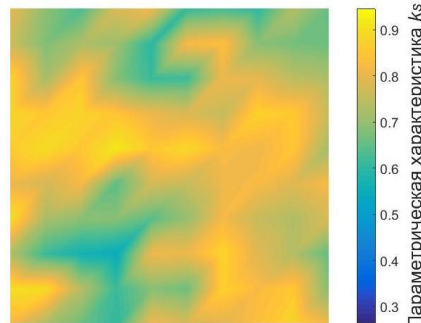
б2)



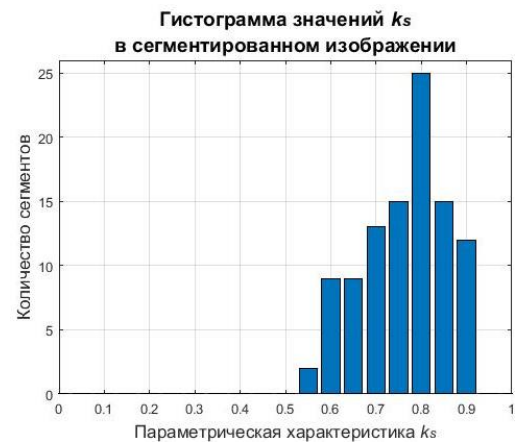
в2)



a3)



б3)



в3)

Рис. 31. Изображения исследуемых образцов нетканой структуры после процедур бинаризации, цветные карты поверхности нетканой структуры и гистограммы распределения значений параметрической характеристики  $k_s$

Используя возможности системы MatLab, по численным значениям, полученным из гистограмм на рис. 31 (в1-в3), нами определены графические зависимости нормального распределения параметрической характеристики  $k_S$  для исследуемых образцов и определены значения  $\mu$  и  $\sigma$  для каждого из них, которые представлены на рис. 32.

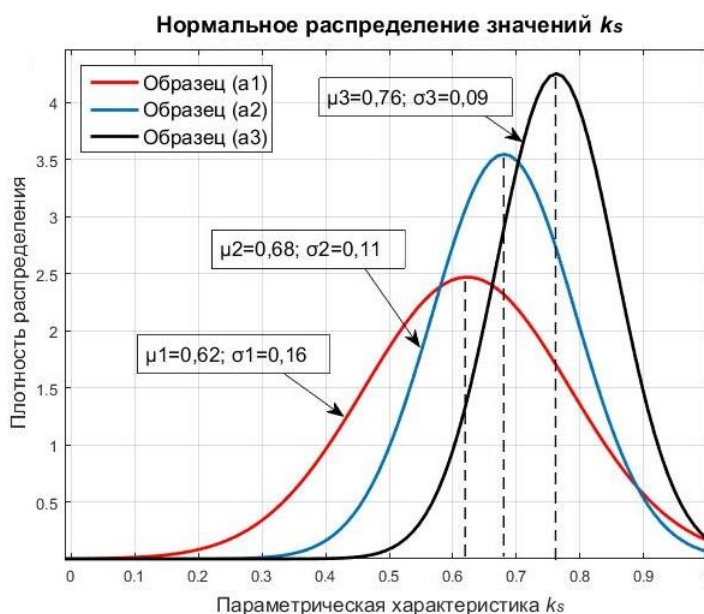


Рис. 32. Графические зависимости нормального распределения параметрической характеристики  $k_S$  для исследуемых образцов

Полученные значения  $\mu$  и  $\sigma$  позволяют по «правилу трех сигм» ( $\mu \pm 3\sigma$ ) определить интервал возможных значений параметрической характеристики  $k_S$  для каждого анализируемого образца нетканой плоской структуры, а также в форме  $\mu \pm \sigma$  определить интервал с наибольшей плотностью распределения значений  $k_S$ .

А именно, меньшему значению среднеквадратического отклонения  $\sigma$ , соответствует более равномерное распределение волокон в образце.

Анализ графиков рис. 32 дает возможность определить среднюю плотность распределения волокон  $k_{Scp}$  в исследуемых образцах плоской нетканой структуры и ее неравномерность.

Численные значения результатов анализа исследуемых образцов плоских нетканых структур с использованием разработанного нами программного комплекса позволяют прогнозированию физико-механических свойств нетканых армирующей компоненты композита на этапе его разработки [177].

Результаты анализа дают возможность выполнять как визуальный контроль плотности распределения волокон в нетканой плоской структуре армирующей компоненты композитного материала как по цветовым картам их поверхности, так и получать численные значения, которые могут быть использованы для прогнозирования физико-механических свойств нетканых плоских структур.

В перспективе, по заданным значениям плотности распределения волокон  $k_{S\_cp}$  в материале армирующей структуры и допустимому диапазону отклонения этих значений  $\pm\sigma$ , разработанный нами программный комплекс может служить основой для создания автоматизированной системы контроля технологического процесса формирования поверхностной плотности нетканой плоской структуры – волокнистой армирующей компоненты в масштабе технологического процесса производства длинномерных композитных материалов [177].

Разработанные нами алгоритмы обработки цифрового изображения плоских нетканых структур с использованием метода Оцу (Otsu's method) - метода бинарной пороговой сегментации, а также процедура построения цветовых карт поверхности нетканой плоской структуры по их цифровому изображению с использованием закона нормального распределения, позволили исключить погрешности, свойственные традиционным методам бинаризации, применяемым при численном анализе волокнистых структур [229].

Достоверность результатов проведенного нами анализа изображений нетканой плоской волокнистой структуры и полнота полученных данных,

характеризующих распределение волокон, позволяют сделать вывод об эффективности использования разработанного нами программного комплекса для оценки плотности распределения волокон в плоских нетканых структурах – армирующих компонентах вновь синтезируемого композитного материала.

## **Глава 4. РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕДАЧИ В ЗОНЕ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ И АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ НАПОЛНИТЕЛЯ**

### **4.1. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕДАЧИ В ЗОНЕ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ И АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ НАПОЛНИТЕЛЯ**

Предложено использовать ячеечную модель процесса массопередачи применительно к явлению инфузии вязкой связующей – матрицы в композитном материале под воздействием гидравлического вакуума, создаваемого в армирующей капиллярно-пористой структуре, обеспечивающего движущие силы для заполнения её объёма.

Синтез ячеечной модели [194], основанный на методе цепей Маркова даёт возможность определения зависимостей между параметрами, представляющими процесс взаимодействия вязкой матрицы и армирующей капиллярно-пористой структуры в зоне инфузии как системы, характеризуемой переходными состояниями и входными параметрами инфузионного процесса.

Целью численного моделирования является анализ:

-кинетических характеристик массопереноса жидкой фазы при свободном ламинарном и турбулентном движении;

-влияние структурных параметров волокнистой армирующей компоненты на её гидравлическое сопротивление, на массопередачу вязкой жидкой фазы в процессе вакуумной инфузии в капиллярно-пористую структуру.

-выбор оптимальной конструкции аппаратных средств вакуумно-инфузионного устройства и параметров процесса, способствующего интенсификации вакуумно- инфузионного процесса.

Традиционно процесс механического взаимодействия волокнистой АС в вакуумном инфузионном устройстве осуществляется в статическом режиме нагружения при постоянных параметрах, обеспечивающих условия заполнения капиллярно-пористой структуры вязким жидким наполнителем.

Одним из методов, способствующих более, чем обычно интенсивному проникновению жидкого наполнителя в объём капиллярно-пористой структуры наполнителя, являются мероприятия, влияющие на такие физические свойства жидкости, как её вязкость - сообщение её объёму колебаний с различными значениями АФЧХ (амплитудо-фазочастотных характеристик) – свойственных динамическому режиму реализации процесса вакуумной инфузии. Это способствует возникновению в потоке вязкой жидкости, движущейся через капиллярно-пористую структуру волокнистого материала кавитационных явлений и возможных условий проявления гидравлических ударных воздействий, которые повышают эффективность процесса и способствуют формированию изотропной среды в полном объёме композитного материала.

Разработанная нами модель описывает процесс заполнения капиллярно-пористой армирующей структуры при динамическом режиме воздействия на систему «матрица – наполнитель» и является начальной стадией создания численной модели, обеспечивающей прогнозирование заданных конструктивных параметров получаемого композитного материала; прототипирования вакуумного инфузионного оборудования (ВИО) с оптимальными технико-экономическими показателями.

Традиционно теоретической основой исследований в этой области являются:

-дифференциальные уравнения массопереноса; трехфазная структура волокнистого наполнителя, состоящая из твердых частиц, связанных свободной жидкой фазой;

-контактная задача, описывающая процесс напряженно-деформированного состояния системы и другие факторы, существенно влияющие на реализуемый технологический процесс.

Возможность получения аналитических решений этой задачи связана с введением весьма существенных допущений, с дискретизацией процессов в пространстве и во времени, что существенно снижает универсальность таких моделей и алгоритмов расчета, а также точность прогнозирования выходных параметров исследуемых явлений. Имеющийся в практике метод ячеечного подхода [174], основанный на теории цепей Маркова, дает возможность корректного решения представленной задачи и позволяет создать модель переходных состояний процесса массопередачи в зоне вакуумной инфузии полимерной матрицы и наполнителя, применимую в широком диапазоне изменяющихся параметров исследуемой системы.

Армирующая компонента системы состоит из твердых частиц (скелета), связанной и свободной жидкости. Скелет ткани считается абсолютно упругим. В зоне взаимодействия вязкой матрицы с армирующей составляющей действуют гидравлическое давление  $H=H(x,y)$ , характеризующееся фильтрационными свойствами капиллярно-пористой структуры, геометрией зоны взаимодействия фаз моделируемой системы и давление сжатия  $P=P(x,y)$ , которое определяется величиной вакуума, создаваемого средствами ВИО.

Переход к ячейочной модели связан с пространственно-временной дискретизацией процесса вакуумной инфузии.

Поверхность зоны взаимодействия полимерной матрицы с капиллярно-пористой компонентой, т.е. тот участок, на котором непосредственно происходит процесс вакуумной инфузии, распределяется на  $m$  ячеек идеального смещения одинаковой длины  $\Delta x$ , все параметры которых



равномерно распределены в своем объеме. В некоторый момент времени распределение частиц матрицы по длине контактной полоски текстильного наполнителя представлено вектором-столбцом массы полимерной матрицы в ячейках

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_j \\ \dots \\ W_m \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $W_j$  – влагосодержание в рассматриваемой ячейке;  
 $j$  – номер рассматриваемой ячейки.

Переход из одного состояния в другое происходит через промежуток времени одного перехода  $\Delta t$ , который принимается достаточно малым для того, чтобы частицы матрицы в продолжении перехода могли переместиться из данной ячейки только в соседние, но не далее. В течение любого отдельно взятого перехода  $i$  распределение полимера в армирующей компоненте по поверхности взаимодействия составляет величину  $W^i$ , которое через время  $\Delta t$  изменяется и становится равным  $W^{i+1}$ . Оба этих состояния связаны матричным равенством

$$W^{i+1} = PW^i, \quad (11)$$

где  $P$  – переходная матрица

$$P = \begin{bmatrix} p_{s1} & p_{b2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ p_{f1} & p_{s2} & p_{b3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{f2} & p_{s3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{s(m-2)} & p_{b(m-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{f(m-2)} & p_{s(m-1)} & p_{bm} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & p_{f(m-1)} & p_{sm} \end{bmatrix},$$

а  $p_{sj}$ ,  $p_{fj}$ ,  $p_{bj}$  – вероятности остаться в  $j$ -ой ячейке и перейти вперед и назад, соответственно, каждая из которых должна удовлетворять условию  $0 \leq p \leq 1$ , а их сумма должна быть равна единице.

Пусть частицы полимерной компоненты движутся в капиллярно-пористой структуре (КПС) волокнистого наполнителя со скоростью  $V_{ж}$ , а коэффициент их макродиффузии, характеризующий собой самопроизвольное перемещение частиц полимера, приводящее к выравниванию их концентраций по всему занимаемому объему, равен  $D$ . Тогда вероятности перемещения полимерной матрицы из одной ячейки в последующую и предыдущую составляют соответственно

$$p_f = v + d, \quad p_b = d, \quad (12)$$

где

$$v = V_{ж} \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad d = D \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, \quad (13)$$

Схема ячеечного представления переходных состояний процесса массопередачи в зоне вакуумной инфузии полимерной компоненты в капиллярно-пористой армирующей составляющей и структура матрицы переходных вероятностей представлены на рис. 33.

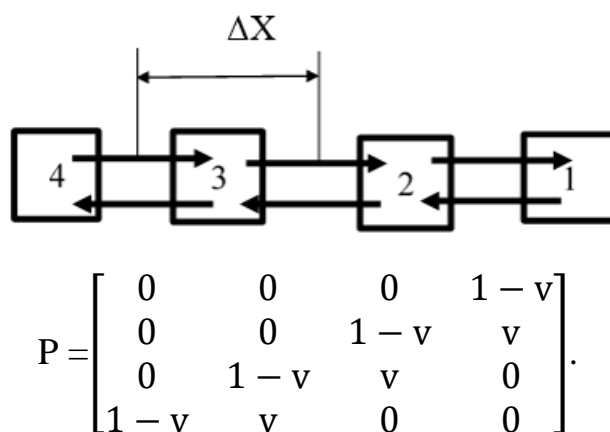


Рис. 33. Схема ячеечного представления переходных состояний процесса массопередачи в зоне вакуумной инфузии полимерной компоненты

Ячеечная модель построена для случая, когда  $d=0$  и может быть прокомментирована на примере рассмотрения процесса массопереноса в ячейках 1 и 2. Пусть каждая сторона ячейки в плане равна  $\Delta x$ , а перпендикулярно плоскости рисунка – единице. Расстояние между центрами ячеек также равно  $\Delta x$ .

Под действием гидравлического давления, которое возникает в КПС, армирующей при деформации, происходит перемещение полимера связующей из ячейки 1, которая соответствует зоне с минимальным сечением, в ячейку 2. Для этого перехода вероятность остаться в 1 ячейке определяется как разность между единицей и суммой вероятностей всех остальных возможных переходов, то есть суммой ненулевых элементов, встречающихся в столбце -  $p_{s1}=1-v$ . Соответственно, вероятность перехода во 2 ячейку  $p_{r1}$  равна доле переносимой массы связующего  $v$ .

Переходная матрица  $P$  строится с учетом того, что скорость движения связующей полимера в КПС по всей поверхности их взаимодействия меняется из-за нестабильности деформирующего и вакуумметрического давлений.

Если масса связующего полимера в ячейке становится больше предельной, то избыточная над предельным содержанием её масса переноситься в последующие ячейки, что реализуется в модели за пределами

матрицы  $P$  путем проверки и обработки вектора состояния  $W^{i+1}$  после перехода.

Переход от ячеечной модели, описывающей процесс массообмена в капиллярно-пористой армирующей структуре материала, при статическом режиме взаимодействия вакуумного инфузионного аппарата, к моделированию переходных состояний процесса массообмена при динамическом режиме нагружения возможен с учетом величины знакопеременного давления  $\Delta P$ , создаваемого механизмом генерирующим режим пульсаций вакуумметрического давления, как источника движущих сил, обеспечивающих процесс фильтрации в КПС армирующей компоненты.

Величина знакопеременного давления  $\Delta P$  зависит от технических характеристик и технологических параметров работы механизма, генерирующего вакуум и который обеспечивает динамический режим инфузионного процесса, от свойств жидкой фазы – связующей полимерной матрицы:

$$\Delta P = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\rho c I} \quad (14)$$

где  $\rho$  – плотность жидкой среды, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – скорость распространения звуковых волн в среде, м/с;

$I$  – интенсивность – физическая величина, количественно характеризующая поток энергии, переносимой волной в направлении распространения, Вт/м<sup>2</sup>:

$$I = 2 \cdot (\pi \cdot f \cdot \xi)^2 \cdot \rho \cdot c \quad (15)$$

где  $f$  – частота колебаний, Гц;

$\xi$  – амплитуда колебаний, м.

Скорость фильтрации жидкости  $V_{\phi}$  через капиллярно-пористую структуру текстильного материала, в соответствии с законом фильтрации Дарси, определяется равенством [195]:

$$V_{\phi} = \frac{k_{\phi}}{\mu} \cdot \frac{D_p}{l} \quad (16)$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент фильтрации КПС, армирующего;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости связующей, Па·с;

$D_p$  – перепад давления на единичной длине среды, Па.

Применительно к динамическому режиму вакуумно-инфузионного процесса добавляется возникающее при этом знакопеременное давление  $\Delta P$ , вследствие чего выражение для определения скорости фильтрации примет вид:

$$V_{\phi} = \frac{k_{\phi}}{\mu} \cdot \frac{D_p + \Delta P}{l} \quad (17)$$

Таким образом, при динамическом режиме [217] скорость  $V_{\phi}$  движения частиц связующей - полимерной компоненты имеет большую величину, чем при статическом режиме [218] нагружения за счет дополнительного знакопеременного давления  $\Delta P$ . Подключая в ячеечную модель [196] дополнительные параметры устройства генерирующего динамический режим вакуумно-инфузионного процесса [197], мы получили численную модель переходных состояний процесса массопередачи полимерной связующей компоненты в зоне вакуумной инфузии в капиллярно-пористой армирующей добавить составляющей в условиях генерирования динамического режима вакуумно-инфузионного процесса. При этом структура переходной матрицы сохраняется. Таким образом, нами разработана ячеечная модель переходных состояний процесса массопередачи полимерной связующей матрицы в зоне вакуумной инфузии в армирующей капиллярно-пористой структуре.

Модель приведена к машинному виду и является начальной стадией создания численной модели, обеспечивающей прогнозирование заданных конструктивных параметров получаемого композитного материала;

прототипирования вакуумного инфузионного оборудования с оптимальными технико-экономическими показателями.

Ячеечная модель переходных состояний процесса массопередачи полимерной связующей матрицы в зоне вакуумной инфузии в армирующей капиллярно-пористой структуре позволяет учесть все основные особенности многочисленных параметров процесса.

Модель является открытой и позволяет подключать в нее детальные описания отдельных составляющих процесса, а также может служить основой для разработки численного описания процесса массопередачи полимерной связующей матрицы в зоне вакуумной инфузии в армирующей КПС и с возможностью его реализации средствами компьютерного анализа.

#### **4.2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ В СИНТЕЗЕ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА**

Приведенные результаты численного моделирования кинетики процесса пропитки армирующей капиллярно-пористой структуры вязким связующим обеспечивают возможность прогнозирования задаваемых структурных параметров синтезируемого композитного полимерного материала. Получены графические зависимости кинетики пропитки связующего в капиллярно-пористую структуру при различных значениях частот генерирования внешнего динамического режима процесса воздействия на систему в форме ультразвуковых колебаний [223] для различных коллоидных композиций связующего, динамической пористости армирующей компоненты, с величинами перепада давления на единичной длине диффузии применительно к методам получения полимерного композитного материала [226, 227].

Оптимизация функции селективности армирующей структуры композитной системы как мезофилтрационной перегородки по отношению к параметрам структуры КПС, обеспечивающей процесс массопередачи при

импрегнировании вязкой [225] матрицей в условиях гидравлического вакуума, создаваемого в армирующей капиллярно-пористой структуре, обеспечивающего создание движущих сил для заполнения ее объёма, при влиянии динамического воздействия на процесс синтеза ПКМ на основе моделирования переходных состояний системы в функции входных параметров процесса [225] массопередачи, является начальным этапом синтеза проблемно-ориентированной численной модели, обеспечивающей прогнозирование заданных конструкционных параметров синтезируемого композитного материала [194,195], а также прототипирования параметров оборудования для реализации технологии пропитки КПС [225] с заданными технико-экономическими показателями на основе сравнительного анализа статических и динамических характеристик кинетики [225], в том числе, процессов импрегнирования в синтезе ПКМ [225].

Целью анализа динамического воздействия на кинетику пропитки при формировании ПКМ является сравнительный анализ:

- кинетических параметров процесса пропитки КПС армирующей компоненты вязким связующим при свободном ламинарном течении и при статическом и динамическом колебательном внешнем высокочастотном воздействии на упруго-вязкую систему, образующую ПКМ;

- влияния структурных параметров КПС армирующей компоненты на её капиллярную проницаемость при массопередаче упруго-вязкой фазы в процессе пропитки КПС армирующей компоненты;

- параметров аппаратных средств АФЧХ импрегнирующего – пропиточного аппаратного обеспечения и технологических параметров, способствующих интенсификации процесса заполнения КПС ПКМ.

С учетом закономерностей процесса пропитки, объем  $Q$  связующего, проходящего через КПС армирующей компоненты ПКМ в единицу времени, определится как пропускная способность КПС [196]

$$Q = \frac{K_n P_f}{\mu H} \delta; \quad (18)$$

где  $P_f$  - перепад давлений (гидравлический вакуум) в КПС армирующей компоненты ПКМ, Па;

$H$  - толщина КПС армирующей компоненты ПКМ – путь течения связующего через армирующую составляющую, м;

$\delta$  - полная площадь поперечного сечения потока связующего, м<sup>2</sup>;

$\mu$  - динамическая вязкость связующего, Па с;

$K_n$  - коэффициент проницаемости КПС армирующей компоненты, м<sup>2</sup>.

Процесс пропитки по аналогии с процессом фильтрования представляет собой сложный массообменный [190] гидродинамический процесс, описываемый в виде движения связующей через КПС наполнителя, обладающую фильтрующими характеристиками. При ламинарном режиме такое течение описывается уравнением Дарси в форме

$$Q = \frac{K_\phi S \Delta h}{H} \quad (19)$$

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.

Поскольку входящий в формулу коэффициент фильтрации  $K_\phi$  определяется экспериментально и зависит как от свойств КПС, так и от



свойств связующего, то для определения гидравлических характеристик КПС армирующей компоненты ПКМ в процессе пропитки [225], независимо от индивидуальных свойств связующего, целесообразно использовать понятие проницаемости КПС армирующей компоненты ПКМ [225]. Количественно этот показатель выражается посредством коэффициента проницаемости  $K_{II}$ , характеризующим только свойства КПС и связанным с коэффициентом фильтрации зависимостью

$$K_n = \frac{K_{\phi}\mu}{\rho g} \quad (20)$$

где:  $K_{\phi}$ - коэффициент фильтрации, м/с;

$\rho$ - плотность связующего, кг/м<sup>3</sup>;

$g$ - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\mu$ - динамическая вязкость связующего, Па × с .

В свою очередь, для ламинарного потока зависимость между коэффициентом фильтрации  $K_{\phi}$  и пористостью КПС (рис.31) может быть определена посредством параметра Козени-Кармана [4]:

$$K_{\phi} = \frac{d_f^2}{c} * \frac{\varepsilon_f^3}{(1-\varepsilon_f)^2} \quad (21)$$

где  $d_f$ - средний диаметр волокон, мм,

$\varepsilon_f$ – эффективная пористость КПС армирующей компоненты,

$c$  –параметр Козени-Кармана, зависящий от извитости пор (для волокнистых материалов  $80 \leq c \leq 320$ ).

Эффективная 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 пор [197].

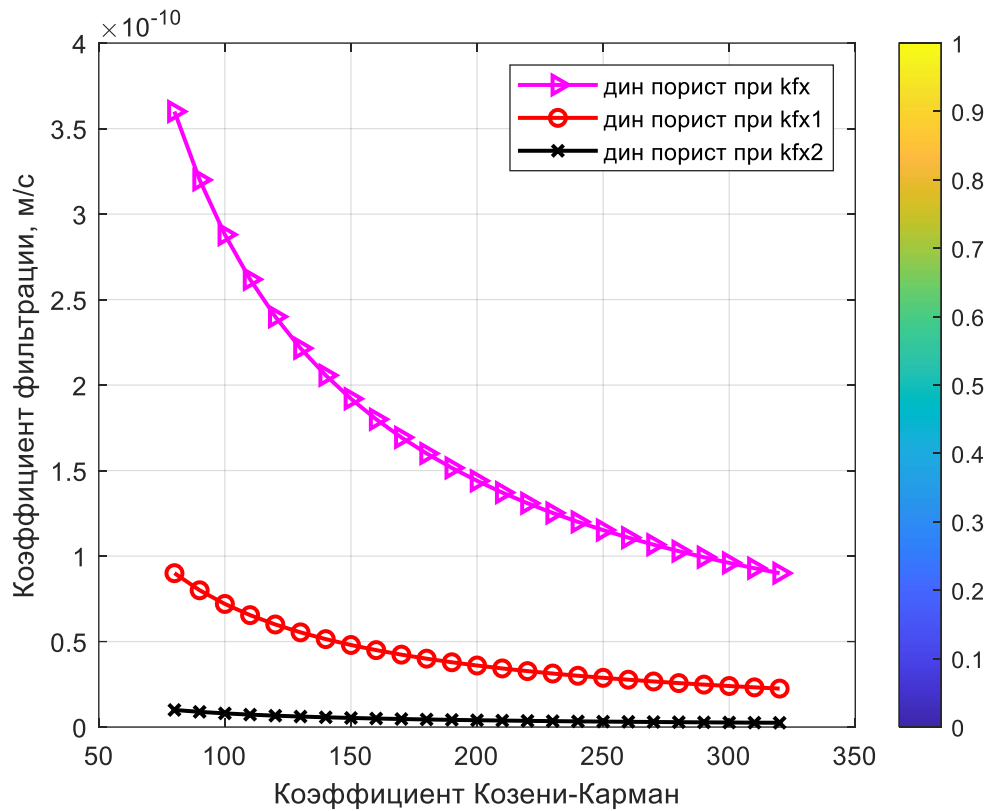


Рис. 34. Зависимость коэффициента фильтрации в функции показателя Козени-Кармана (коэффициенты фильтрации: kfx - хлопчатобумажной ткани, соответствующий динамической (эффективной) пористости 200 мкм; kfx1 – льняной ткани, соответствующий динамической (эффективной) пористости 280 мкм); kfx2 –углеродной ткани полотняного переплетения, соответствующий динамической (эффективной) пористости 250 мкм)

При этом, решая задачу синтеза функциональных параметров (геометрических и гидравлических) КПС ПКМ применительно к реализации процесса пропитки, предшествующие [225] соображения дают возможность представить уравнение Дарси (2) посредством коэффициента проницаемости

$$Q = K_n S \left( \frac{P_f}{\mu H} \right) \quad (22)$$

где  $P_f$  – величина гидравлического вакуума – источника движущих сил процесса пропитки, Па.

Для КПС армирующей компоненты ПКМ, имеющих поры в виде параллельного пучка капилляров с диаметрами одного порядка [225], коэффициент проницаемости  $K_{II}$  может быть определен как

$$K_{II} = \frac{\pi d_K^4}{128} n \quad (23)$$

где  $d_K$  - диаметр капилляра, м;

$n$  - количество пор на единицу поверхности КПС,  $m^{-2}$ ;

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 [225]. Однако, отклонение от линейности закона процесса пропитки может наступить при различных пороговых значениях, определяемых критерием Рейнольдса для различных параметров функционирования (гидродинамических параметров) КПС КПКМ [225].

Это может быть объяснено 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 нарушение устойчивости гидродинамических параметров потока связующей компоненты через КПС ПКМ.

Прогнозируя геометрические параметры КПС, задавшись значениями  $d_K$ ,  $n$  и имея в виду, что средняя скорость пропитки–заполнения пор КПС -  $v_{\phi} = Q/S$ , получим графическую зависимость скорости пропитки от коэффициента фильтрации для различных значения коэффициента динамической вязкости связующего (рис. 35).

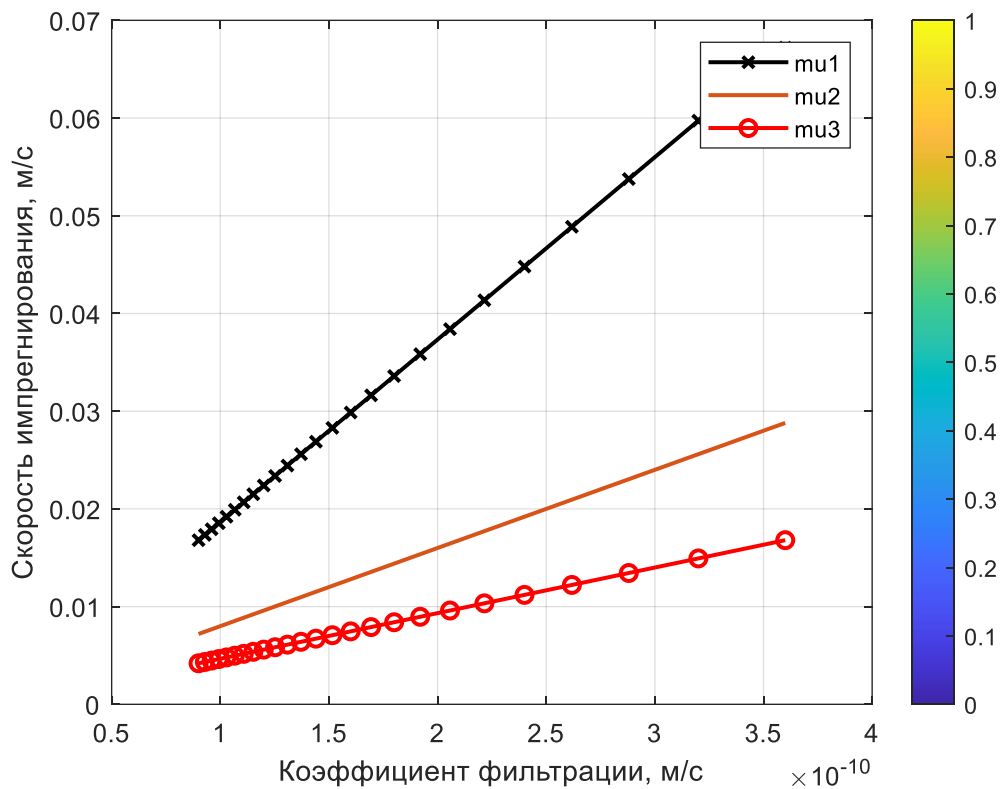


Рис. 35. Скорость пропитки в функции коэффициента фильтрации применительно к различным значениям динамической вязкости связующего ( $\mu_1=1,5$  Па\*с (ПВС марки 10/2);  $\mu_2=6,0$  Па\*с (ПВС марки 27/1) – для коллоидных композиций поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы;  $\mu_3=3,5$  Па\*с – для коллоидной композиции акрилатного полимера (оксилат жирных кислот – TUBIVISDRL 170))

Полученные графические зависимости дают возможность визуализации местных значений скорости пропитки в КПС ПКМ (как перегородку) с возможностью расчета значения пропускной способности КПС по заданной величине гидравлического вакуума в системе КПС. Зависимость среднего значения пропускной способности КПС от заданной величины вакуума показана на рис. 36.

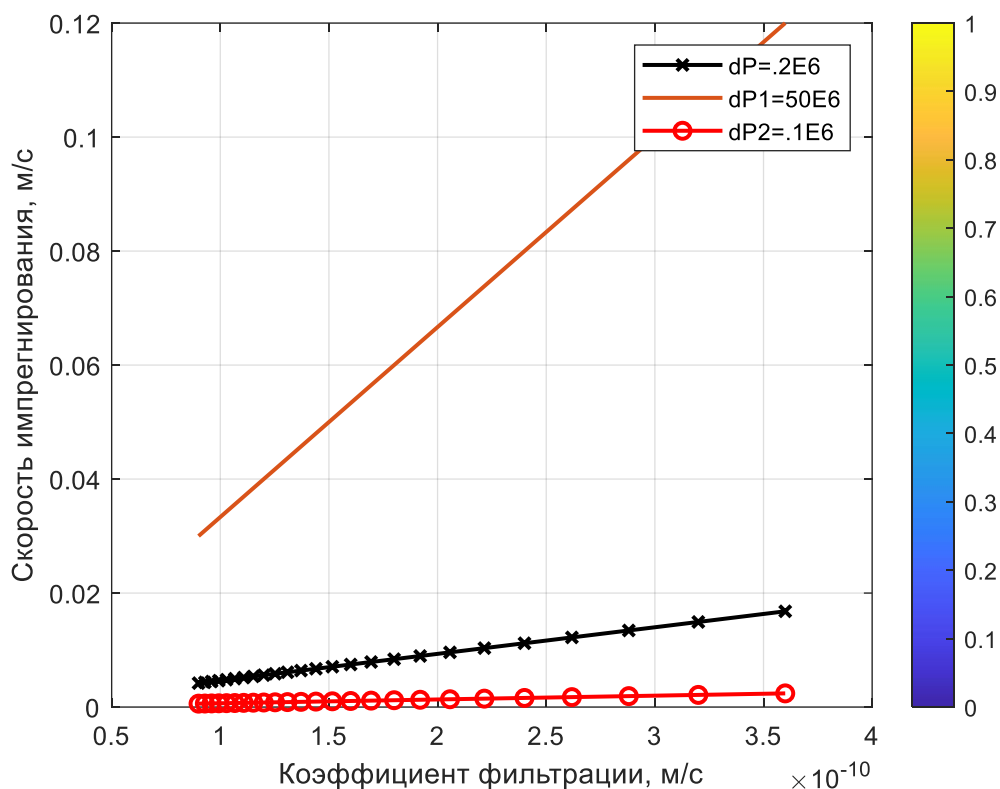


Рис. 36. Скорость пропитки в функции коэффициента фильтрации применительно к различным значениям создаваемого вакуума:  $dP=0,2E6$  Па – методом контактной формовки;  $dP1=50E6$  Па – методом прессования (давление впрыска);  $dP2=0,1E6$  Па – методом вакуумной инфузии

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  $K_{\text{П}}$  этих материалов, возможно, определить только экспериментально или прогнозировать методами синтеза и анализа стохастических моделей.

Одним из направлений повышения производительности процесса пропитки КПС нами рассматривается возможность сообщения исследуемой системе ультразвуковых колебаний [203, 204], создающих при динамическом режиме знакопеременное давление  $P_w$ , носящее волновой характер,

вследствие чего выражение, определяющее скорость пропитки имеет вид [202]:

$$V_{\phi} = \frac{K_{\phi}}{\mu} \cdot \frac{D_p + P_w}{1} \quad (24)$$

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 [205] дополнительные параметры устройства генерирующего динамический режим процесса пропитки, мы получили зависимости скорости движения связующего в КПС для различных значений частот генерирования динамического режима процесса пропитки в форме ультразвуковых колебаний (рис. 37).

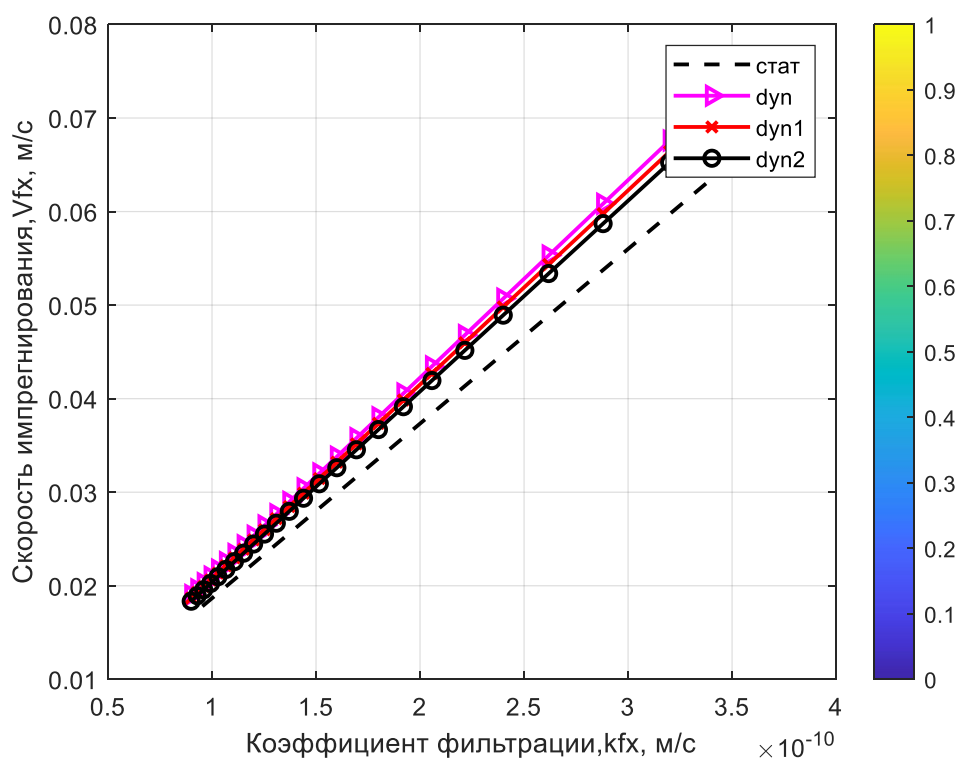


Рис. 37. Зависимости скорости пропитки связующего через КПС от коэффициента фильтрации в статическом и динамическом режимах при заданных частотах колебаний ультразвукового генератора: dyn– 50 кГц; dyn1- 42кГц; dyn2 - 35 кГц

При достаточно малой скорости движения связующего через КПС основную часть гидравлических потерь составляют потери на трение, а на долю потерь в местных сопротивлениях приходится сравнительно небольшая величина. Режим движения связующего в порах и межволоконном пространстве при этом будет носить ламинарный характер, а потери на трение будут связаны со скоростью потока посредством линейной зависимости в соответствии с уравнением Дарси (24).

Увеличение производительности процесса пропитки за счёт повышения скорости течения потока будет отклоняться от показателей ламинарного течения, что связано с возрастанием относительного влияния гидравлических потерь в местных сопротивлениях на суммарные потери в КПС армирующей компоненты ПКМ, причем течение жидкости не будет подчиняться зависимостям, соответствующим уравнению (5).

Для определения оптимальной скорости течения связующего через КПС армирующей компоненты ПКМ необходимо иметь показатель, выраженный в критериальной форме, так как сложность происходящих при этом явлений и многообразие различных факторов, влияющих на рассматриваемый процесс, не позволяют решать описывающие его уравнения в аналитическом виде.

Движение связующего через КПС армирующей компоненты ПКМ помимо критерия Рейнольдса (Re) как меры отношения инерционных сил и сил трения в КПС будет определяться также критерием Эйлера, характеризующим зависимость скорости пропитки от полного перепада давлений в КПС армирующей компоненты ПКМ и являющегося мерой отношения сил гидравлического давления и сил инерции в потоке связующего.

$$\text{Re} = \frac{\nu_{\phi} \rho \sqrt{K_{\Pi}}}{\mu} \quad (25)$$

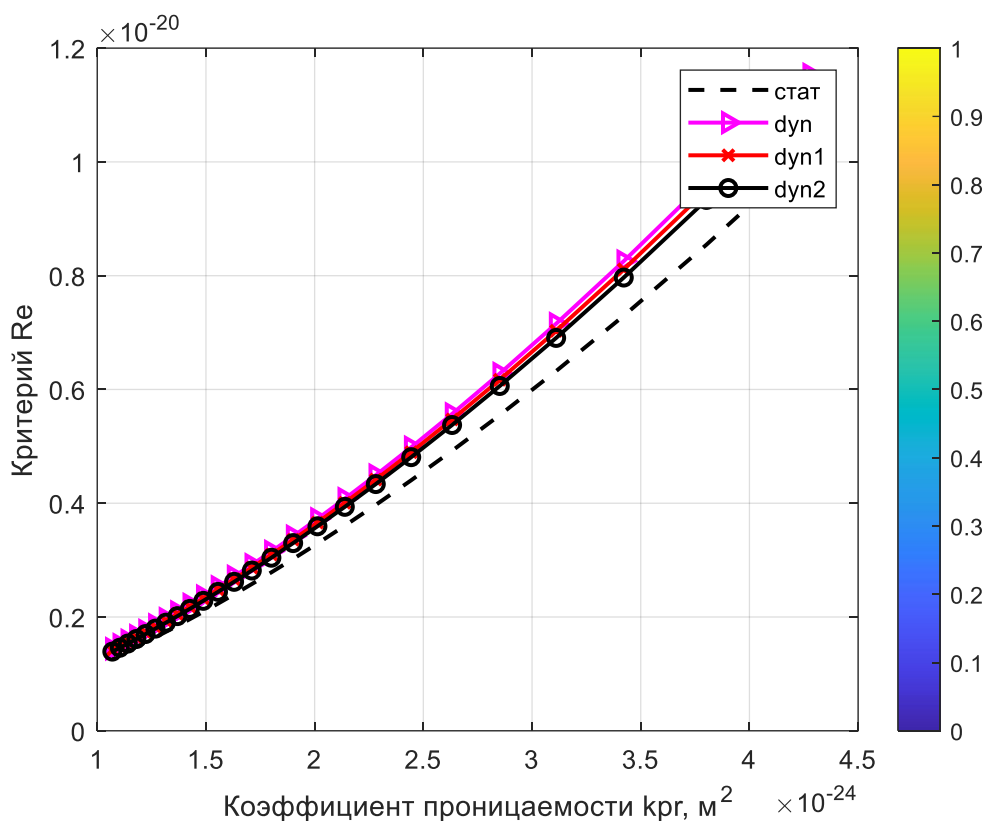


Рис. 38. Значения критерия Re в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах при динамической вязкости связующего ( $\mu=1,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  (ПВС марки 10/2)– для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы

Поскольку движущая сила в процессе пропитки определяется глубиной гидравлического вакуума [225], создаваемого в КПС армирующей компоненты ПКМ по пути движения связующего, то применяется модифицированный критерий Эйлера, в котором показатель средней скорости пропитки выражен в виде численно равного ему показателя удельной пропускной способности КПС [225] армирующей компоненты ПКМ при заданной величине вакуума [206], характеризующего для несжимаемой жидкости с постоянными физическими параметрами отношение сил давления



и сил инерции с позиций величины не абсолютного давления, а его изменения [225].

Для характеристики влияния толщины слоя КПС армирующей компоненты ПКМ на процесс пропитки КПС критерий Эйлера ( $Eu$ ) целесообразно преобразовать, заменив показатель перепада давления – гидравлического вакуума, величиной градиента давления  $\Delta p/H$  [201].

Экспериментальное определение параметра, определяющего геометрические характеристики КПС армирующей компоненты ПКМ - коэффициентом проницаемости  $K_{II}$ , величина которого зависит только от геометрических параметров КПС армирующей компоненты ПКМ [199] даёт возможность выразить модифицированный критерий Эйлера в виде

$$Eu = \frac{\Delta p}{H} \frac{\sqrt{K_{II}}}{v_{\phi}^2 \rho}. \quad (26)$$

Зависимости изменяющихся критериев  $Re$  и  $Eu$  от величины гидравлического вакуума в виде градиента давления  $\Delta p/H$  применительно к условиям движения фильтруемой связующей через проницаемую КПС в условиях статического режима движения и режима интенсифицированного ультразвуковыми колебаниями, сообщёнными вязкой связующей, показаны на рис. 38 и рис. 39 а.

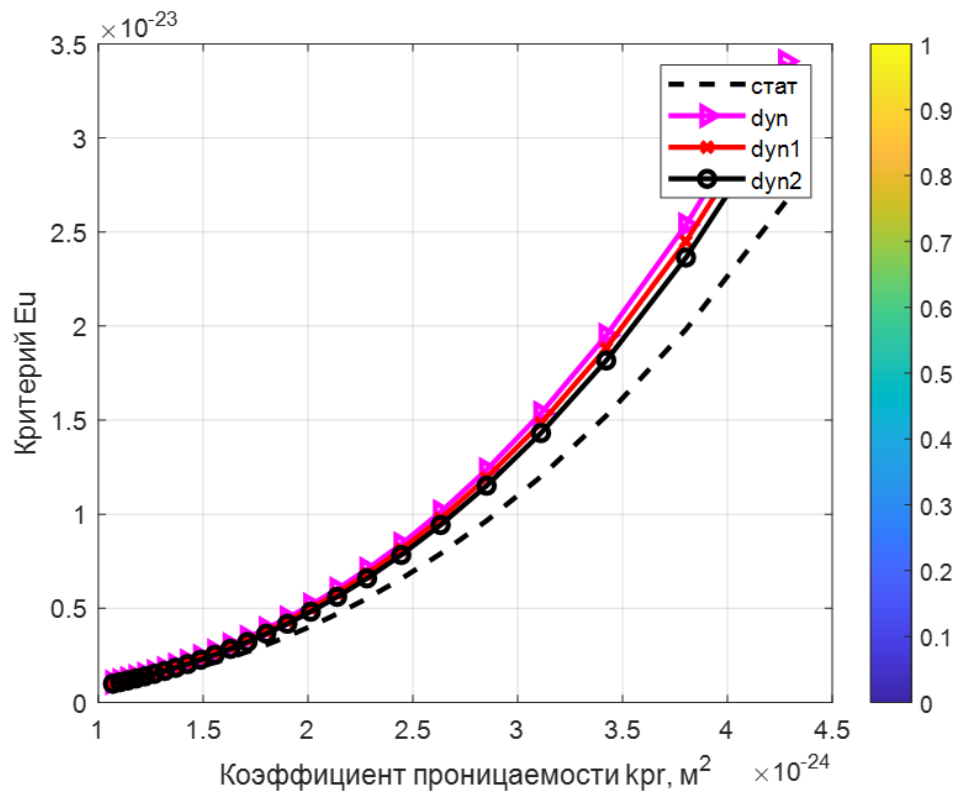
Критерий Эйлера будет в случае ламинарного режима течения иметь очень большие значения, так как силы давления по много раз превышают величину инерционных сил, а величина критерия Рейнольдса будет крайне мала ввиду преобладающего влияния сил трения (рис. 40), т. е.

$$Re \rightarrow 0; Eu \rightarrow \infty,$$

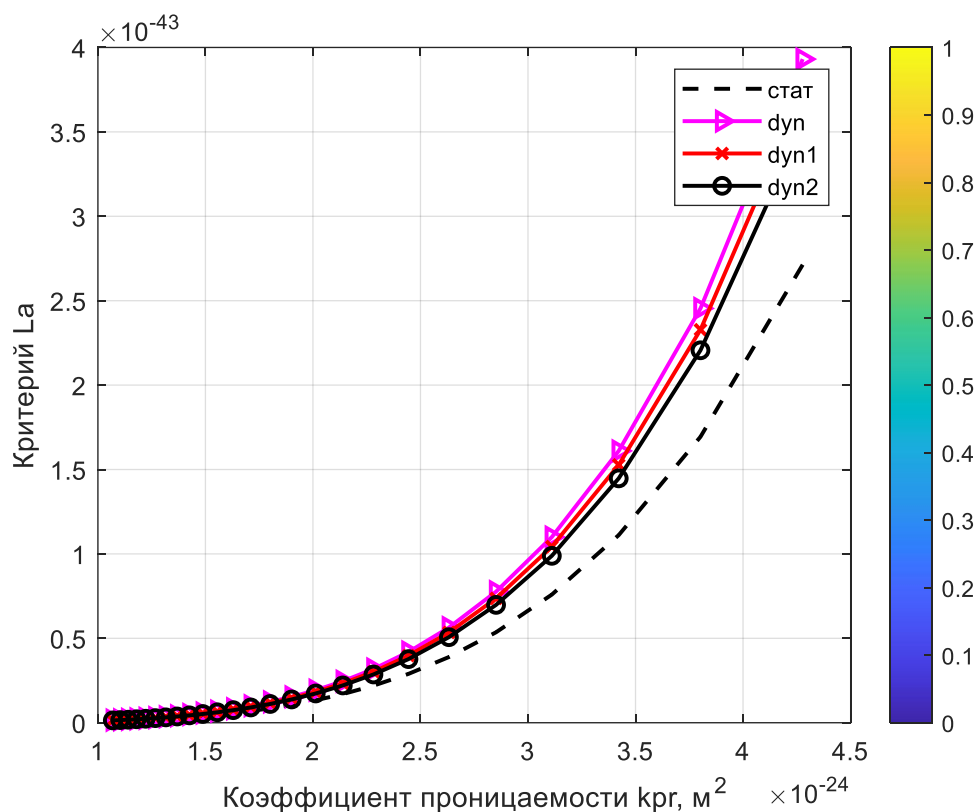
а в качестве критерия подобия может быть использован критерий Лагранжа ( $La$ ), определяемый как произведение вырождающихся критериев Рейнольдса ( $Re$ ) и Эйлера ( $Eu$ ) [207]

$$La = Re Eu = \frac{\Delta p K_{II}}{\nu_{\phi} \mu H} \quad (27)$$

Постоянство критерия Лагранжа при заданных технологических параметрах процесса пропитки в условиях ламинарного режима свидетельствует об автомодельности процессов перемещения связующего через КПС КПМ, т. е. об их автоматическом подобии (рис. 39, б).



а)



(б)

Рис. 39. Характер изменение критериев Эйлера (а) и Лагранжа (б) в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах пропитки для динамической вязкости связующей ( $\mu=1,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  (ПВС марки 10/2) – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы

Подобие процесса пропитки при ламинарном режиме в случае выбора в качестве геометрического параметра, входящего в критерии подобия, коэффициента проницаемости  $K_{II}$  является неполным, так как в этом случае граничные значения применимости линейного закона фильтрования зависят от частных значений свойств фильтрующей способности структурных параметров армирующей КПС ПКМ.

Изложенное справедливо для движения связующего через КПС армирующей компоненты ПКМ, т. е. для процесса пропитки КПС ПКМ.

Поскольку в реальных условиях в связующем, хотя и содержатся твердые частицы, но накопления этих частиц в порах фильтрующей перегородки и на ее поверхности не приводит к изменению пористости КПС армирующей компоненты ПКМ, в виду ее систематического обновления, и тем самым к изменению режима течения жидкой связующей через КПС ПКМ.

Трансфер связующего через КПС ПКМ, как фильтрующую перегородку, реализуется при заданных параметрах: при постоянных значениях гидравлического вакуума и скоростях пропитки, определяющих задаваемые параметры технологического процесса (рис. 35, 39).

Критериальная форма зависимостей, характеризующих процесс пропитки, как частного случая процесса фильтрования связующего через КПС ПКМ, в условиях гидравлического вакуума при изменении скорости течения характеризуется критерием гомохронности [206]

$$Ho = \frac{v_{\phi} \tau}{\sqrt{K_{II}}}, \quad (28)$$

где  $\tau$  длительность процесса пропитки (заполнения КПС ПКМ), с.

Значения критерия  $Ho$ , характеризующие изменчивость средней скорости заполнения КПС ПКМ при заданной величине гидравлического вакуума и в условиях статического и динамического режимов нагружения системы приведены на рис. 40.

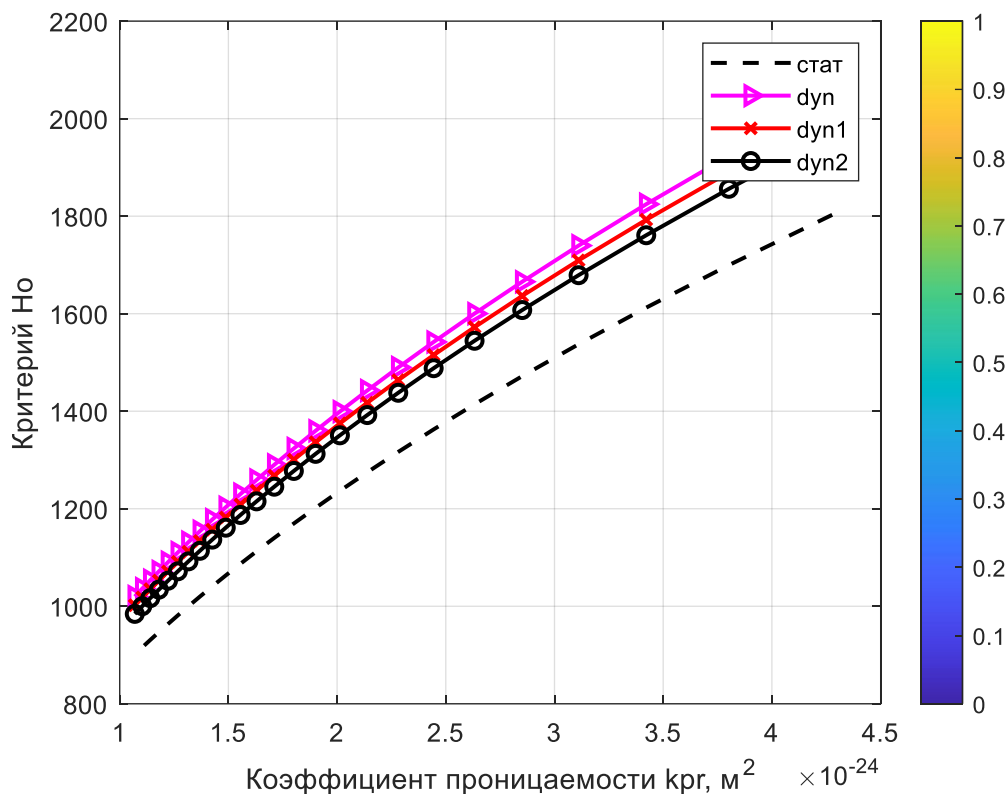


Рис. 40. Характер изменение критерия гомохронности –  $H_o$ , в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах по значениям динамической вязкости связующей ( $\mu=1,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  (ПВС марки 10/2) – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы

Поскольку движущей силой процесса пропитки является перепад давлений на пористой перегородке, то очевидно, что процесс фильтрования определяется зависимостью вида [207]

$$Eu = f(H_o), \quad (29)$$

где в модифицированном критерии Эйлера показатель средней скорости фильтрации заменен численно равным ему показателем удельной пропускной способности пористой перегородки при соответствующем перепаде давления (20).

Применительно к процессу пропитки с самоочищающейся структурой КПМ эта зависимость получена нами и представлена на рис. 41.

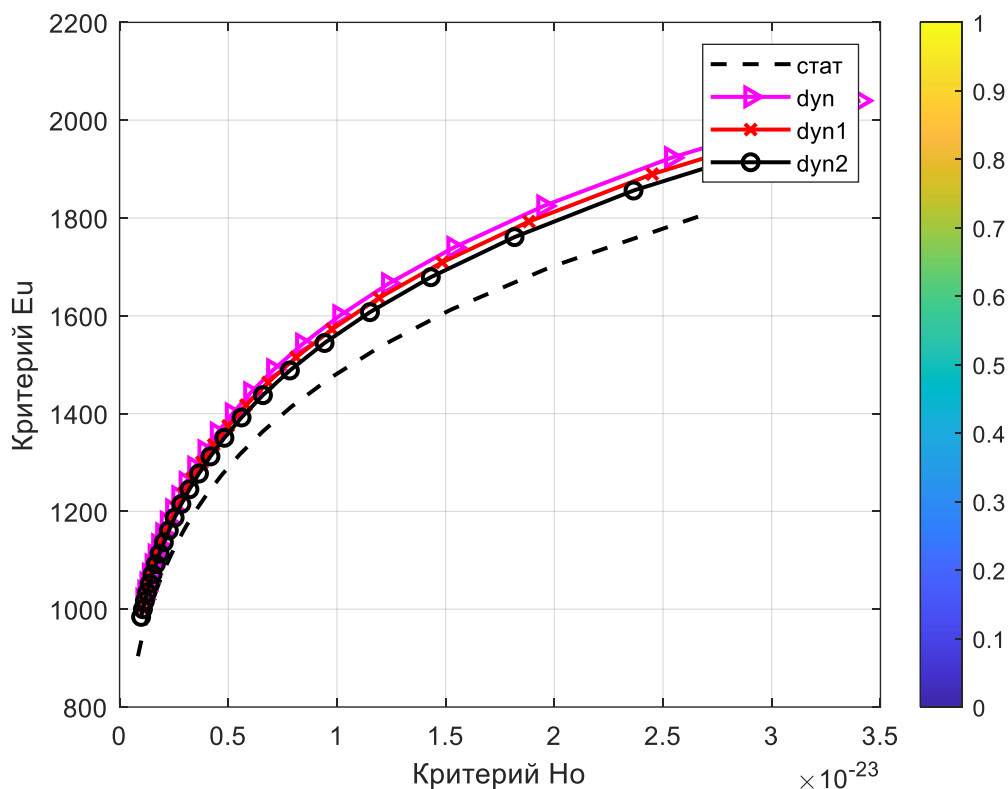


Рис. 41. Зависимость модифицированного критерия Эйлера в функции критерия гомохронности  $No$  -при статическом и динамическом режимах при динамической вязкости связующей ПВС марки 10/2  $\mu=1,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы

Она позволяет установить значения кинетических параметров процесса пропитки, которые необходимы для его реализации по заданным структурным параметрам КПС ПКМ.

Процессы адсорбции вязкой связующего текстильным армирующим очень чувствительны к линейному размеру пор. Если размеры микропор соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул, то адсорбция протекает не

послойным заполнением поверхности молекулами, а по механизму объёмного заполнения [205].

Решение обратной задачи, ориентированной на синтез полимерной волокнистой пористой армирующей структуры – как фильтрующей перегородки, дает возможность определить усреднённые значения диаметра капилляра и их количество на единицу площади пористой структуры.

Входными параметрами синтеза являются заданные пропускная способность КПС ПКМ, величина гидравлического вакуума системы, геометрические характеристики, физико-механические свойства фильтруемой жидкости - связующего.

Приведенные графические зависимости дают возможность синтеза КПС армирующей компоненты ПКМ с переменной плотностью пористой структуры по пути движения связующего, обеспечивающей заданные значения коэффициента проницаемости  $K_{II}$  в соответствии с визуализированными результатами вычислительного эксперимента, представленными на рис. 41...43.

Результаты численного моделирования кинетики процесса пропитки армирующей капиллярно-пористой структуры вязким связующим, дают возможность прогнозирования задаваемых структурных параметров синтезируемого композитного полимерного материала, а также предпосылки к прототипированию технологического оборудования для реализации процесса пропитки с оптимальными технико-экономическими показателями.

Получены графические зависимости скорости пропитки связующего в капиллярно-пористой структуре при различных значениях частот генерирования внешнего динамического режима процесса воздействия в форме ультразвуковых колебаний для различных коллоидных композиций связующего, динамической пористости армирующей компоненты, с величинами перепада внешнего давления газовой среды на единичной длине диффузии применительно к методам получения ПКМ.

Приведенные результаты компьютерного анализа численного моделирования [225] процесса движения связующего с учетом транзитного расхода через пористую структуру с учетом гомохронности, характеризующего гидродинамические условия в нестационарных режимах ламинарного потока, дают возможность системного подхода в решении задачи анализа технологических параметров процесса [225] пропитки капиллярно-пористой структуры армирующей компоненты полимерного композитного материала вязкой полимерной матрицей, а также обеспечивают реализацию технологии синтеза аппаратного оформления системы пропитки по заданным конструкционным характеристикам на основе методов компьютерного объектно-ориентированного моделирования [225].

На рис. 42, представлен алгоритм [231] численного анализа процесса синтеза капиллярно-пористой структуры волокнистого композитного материала, в котором указаны процедуры ввода данных, таких как:

- перепад давления;
- коэффициент динамической вязкости;
- средний диаметр волокон;
- динамическая пористость
- плотность связующего

Для получения визуальных результатов численного эксперимента используются следующие процедуры по вычислению статических, динамических и гидродинамических параметров.



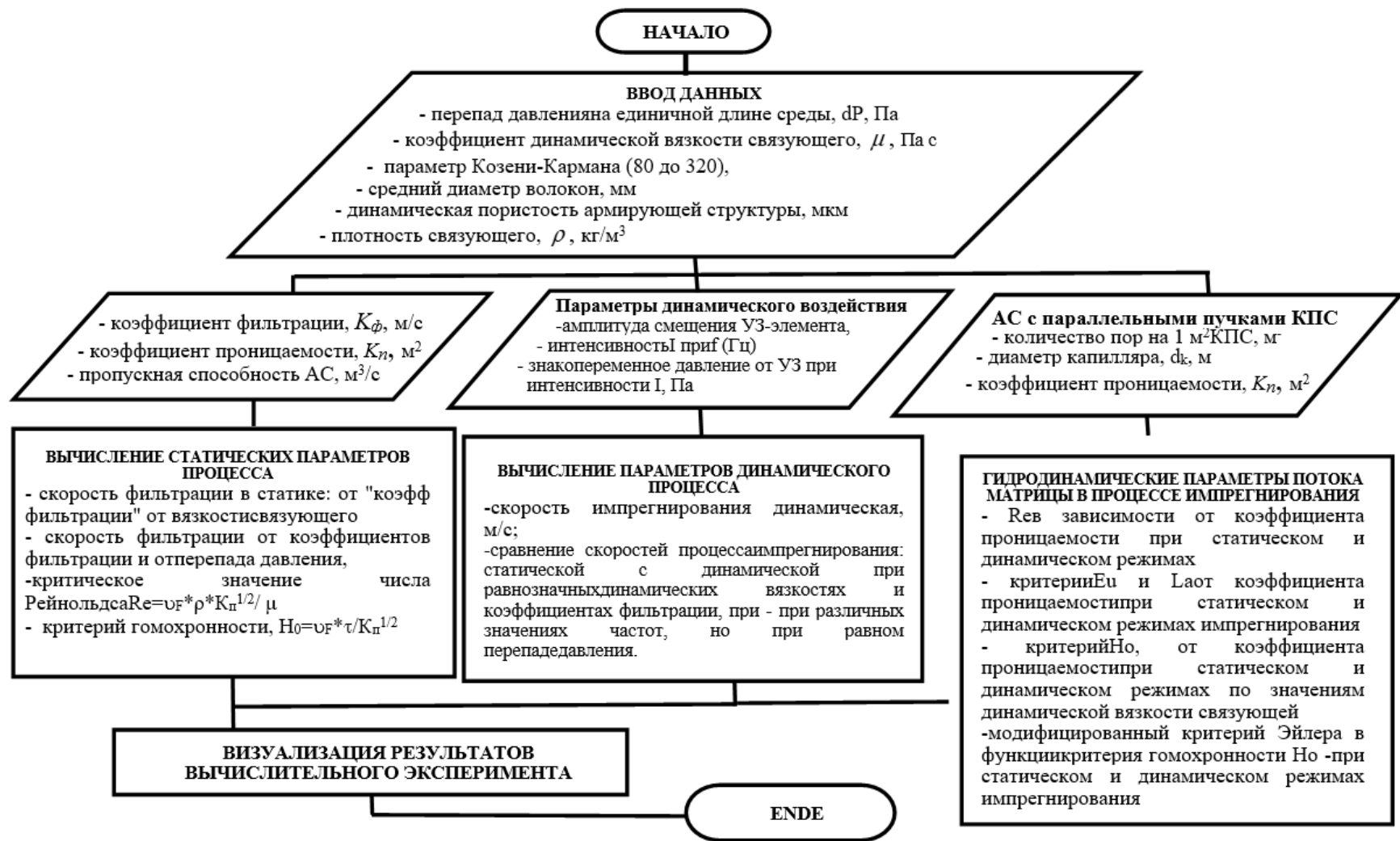


Рис. 42. Алгоритм численного анализа процесса синтеза капиллярно-пористой структуры волокнистого композитного материала

### 4.3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ МАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ ИНФУЗИИ МАТРИЦЫ В АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

#### 4.3.1. Особенности задач идентификации

Во многих случаях математическая модель, полученная с помощью теоретических исследований процессов, протекающих в системе, может быть неадекватной реальной системе. Непосредственная же оценка параметров и характеристик системы не представляется возможной – она осуществляется косвенно, через измеренные в результате эксперимента входные и выходные сигналы системы [215]. Поэтому, для того чтобы проверить, насколько точно построенная модель имитирует или предсказывает данные наблюдений, необходимо сравнить их при одинаковых воздействиях на модель и исследуемую систему, т.е. решить задачу идентификации модели [213].

Идентифицируемый объект принято представлять в виде, показанном на рис. 43 [214, 215], где  $t$  – время,  $u(t)$  – контролируемый (иногда управляемый) входной сигнал,  $\tilde{y}(t)$  – теоретический выход объекта,  $y(t)$  – наблюдаемый выход объекта,  $e(t)$  – аддитивная случайная помеха, отражающая действие не учитываемых факторов (шум наблюдения).

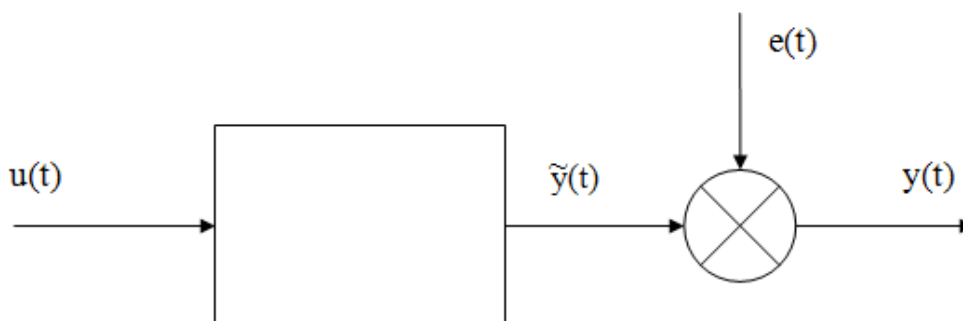


Рис. 43. Общее представление идентифицируемого объекта

Обычно предполагают, что связь между входным и теоретическим выходным сигналами задается в виде некоторого оператора  $\Psi$  [216]:

$$\tilde{y}(t) = \Psi[u(t)], \quad (30)$$

При этом наблюдаемый выход объекта может быть описан соотношением:

$$y(t) = \Psi[u(t)] + e(t), \quad (31)$$

#### **4.3.2. Решение задачи идентификации численной модели переходных состояний процесса массопередачи при инфузионной обработке капиллярно пористой структуры волокнистого материала**

С математической точки зрения задача идентификации рассматривается как задача определения экстремума некоторого показателя, характеризующего близость объекта и модели [216, 217]. Уравнения, представляющие собой необходимые условия достижения минимальной ошибки оценки параметров, связывают искомые оптимальные оценки параметров с экспериментальными данными  $y$  и  $u$ .

Процедуры идентификации, разработанной нами модели переходных состояний процесса массообмена [192] в КПС АС при инфузии-импрегнировании выполнялись по алгоритму, приведенному на рис. 44, используя набор средств пакета System Identification Toolbox системы научных и инженерных расчетов Matlab [219]. Идентификация основывалась на построении модели исследуемого объекта по наблюдаемым данным - входным и выходным сигналам.



Рис. 44. Алгоритм идентификации модели переходных состояний процесса массопередачи при инфузионном процессе течения вязкой матрицы в волокнистой АС

В основе начала синтеза компьютерной модели заложено формирование входных воздействий и выбор её структуры, определяющей взаимосвязь наблюдаемых данных через рассматриваемую совокупность параметров моделируемого процесса. При этом входные воздействия подавались на объект, и измерялись отклики на эти воздействия (выходные сигналы). Затем входные и выходные сигналы и выбранная структура использовались для оценки значений параметров в соответствии с принятым критерием качества.

Критерием качества идентификации, характеризующим степень адекватности модели объекту использован среднеквадратичный критерий, по которому определены оценки параметров, обеспечивающие минимальный средний квадрат разности выходных сигналов модели и объекта при одном и том же входном воздействии - совпадение модельного выхода с измеренным и сравнения выходных сигналов модели пространства состояния  $m1$  и авторегрессионной модели  $m2$  с измеренной.

В моделируемой системе «капиллярно-пористая армирующая волокнистая структура – упруго-вязкая матрица» наибольший интерес представляет закономерность, характеризующая взаимосвязь между перепадом давления на единичной длине среды АС скоростью пропитки при внешнем динамическом воздействии ультразвуковыми колебаниями. Взаимосвязь между этими параметрами принята нами в качестве входных и выходных параметров идентификационного эксперимента.

Таким образом для того, чтобы осуществить идентификационный эксперимент, нами выполнены следующие действия:

- построен объект идентификации, представляющий собой линейную математическую модель динамической системы с перепадом давления на единичной длине среды АС, скоростью пропитки при внешнем динамическом воздействии ультразвуковыми колебаниями, определяющую взаимосвязь между наблюдаемыми данными; модель представляет собой так называемый «черный ящик», в котором взаимосвязь между наблюдаемыми данными определяется через рассматриваемую совокупность параметров и не отражает физики процесса.

- определены входные сигналы, подающиеся на вход объекта, которые представляют собой перепад давления на единичной длине среды АС;

- получены значения выходных сигналов, которые представляют собой скорость пропитки при внешнем динамическом воздействии ультразвуковыми колебаниями;

- полагая, что нам неизвестны параметры объекта, произведено оценивание их по имеющимся входным и выходным сигналам.

В ходе эксперимента исходные массивы  $u$  и  $y$  были разделены на две половины, одна из которых была использована для идентификации, а вторая предназначена для верификации модели.

Формирование модели  $m1$  пространства состояния происходит с автоматическим определением ее порядка методом проб и ошибок предсказания. Сформированная при этом математическая матрица, является модельным объектом, характеризующим все свойства (всю информацию), сохраненные в модели  $m1$ .

Реакция модели  $m1$  идентифицируемой модели системы на единичный скачок с момента приложения внешнего возмущения и до наступления установившегося состояния приведена на рис. 45.

Оценивание частотной характеристики модели  $m1$  системы непараметрическим методом спектрального анализа представлено на рис. 46.

Для исследования модели с разработанной структурой, мы создадим модель  $m2$  дифференциального уравнения с двумя полюсами, одним нулем, и тремя задержками: ARX-модель, которая дает возможность объяснить или вычислить значение выхода по времени  $t$ , учитывая предыдущие значения параметров  $u$  и  $y$  при интервале дискретизации.

После формирования ARX-модели для сравнения влияния на правильность данных сравним ее с моделью  $m1$ . Результат сравнения представлен на рис. 46.

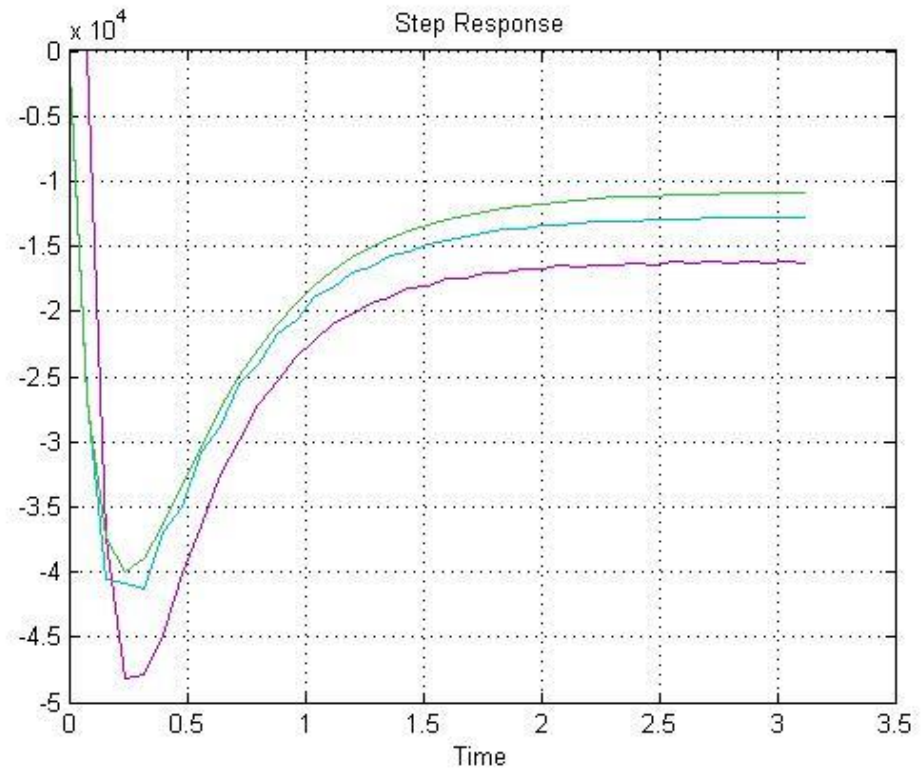


Рис. 45. Реакция модели m1 на скачок

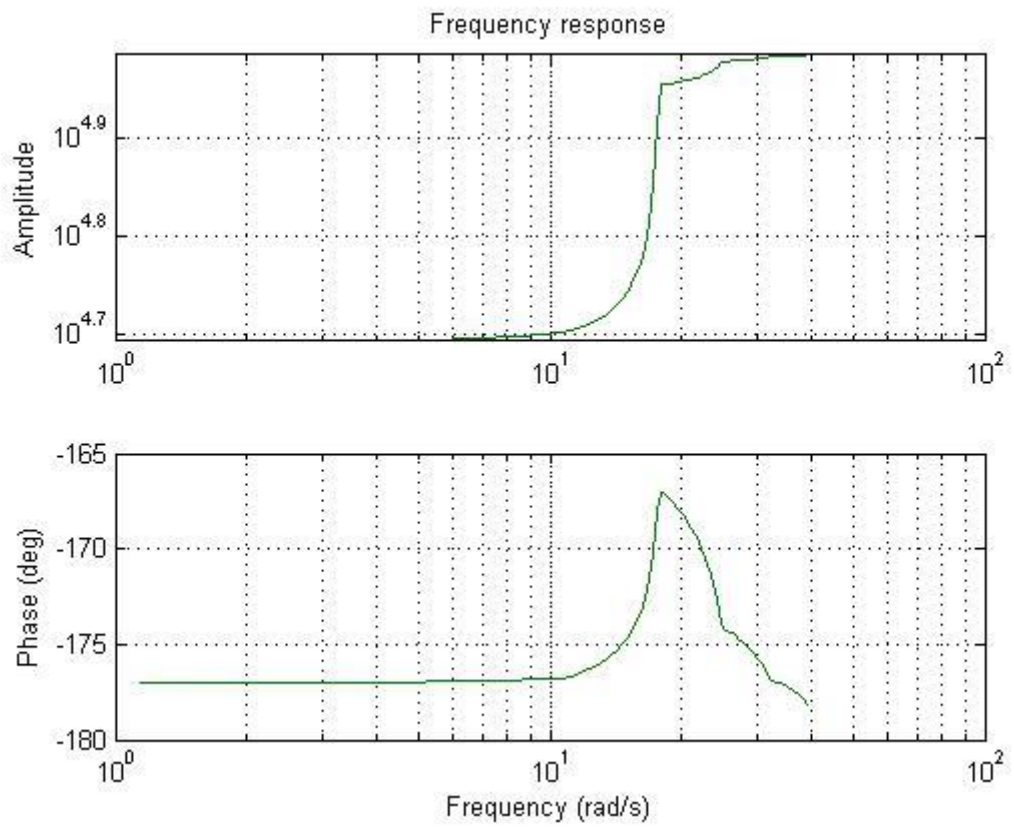


Рис. 46. Оценивание частотной характеристики модели m1

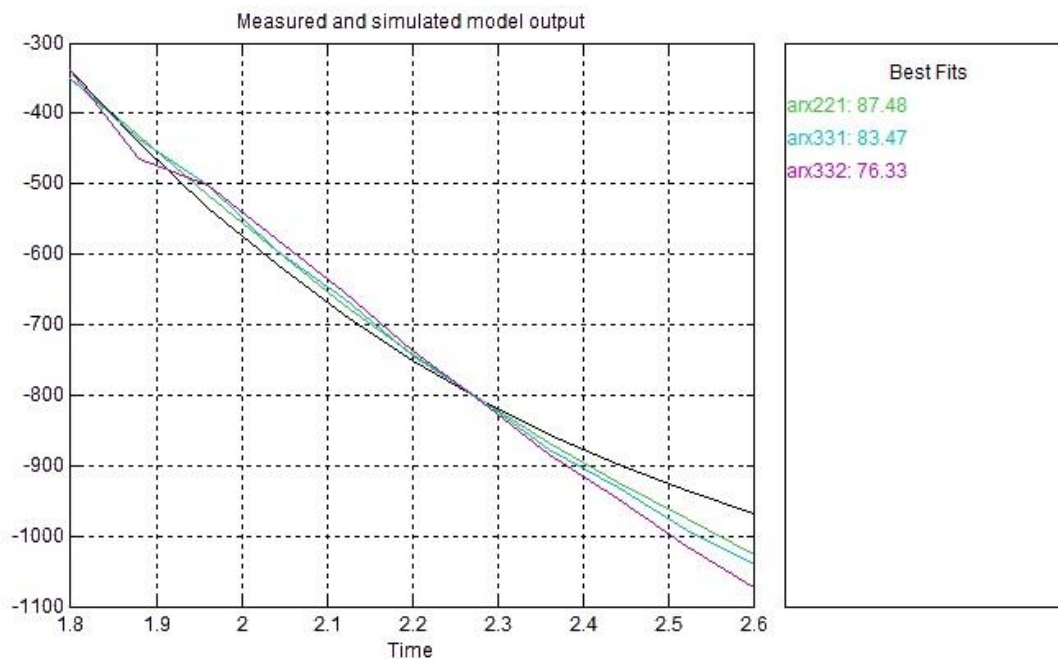


Рис. 47. Сравнение модельного выхода с измеренным

Результаты численного моделирования переходных состояний процесса массопередачи полимерной связующей матрицы в зоне вакуумной инфузии в армирующей капиллярно-пористой структуре в виде представления цепей Маркова позволяет учесть все основные особенности многочисленных параметров процесса.

Модель является открытой и позволяет подключать в нее детальные описания отдельных составляющих кинетики процесса пропитки АС вязким связующим, а также служит основой для разработки численного описания процесса массопередачи полимерной матрицы в зоне вакуумной инфузии в армирующей КПС и с возможностью его реализации средствами компьютерного анализа.

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.

Приведенные результаты компьютерного анализа численного моделирования процесса движения связующего с учетом транзитного расхода и движения связующего через пористую структуру, с учетом, характеризующего гидродинамические условия в нестационарных режимах ламинарного потока, дают возможность системного подхода в решении задачи анализа технологических параметров процесса пропитки КПС армирующей компоненты ПКМ вязкой полимерной связующей.

Результаты идентификации численной модели процесса пропитки показали величину минимального среднего квадрата разности выходных сигналов модели и объекта при одном и том же входном воздействии, составляющим 87,48%- совпадения модельного выхода с измеренным и сравнения выходных сигналов моделей пространства состояния  $m1$  и авторегрессионной модели  $m2$  с измеренными, свидетельствующим об адекватности разработанной нами численной модели переходных состояний процесса массопередачи при инфузионной обработке армирующей КПС композитного материала.

#### **4.4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УСТРОЙСТВА С АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРОЙ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ВНЕШНЕГО НАГРУЖЕНИЯ**

##### **4.4.1. Физические особенности гидродинамического процесса кавитации при вакуумной инфузии армирующей структуры**

При производстве волокнистого композита наиболее эффективным является технология, опирающаяся на применение колебательных явлений, в частности, использующая ультразвуковые колебания.

Особенности и эффективность применения данной технологии инфузии-пропитки в условиях различных частотных параметров УЗ-колебаний и применительно к различным матричным компонентам (рабочим жидкостям) в системе композитного материала рассмотрены нами применительно к различным ситуациям, определяющим образования ПКМ, определяемым структурой АС, упруго-вязкими параметрами матрицы, способом, обеспечивающим проникновение матрицы в КПС волокнистой АС.

Ультразвуковое воздействие приводит к возникновению в связующем кавитационных явлений, заключающихся в резком схлопывании пузырьков и вызывающих сильные гидродинамические возмущения в жидкости, сопровождающиеся мощными микропотоками. Кроме того, в пузырьках происходит разогрев парогазовой смеси, что в свою очередь снижает вязкость связующего и облегчает его проникновение в структуру волокнистого материала. В разрабатываемом устройстве не происходит, в отличие от известных устройств, движения потоков связующего навстречу друг другу, создаваемых рабочим инструментом, приводя к постоянному движению жидкости в объеме материала [193]. При этом уменьшение амплитуды колебаний ультразвукового воздействия приводит к тому, что в процессе обработки связующее, находящееся во внутренних областях структуры многослойного волокнистого материала, уже не подвергается гидродинамическому воздействию, в то время как в областях у поверхности субстрата кавитационные эффекты продолжают воздействовать на связующее. В результате происходит интенсивное и равномерное распределение связующего в структуре волокнистого материала, что приводит к повышению эффективности процесса пропитки многослойных волокнистых материалов и равномерности распределения связующего в структуре волокнистого наполнителя за счет попеременного воздействия ультразвуковых колебаний [200].

Одно из важнейших гидродинамических явлений – кавитация обусловлено образованием в жидкости под действием достаточно больших разрывающих напряжений пустот, которые в следующее мгновение снова быстро смыкаются.

Силы, возникающие при смыкании сферического газового пузырька (кавитационной пустоты) в жидкости, могут быть определены следующим образом (по Рэлею).

Если радиус газового пузырька уменьшается от начального значения  $R_0$  до значения  $R$  в жидкости с гидростатическим давлением  $p_0$ , то скорость  $v$  встречного движения частиц жидкости обратно пропорциональна радиусу  $R$  уменьшающегося пузырька. Таким образом, при  $R \rightarrow 0$   $v \rightarrow \infty$ . Если это быстрое движение внезапно прекратится вследствие полного смыкания полости, то сконцентрированная в ничтожно малом объёме кинетическая энергия освободится и преобразуется частично в тепловую энергию и частично в энергию сжатия. При этом из центра сомкнувшейся полости распространится сферическая ударная волна. Согласно Рэлею на расстоянии  $r = 1,587R$  от центра пузырька в жидкости возникает максимальное давление

$$p = p_0 \frac{R_0^3}{4^{\frac{1}{3}} R^3} \quad (32)$$

Для  $R = 1/20 R_0$  и  $p_0 = 1$  атм получаем  $p = 1260$  атм. Это давление возникает в непосредственной близости от поверхности пузырька, но на самой поверхности оно равно нулю. Если газовый пузырёк уменьшается от исходного радиуса  $R_0$  до радиуса  $R$ , то при этом создаётся давление

$$p = \sqrt{\frac{2p_0}{3\beta} \left( \frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right)} \quad (33)$$

где  $\beta$  - сжимаемость жидкости. Для воды ( $\beta = 50 \times 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$ ) при  $p_0 = 1 \text{ атм}$  и  $R_0/R = 20$  получаем  $p = 10300 \text{ атм}$ . Время, в течение которого полностью смыкается газовый пузырёк радиуса  $R_0$  в жидкости с плотностью  $\rho$  при гидростатическом давлении  $p_0$ , равно

$$t = 0.915 R_0 \sqrt{\frac{\rho}{p_0}} \text{ сек} \quad (34)$$

где  $p_0$  выражено в дин/см<sup>2</sup>.

При нормальном давлении для смыкания газового пузырька диаметром 0,1 мм в воде требуется время 5 мксек. Если учесть, что при частоте ультразвука  $f$  (например, 35 кГц) такие кавитационные процессы происходят  $f$ - раз (35'000) в секунду, то становится понятным сильное разрушающее действие ультразвука.

Мёллер и Шох экспериментально исследовали импульсы давления, возникающие в процессе кавитации, а Нолтинг и Неппирас [224], приняв некоторые упрощающие условия, вывели следующее дифференциальное уравнение, которому подчиняется кавитационное колебание газового пузырька:

$$2\rho R^2 \frac{d^2 R}{dt^2} + 3\rho R \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + 4\sigma = 2R \left[ P \sin 2\pi f - p_0 + \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0}\right) \frac{R_0^3}{R^3} \right] \quad (35)$$

где  $R_0$  - начальное значение радиуса пузырька в момент времени  $t=0$ ,  $\rho$  - плотность и  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости с гидростатическим давлением  $p_0$ ,  $P$  - амплитуда звуковой волны с частотой  $f$ . Решение этого уравнения позволяет предсказать частотные зависимости и характер установления кавитационных колебаний, а, следовательно, и возникающих волн сжатия вблизи от полости. В другой работе этих же авторов обсуждаются граничные условия, при которых ещё возникает кавитация при изменении  $p_0$ ,  $P$ ,  $R_0$  и  $f$ .

Возникает вопрос, каким образом в жидкости могут образоваться пустоты или, другими словами, какое разрежение или разрывающее напряжение может обусловить появление кавитационных пустот. Следует различать два случая: жидкость содержит растворенные газы и газы полностью удалены.

Если в первом случае увеличить объём сосуда, полностью заполненного жидкостью, то вследствие возникающего разрежения жидкость будет перенасыщена газом, который и выделится в виде маленьких пузырьков. Это явление можно назвать "псевдокавитацией" в отличие от "истинной кавитации", которая может иметь место лишь в полностью жидкости.

Истинная кавитация происходит иначе. Рассмотрим порядок величины внутренних сил сцепления, которые должны быть преодолены при разрыве жидкости. Из нормального значения сжимаемости жидкости порядка  $10^{-4}$  атм<sup>-1</sup> можно заключить, что величина внутренних сил эквивалентна  $\sim 104$  атм. Было проделано много опытов по определению напряжения растяжения, необходимого для разрыва полностью жидкости. Экспериментально найденные значения характеризуются большим разбросом и равны от 100 до нескольких атмосфер. Поэтому Винсент [224] принимает, что в жидкости имеются определённые местные нарушения однородности (зародыши) в виде ничтожно малых пузырьков, содержащих газ под высоким давлением, и что разрыв жидкости происходит чисто случайно в местах нахождения зародышей. Условия механического равновесия газового пузырька радиусом  $R$ , находящегося в жидкости с поверхностным натяжением и гидростатическим давлением  $p_0$ , определяются соотношением

$$p = p_0 + \frac{2\sigma}{R} \quad (36)$$

где  $p$ -давление газа в пузырьке. Если принять для  $p$  наивысшее из найденных Винсентом значений 7,8, то из вышеприведённого соотношения получим для радиуса пузырька  $R = 2\sigma/(p-p_0)$  величину порядка  $10^{-5}$  см. Такие

"зародышевые" пузырьки, которые приводят к возникновению кавитации даже при весьма малых интенсивностях ультразвука, обладают ничтожной подъёмной силой и поэтому лишь с большим трудом могут быть удалены из жидкости. Последнего удаётся достигнуть лишь при помощи продолжительного кипячения жидкости или многократного интенсивного облучения её ультразвуком при пониженном давлении. Харви с сотрудниками нашли другой способ удаления зародышевых пузырьков. Они повышали давление до 1000 атм и выше, благодаря чему зародышевые пузырьки растворялись. Такую, лишённую зародышевых пузырьков воду можно нагревать до 200°C без образования пузырей пара и подвергать интенсивному ультразвуковому облучению без возникновения кавитации.

На эти важные для процесса ультразвуковой кавитации микроскопические пузырьки указывает также Блейк [224]. Кроме пузырьков, причиной возникновения кавитации в жидкостях при переменных звуковых давлениях, более низких, чем теоретически необходимые, могут явиться мельчайшие твёрдые частицы (пыль), особенно гидрофобные.

Наконец, возникновение кавитационных пустот в фазе отрицательного давления звуковой волны можно объяснить тем, что в жидкости вследствие броуновского движения имеют место сильные флуктуации внутренней структуры, то есть всегда есть области пространства с молекулами низкой энергии и области пространства с быстро движущимися молекулами высокой энергии.

Именно в последних областях, которые называют областями с повышенной микротемпературой, добавочное разрывающее напряжение, создаваемое звуковой волной, может обеспечить значение энергии, необходимое для разрыва жидкости.

#### **4.4.2. Синтез устройства ультразвуковой интенсификации процесса вакуумной инфузии армирующей структуры композита на основе многослойных волокнистых материалов**

Для реализации явления кавитации с технологическими целями разработаны и нашли определённое применение: - устройство для пропитки волокнистых армирующих материалов содержащее излучатель ультразвуковых колебаний и клинообразный концентратор колебаний с криволинейными боковыми поверхностями и внутренними каналами, выполненными в плоскости его симметрии, по которым движется связующее, подвергаясь ультразвуковому воздействию, что увеличивает его напор на поверхность армирующего волокнистого материала, интенсифицируя пропитку.

Недостатком данного устройства является сложность конструкции концентратора ультразвуковых колебаний и воздействие ультразвуковых колебаний только на связующее, причем до момента его контакта с волокнистым связующим;

- устройство для ультразвуковой пропитки [221], содержащее ванну со связующим, ультразвуковую колебательную систему, состоящую из концентратора колебаний и рабочего инструмента, выполненного в виде пластины со скругленными краями и криволинейной излучающей поверхностью, погруженного в связующее.

Недостатком данного устройства является низкая эффективность процесса пропитки, обусловленная кратковременным контактом наполнителя с излучающей поверхностью рабочего инструмента. Наполнитель обрабатывается ультразвуком локально в то время, когда он контактирует с излучающей поверхностью рабочего инструмента, установленного на выходе наполнителя из связующего. Все остальное время перемещения наполнителя через связующее в пропиточной ванне он пропитывается за счет капиллярного

эффекта достаточно вязким связующим, которое не подвергается воздействию ультразвука.

Наиболее близким к заявляемому является устройство для ультразвуковой пропитки волокнистых материалов [222], содержащее ванну со связующим средством, в которой установлены прижимные ролики, концентратор колебаний и рабочий инструмент, установленный в ванне в герметичном стакане ортогонально к обрабатываемой поверхности волокнистого материала и выполненный в виде пластины со скругленными краями и криволинейной излучающей поверхностью.

Недостатком данного устройства является низкая эффективность процесса пропитки, обусловленная рассеиванием ультразвуковых колебаний в результате отражения от стенок ванны и созданием встречных микропотоков связующего, что сказывается на качестве заполнения связующим наполнителя и требует дополнительного механического продавливания связующего в структуру наполнителя.

Разработанная математическая 3D-модель системы [207] интенсификации процесса вакуумной инфузии композитного материала, организованного на основе многослойной волокнистой структуры, относится к устройствам, использующим процессы ультразвукового воздействия на систему, определяющую структуру, состоящую из КПС АС и упруго-вязкой компоненты матрицы, обеспечивающих формирование композитной структуры в процессе инфузии-пропитки многослойного волокнистого материала из полимерного связующего, и которое может быть использовано в производстве препрегов на основе композитных материалов (стеклопластиков, органопластиков, углепластиков, в том числе и многослойных) для машиностроительной, авиационной, судостроительной, нефтегазовой и строительной промышленности и для бытовых целей.

Техническим результатом изобретения является повышение эффективности процесса пропитки многослойных волокнистых материалов и



равномерности распределения связующего в структуре волокнистого наполнителя за счет попеременного воздействия ультразвуковых колебаний.

Указанный технический результат достигается тем, что в устройстве для ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов, содержащем ванну для связующего, приводные ролики, концентратор колебаний и рабочий инструмент, установленный в ванне в виде герметичного корпуса с размещенным в нем концентратора колебаний и выполненный в виде пластин с излучающей поверхностью, согласно изобретению, рабочий инструмент с концентратором колебаний и излучающей плоской поверхностью выполнен в виде рядного набора герметичных корпусов, расположенных в ванне со связующим в параллельных рядных плоскостях по обеим сторонам и параллельно плоскости позиционирования движущегося полотна обрабатываемого многослойного волокнистого материала, представляющих собой чередование излучающих ультразвуковые колебания плоских пластин в составе герметичного корпуса и с промежутками между герметичными корпусами таким образом, что каждая излучающая поверхность герметичного корпуса рабочего инструмента верхнего ряда установлена противоположно пустого промежутка нижнего ряда излучающей поверхности герметичного корпуса рабочего инструмента, полностью перекрывая пространство между излучающими пластинами каждого герметичного корпуса рабочего инструмента противоположного ряда.

Технический результат достигается за счет попеременного воздействия ультразвуковых колебаний и возможности уменьшения на 50% амплитуды колебаний на свободные участки обрабатываемого многослойного волокнистого материала, создаваемых рабочими поверхностями рабочего инструмента в виде чередующихся пластин, расположенных по обеим сторонам обрабатываемого материала.

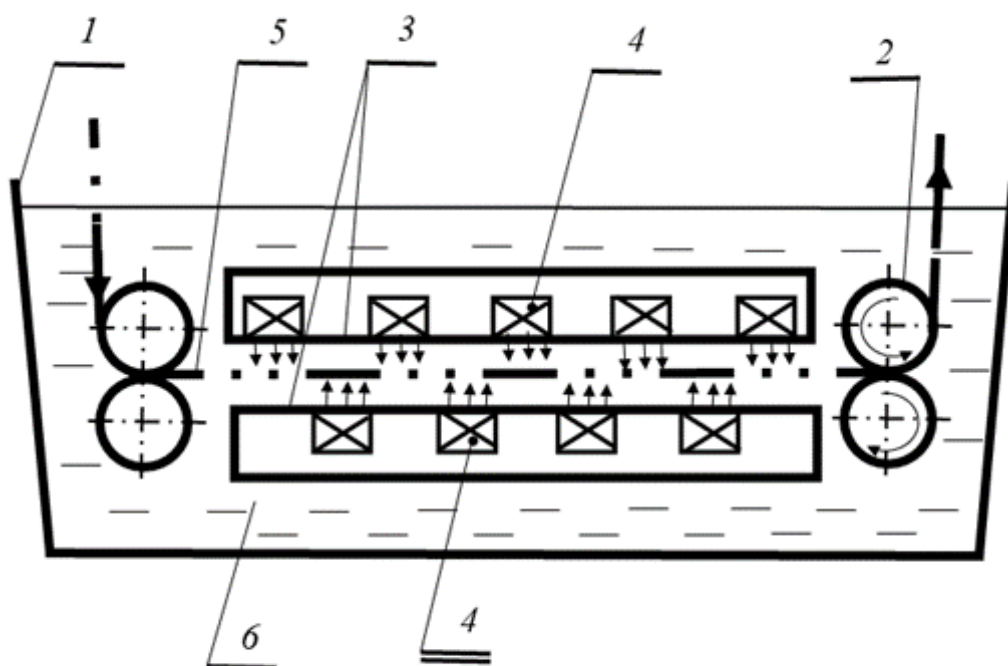


Рис. 48. Технологическая схема устройства для ультразвуковой инфузии многослойных волокнистых материалов

На рис. 48 представлена принципиальная технологическая схема общего вида устройства для ультразвуковой инфузии многослойных волокнистых материалов.

Пропиточная часть устройства содержит ванну 1, установленные в ней приводные ролики 2. Герметичный корпус 4 рабочего инструмента с концентратором колебаний 3 и излучающей плоской поверхностью, выполнен в виде рядного набора герметичных корпусов, расположенных в ванне со связующим 6 в параллельных рядных плоскостях по обеим сторонам и параллельно плоскости позиционирования движущегося полотна 5 обрабатываемого многослойного волокнистого материала АС, представляющих собой чередование излучающих ультразвуковые колебания плоских пластин в составе герметичного корпуса 4 и с промежутками между герметичными корпусами 4 таким образом, что каждая излучающая

поверхность рабочего инструмента верхнего ряда установлена противоположно пустого промежутка нижнего ряда излучающей поверхности герметичного корпуса 4 рабочего инструмента, полностью перекрывая пространство между излучающими пластинами каждого герметичного корпуса рабочего инструмента противоположного ряда.

Технологический процесс инфузии реализуется следующим образом.

Волокнистый многослойный материал 5, являющийся основой армирующей структуры, перемещается в ванне 1 со связующим 6 между приводными роликами 2 и между излучающими пластинами герметичного корпуса 4 рабочего инструмента, расположенными по обеим сторонам поверхности обрабатываемого материала 5. Концентратор колебаний 3 создаёт за счет ультразвукового воздействия кавитационные явления в объеме связующего 6. Возникающие в результате этого гидродинамические возмущения приводят к образованию интенсивных микропотоков связующего 6 в объеме пористой структуры волокнистого материала 5 армирующей структуры.

Расположение излучающих пластин герметичного корпуса 4 рабочего инструмента по обеим сторонам многослойного волокнистого материала позволяет избежать встречных резонансных потоков связующего 6, отрицательно влияющих на степень распределения связующего в объеме пористой структуры полотна 5 многослойного волокнистого материала за счет возможности уменьшения амплитуды ультразвуковых колебаний на 50%, что в процессе обработки позволяет равномерно распределять связующее в структуре волокнистого материала по его объёму за счет того, что кавитационные явления в этом случае будут возникать, перемещаясь постепенно к поверхностным слоям АС.

Кроме того, в образовавшихся газовых пузырьках происходит разогрев парогазовой смеси, что в свою очередь снижает вязкость связующего и облегчает его проникновение в структуру волокнистого материала.

Уменьшение амплитуды ультразвуковых колебаний в процессе обработки приводит к тому, что кавитационные явления, обуславливающие гидродинамические микротоки, возникают не во всем объеме многослойного волокнистого материала, а в его поверхностных областях.

Весь комплекс описанных явлений приводит к существенной интенсификации массообменных процессов, повышению эффективности процесса пропитки многослойных волокнистых материалов и равномерности распределения связующего в структуре наполнителя при изготовлении препрегов композитного материала.

Таким образом, предлагаемое устройство [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] повышает эффективность процесса пропитки многослойных волокнистых материалов и качество распределения связующего в структуре препрега.

Устройство для ультразвуковой пропитки многослойных композитных материалов [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] содержит ванну для связующего, в которой установлен ультразвуковой излучающий инструмент в виде пластин, расположенных в шахматном порядке по обе стороны волокнистого материала таким образом, что пластины нижнего ряда полностью перекрывают пространство между пластинами верхнего ряда, а обработка производится при частоте колебаний в интервале 14-20 кГц, интенсивности излучения – 2 - 5 Вт/см<sup>2</sup>, а амплитуда колебаний в интервале 25-250 мкм в процессе обработки уменьшается на 50%.

Устройство позволяет интенсифицировать процесс ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов различными полимерными

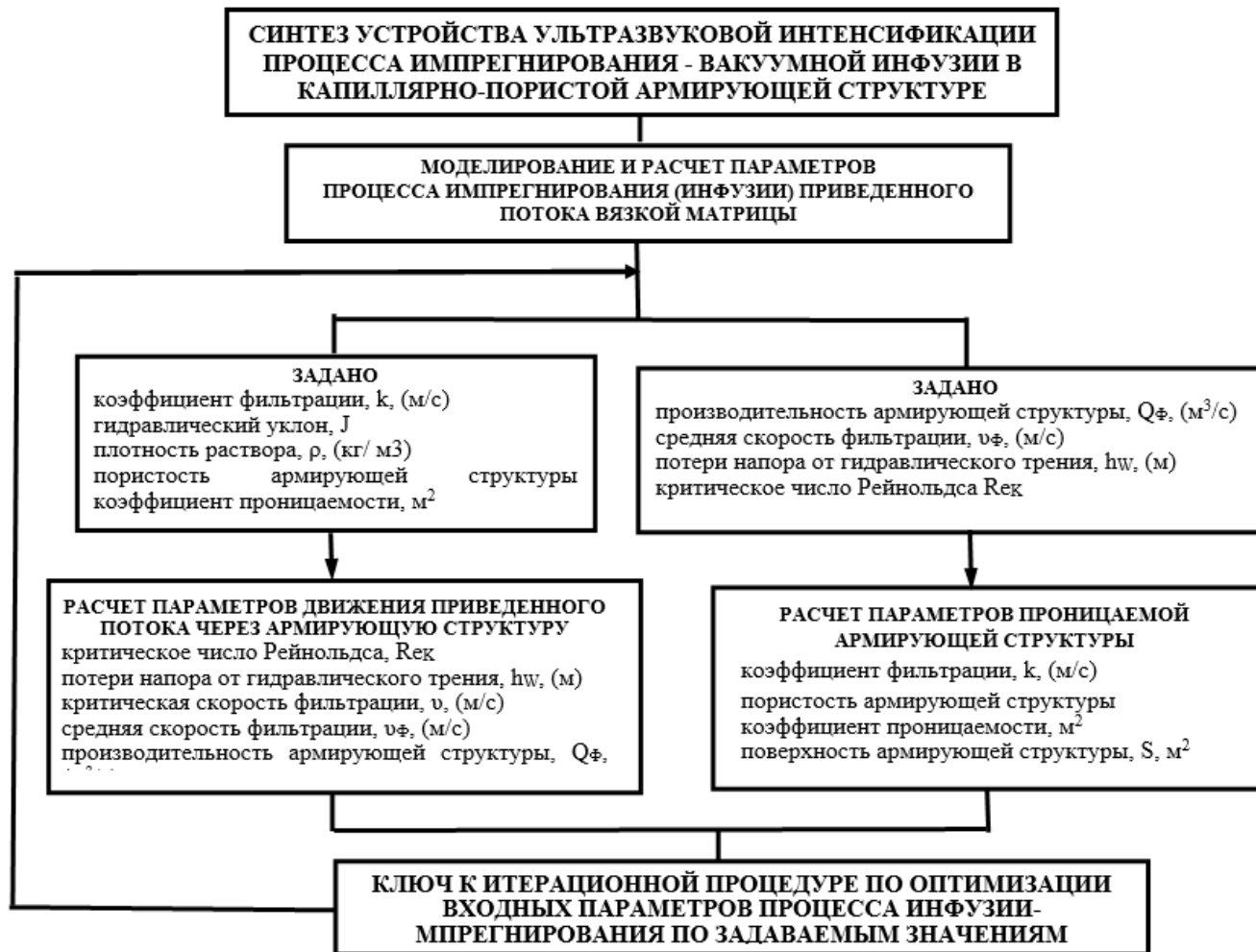


Рис. 49. Алгоритм синтеза устройства ультразвуковой интенсификации процесса пропитки - вакуумной инфузии в капиллярно-пористой армирующей структуре

связующими и может быть использовано в производстве препрегов из волокнистых композиционных материалов (стеклопластиков, органопластиков, углепластиков, в том числе и многослойных) для машиностроительной, авиационной, судостроительной, нефтегазовой и строительной промышленности и бытовых целей.

При этом алгоритм анализа и синтеза устройства (рис. 49) содержит итерационную процедуру, обеспечивающую возможность получения альтернативных результатов вычислений, являющихся основой принятия оптимального решения.

#### **4.4.3 Эффективность и перспективность использования технологии ультразвуковых колебаний на эксплуатационные характеристики композитного материала**

Эффективность и перспективность влияния поля действия ультразвуковых колебаний на эксплуатационные характеристики композитного материала рассмотрены в исследованиях И.В. Злобиной, Н.В. Бекренева, Д. А. Негрова, Е. Н. Ерёмин и др. В проведенных исследованиях, авторами отмечается повышения модуля упругости и снижения относительного удлинения, а также повышения равномерности прочностных характеристик и повышения параметров, определяющих увеличение предела упругости композитных материалов, что подтверждает выбранное нами направление.

На основе исследований [226] равномерности пропитки композита эпоксидной матрицей, наполненной углеродными волокнами, в ходе испытаний на растяжение получены механические характеристики контрольного (без применения ультразвуковых колебаний) и сформированного при воздействии ультразвуковых колебаний образцов, табл.5.

Механические характеристики контрольного и сформированного при воздействии ультразвуковых колебаний образцов, полученные в ходе испытаний на растяжение

Параметр	$F_m$ , Н	$F_{eh}$ , Н	$F_{el}$ , Н	$F_p$ , Н	$R_m$ , отн. ед.	$A$ , %
Контр. обр.	900	700	700	700	5	7,5
После УЗ обработки	950	830	800	800	6	5
Изменение	+5 %	+18 %	+14 %	+14 %	+20 %	-43 %

где,  $F_m$ , Н - максимальная разрушающая нагрузка,

$F_{eh}$  и  $F_{el}$ , Н - предел упругости материала,

$A$ , %- уменьшение относительного удлинения опытных образцов,

$R_m$ , отн. ед. - максимальный модуль упругости.

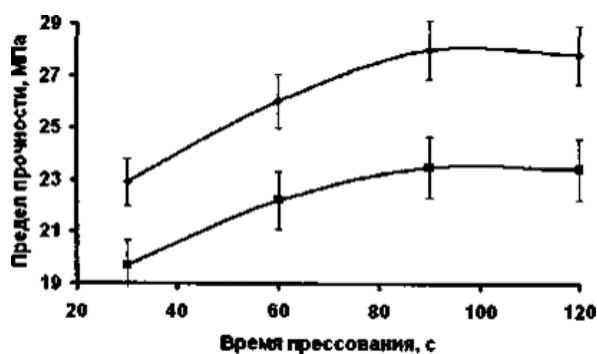


Рис. 50. Зависимость предела прочности от времени прессования



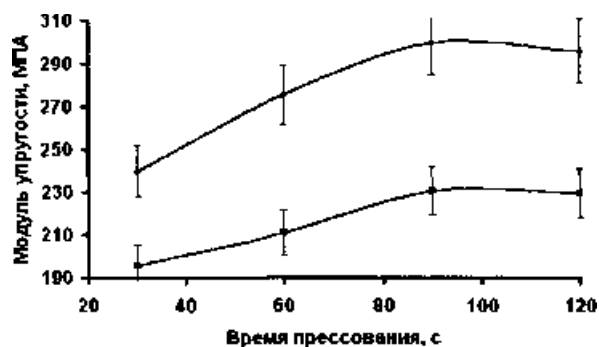


Рис. 51. Зависимость модуля упругости от времени прессования

В результате проведенных испытаний на растяжение, установлено, что оптимальное время прессования составляет 90 секунд (рис. 47, 48).

При этом у образцов, изготовленных методом ультразвукового прессования предел прочности выше на 15%, а модуль упругости на 23%, по сравнению с образцами, изготовленными по технологии без применения ультразвука. Дальнейшее увеличение времени прессования не приводит к изменению предела прочности и модуля упругости.

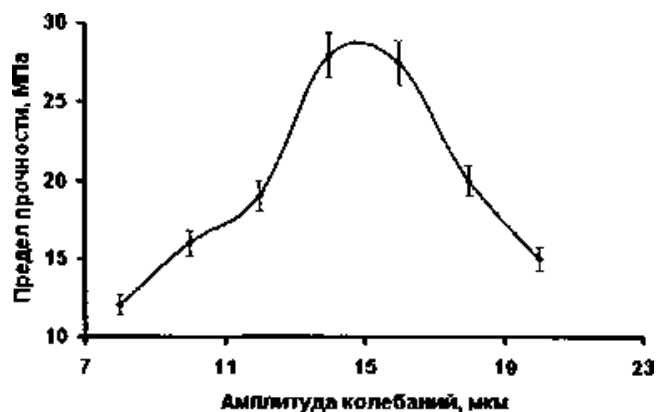


Рис. 52. Зависимость предела прочности полимерного композиционного материала от амплитуды колебаний

Влияние амплитуды колебаний на предел прочности композиционного материала носит ярко выраженный экстремальный характер с максимумом 14 мкм (рис. 49). При этом усилие прессования составляло 65 МПа, при времени прессования 90 секунд.

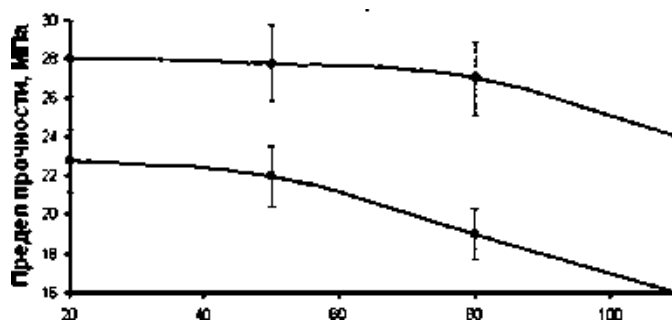


Рис. 53. Зависимость предела прочности от температуры

Испытания на растяжение при повышенных температурах показали, что у образцов, изготовленных ультразвуковым прессованием предел прочности практически, не изменяется до 80 °С, а от 80 °С до 120 °С изменяется на 15 % (рис. 50). Предел прочности образцов, изготовленных без ультразвука, с повышением температуры монотонно уменьшается и при 120 °С изменяется на 30 %.

В структуре исследованного композита поверхность характеризуется неоднородной морфологией неполным протеканием связующего. Структура композита контактировавшей с ультразвуковым излучателем характеризуется более однородно заполненной связующим, пустоты практически отсутствуют. Морфология поверхности имеет сглаженный волнистый повторяющийся вид, что связано с акустическими течениями в не отвержденном связующем, инициированными ультразвуковыми колебаниями.

Отмеченные особенности могут явиться причиной повышения модуля упругости образцов и снижения относительного удлинения, а также повышения равномерности прочностных характеристик и повышения параметров, определяющих увеличение предела упругости.

Таким образом, экспериментальные исследования [227] показывают положительное влияние воздействия ультразвука в процессе пропитки и отверждения связующего на упруго-прочностные характеристики ПКМ. Установлено [227] существенное повышение параметров, характеризующих механические свойства: нагрузки, соответствующей пределу упругости на

14,1-18,6 %, модуля упругости – на 20 %, при этом скорость изнашивания снижается на 23%, а коэффициент трения — на 15%. Показано повышение равномерности прочностных характеристик в партии образцов, проявившееся в снижении размаха вариации значений исследованных параметров с 25-35 до 12 %, что может иметь большое значение для надежности изделий, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий.

## ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основании проведенных 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 синтеза композитных материалов из капиллярно-пористых структур методами проектно-ориентированного моделирования в интегрированных САД-системах; Разница между коэффициентом фильтрации в функции показателя Козени-Кармана хлопчатобумажной ткани и углеродной ткани полотняного переплетения в 29 раз больше.

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» для 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  $k_s=0.5$

5. Установлено влияние воздействия ультразвуковых колебаний на кинетику процесса инфузии-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 применения импортозамещения в различных отраслях промышленности. Созданные разработки являются основой для обеспечения требуемого уровня качества и конкурентоспособности, производимых в Российской Федерации композитных материалов.

Предстоящие исследования включают в себя следующие направления:

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 натурных 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.

## Литература

1. Новые материалы. Под редакц. проф. Ю.С.Карабасова. М.: «МИСИС», 2002, 736 с.
2. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение. М.: Легпромбытиздат, 1989, 302 с.
3. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение (Исходные текстильные материалы). М., 1985.
4. Асланова М.С., Колесов Ю.И., Хазанов В.Е. Стекланные волокна. М. 1979.
5. Школьников А.Я., Полик Б.М., Кочаров Э.П., Нигин Э.Р. Стекланное штапельное волокно. М. 1969.
6. Разумовский В.К., Разумовская Н.Е. Бадалова Э.И., Кондратенкова С.В. Технология текстильного стакловолокна. М. 1966.
7. Радко Крчма. Нетканые текстильные материалы. (Перевод с чешского). М.: Легкая индустрия, 1964, 243 с.
8. Лабораторный практикум по технологии нетканых материалов: Уч.пособие для вузов. /Барабанов Г.Л., Горчакова С.А., Овчиникова С.А., Тюменев Ю.Я, Шошин В.В.// - М.: Легпромбытиздат, 1988, 416с.
9. Боам Кристиан. Трикотажные полотна технического назначения, выработанные на рашель машине DG-506-15 компании LIVA. Технический текстиль. №4, 2002. С.10.
10. Рашель –машины компании KARLMAYERMALIMO для выработки мощных основязанных полотен. Технический текстиль. №10. 2004. с.3-4.
11. Боам Кристиан. Установка COPCENRAMAX 3 CNC фирмы LIVA для изготовления многоосевых трикотажных технических полотен «ПАРАМАКС» шириной 256 см. Технический текстиль. №5. 2003. с.11-13.

12. Галавская Л.Е. Проблемы производства технического интегрированного трикотажа на двухфонтурных кругловязанных машинах. Технический текстиль. №17. 2008. с. 5-9.
13. Потягалов А.Ф. Переплетение хлопчатобумажных и штапельных тканей. Ивановское книжное издательство. 1955, 148 с.
14. Гордеев В.А. Ткацкие переплетения и анализ тканей. М.: Легкая индустрия, 1969, 116 с.
15. Контроль технологических параметров текстильных материалов: методы, устройства. Под редакц. Л.К. Таточенко. М.: Легпромбытиздат, 1085, 192 с.
16. Б. Лунд-Иверсен. Ткацкие переплетения. (Перевод с норвежского). М.: легпромбытиздат, 1987, 104 с.
17. Грановский Т.С., Мшвениерадзе А.П. Строение и анализ тканей. М.: Легпромбытиздат. 1988, 96 с.
18. Новые разработки в получении углеродных волокнистых материалов и изделий специального назначения на их основе. Технический текстиль. №19, 2009, с.41-42.
19. Керимов С.Г. Классификация многослойных переплетений тканых изделий технического назначения. Технический текстиль №8. 2003, с.21-22.
20. Калинин Е.Н., Карева Т.Ю., Толубеева Г.И., Кузнецов В.Б. Разработка композитных тканых текстильных материалов. Тез.докл. Межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера» (ПОИСК-2017) ч.2, Иваново, 2012.
21. Санталова П.С., Калинин Е.Н., Карева Т.Ю., Толубеева Г.И., Кузнецов В.Б. Создание тканых композитных текстильных материалов. Сб.материалов XX Международного научно-практического форума



- «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии» (SMARTEX-2017), Иваново, 2012.
22. Блинов О.В., Ершов С.В., Калинин Е.Н., Кузнецов В.Б. Моделирование текстильных композитных материалов для воздушных фильтров. Тез.докл. Межвузовской (с международным участием) молодежной научно-техн.конф. «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы» (ПОИСК-2018), Иваново, 2018.
23. Пат РФ 9225 «Многослойная ткань». Бушуева Г.Ф., Воронин В.А., Курилова В.А., Кузнецов В.Б., 1999.
24. Пат. РФ 2470045 «Облегченный морозостойкий материал с пониженной горючестью». Сорокина В.А., Пискунова Е.Е., Васильев Д.М., Кузнецова С.В., Ефремова Л.С., Варнашова Н.П., Кузнецов В.Б., 2012.
25. Пат. РФ. 2549409 «Биостойкий гидроизоляционный материал». Сорокина В.А., Пискунова Е.Е., Кузнецова С.В., Васильев Д.М., Варнашова Н.П., Масленникова Г.В., Макаров А.С., Кузнецов В.Б., 2015.
26. Пат. РФ 170869 «Ткань износоустойчивая». Толубеева Г.И., Лакеев Д.В., Карева Т.Ю., Кузнецов В.Б., 2017.
27. Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г. Композиционные текстильные материалы. Витебск: УО «ВГТУ», 2015, 299 с.
28. Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г. Термообработка при формировании композиционных текстильных материалов. Витебск: УО «ВГТУ», 2019, 162 с.
29. Браславский А.Н. и др. О механизме пропитывания волокнисто-пористых материалов в условиях образования тупиковых капилляров и заземленного воздуха. Журнал прикладной химии. 1970. Т.43. №8. С.1803-1810.
30. Воюцкий С.С. Физико-химические основы пропитывания и пропитки волокнистых материалов дисперсиями полимеров. Л.: Химия, 1969.

31. Shapiro L. American Dyestuff Reporter/ 1950. V.39. P.38. 1952. V.41. P.16.
32. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976.
33. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: 1974.
34. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. М.: Химия, 1985
35. Герасимов М.Н. Пропитка тканей: теория процесса, технология, оборудование. Иваново: ИГТА, 2002. 176 с.
36. Верников Я.Н., Андросов В.Ф. Обработка текстильных изделий в водных растворах СМС. М.: Легпромбытиздат, 1986, 144 с.
37. Ребиндер П.А., Липец М.Е., Римская М.М., Таубман А.Б. Физико-химия флотационных процессов. М.: Металлургиздат, 1933, 230 с.
38. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избранные труды. М.: Наука, 1978, 368 с.
39. Бельцов В.М. Оборудование текстильных отделочных предприятий. СПГУТД. СПб: 2000. 568 с.
40. Отделка хлопчатобумажных тканей. Справочник. Ч.2. Под ред. Н.В. Егорова М.: Легпромбытиздат, 1991.
41. Гизбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1966.
42. Капустин В.П. Интенсификация процессов сушки и термической обработки тканей при отделке. Дисс.канд.техн.наук. Иваново, 1975.
43. Щербаков В.И. Исследование влияния физических факторов на динамику и кинетику радиационной и радиационно-конвективной сушки тканей. Дисс.канд.техн.наук. Москва, 1973.
44. Техника переработки пластмасс. Под ред. Басова Н.И. и Броя В.М. М.: Химия, 1985, 347 с.
45. Альтер-Песоцкий Ф.Л., Островский Л.М. ВЧ-сварка тканей с термопластичным покрытием М.: ЦНИИТЭИлегпром, 1971, 28 с.

46. Глуханов Н.П. Физические основы ВЧ-нагрева. Л.: Машиностроение, 1989, 56 с.
47. Альтер-Песоцкий Ф.Л. Применение физических методов интенсификации технологических процессов. Текст. Пром-сть, 1980, №1, С. 51.
48. Никифоров А.Л. Использование энергии электромагнитных колебаний для интенсификации химико-текстильных процессов и создание на их основе энерго- и ресурсосберегающих технологий. Дисс. докт. техн. наук. Иваново, 2004.
49. Циркина О.Г. Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения эффективности отделки текстиля с использованием поля токов высокой частоты. Дисс. докт. техн. наук. Иваново, 2015.
50. Побединский В.С. Активирование процессов отделки текстильных материалов энергией электромагнитных волн ВЧ, СВЧ и УФ диапазонов. Иваново, ИХР РАН, 2000, 128 с.
51. Герасимов М.Н., Телегин Ф.Ю., Мельников Б.Н. Применение паровой обработки для интенсификации процессов текстильного производства. М.: Легпромбытиздат, 1993.26.
52. Альтер-Песоцкий Ф.Л. Применение вакуума в процессах жидкостной обработки текстильных материалов. Текст. пром-сть. 1970, №10. С. 54-57.
53. Альтер-Песоцкий Ф.Л. Физические методы интенсификации процессов крашения и отделки текстильных материалов. М.: Легкая индустрия, 1979.
54. Новорадовская Т.С. и др. Использование вакуумирования для интенсификации процессов крашения шерстяных материалов. Текст. пром-сть, 1987. №8. С. 53-54.
55. Щеголев А.И. Тенденции развития за рубежом оборудования для пропитки и обезвоживания текстильных материалов. Оборудование для

- ткацкого и красильно-отделочного производства.  
ЦНИИТЭИлегпищемаш. 1978. №6. С.3-18.
56. Альтер-Песоцкий Ф.Л., Артемова Л.А., Бабаев М.Ш. Пропитка тканей с использованием вакуума. Текст. пром-сть. 1977. №3. С 73-75.
57. Танвель А.Я. и др. Вакуумный способ интенсификации пропитки при крашении тканей. Сб.научн. тр. ИвНИТИ. М.: ЦНИИТЭИлегпром, 1981. С. 46-49.
58. Козлов В.В., Герасимов М.Н., Волжанкин Ю.Б. Исследование влияния параметров предварительного запаривания ткани на качество ее пропитки. Новое в технологии отделочного производства хлопчатобумажной промышленности. М.: ЦНИИТЭИлегпром, 1981. С. 18-24.
59. Козлов В.В. Интенсификация процессов пропитки волокнистых материалов путем их предварительного запаривания. Дисс. канд.техн.наук. Иваново. ИХТИ.1084.
60. Герасимов М.Н. Применение паровой обработки текстильных материалов для повышения эффективности процессов их отделки. Дисс.докт.техн.наук. Иваново. ИвТИ. 1991.
61. Козлов В.В., Богатырева Л.М., Захарова Т.Д. и др. Технологические возможности активирования ткани насыщенным паром при ее отделке терморезистивными смолами. Новое в технологии отделочного производства х/б промышленности. М.: ЦНИИТЭИлегпром. 1981. С. 120-126.
62. Физическая акустика Пер. с англ.: сб. в 2 ч. Ч.1. Физика акустической кавитации в жидкостях. Г. Флин; под.ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1967 – 138 с.
63. Физика и техника мощного ультразвука. Пульсации кавитационных полостей [текст]: в 3 ч. Ч.2Мощные ультразвуковые поля / В.А. Акуличев; под.ред. Л.Д. Розенберга – М.: Наука, 1968. – 266 с.

64. Эльпинер, И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие [текст] / И.Е. Эльпинер. – М.: Физматгиз, 1963 – 420 с.
65. Маргулис, М.А. Механизм звукохимических реакций и сонолюминисценции [текст] / М.А. Маргулис, И.М. Маргулис // Химия высоких энергий. – 2004. – 38, №5. – с. 323-33.
66. Маргулис, М.А. Электрические явления в многопузырьковых кавитационных полях [текст] / М.А. Маргулис // ЖФХ. – 2007. – 81, №7. – с. 1334-1338.
67. Маргулис, М.А. О механизме многопузырьковой сонолюминисценции [текст] / М.А. Маргулис // ЖФХ. – 2006. – 80, №10. – с. 1908-1913.
68. Маргулис, М.А. Основы звукохимии [текст]: учебное пособие для вузов / М.А. Маргулис. – М.: Высшая школа, 1984. – 272 с.
69. Neppiras, E.A. Cavitation produced by ultrasonics: theoretical conditions for the onset of cavitation [текст] / E.A. Neppiras, B.E. Noltingk // Proc. Phys. Soc. – 1951. –64B. – p. 1032-1038.
70. Физика и техника мощного ультразвука. Экспериментальное исследование ультразвуковой кавитации [текст]: в 3 ч. Ч.2Мощные ультразвуковые поля / М.Г. Сиртюк; под.ред. Л.Д. Розенберга – М.: Наука, 1968. – 266 с.
71. Физика и техника мощного ультразвука. Кавитационная область [текст]: в 3 ч. Ч.2Мощные ультразвуковые поля / Л.Д. Розенберг; под.ред. Л.Д. Розенберга – М.: Наука, 1968. – 266 с.
72. Перник, А.Д. Проблемы кавитации [текст] / А.Д. Перник. – Л.: Судостроение, 1966. – 439 с.
73. Кнэпп, Р. Кавитация [текст]: Пер. с англ. / Р. Кнэпп, Д. Дейли., Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 688 с.
74. Finch, R D. Sonoluminescence [текст] / R D Finch // Ultrasonics – v.1. – p.87-98

75. Neppiras, E.A. Acoustic cavitation [текст] / E.A. Neppiras // Phys. Rep. – 1980. – 61. – p. 160-251.
76. Apfel, R.E. Acoustic cavitation prediction [текст] / R.E. Apfel // J. Acoust. Soc. Am. – 1981. – 69. – p. 1624-1633.
77. Маргулис, М.А. Кинетические уравнения электронно-диффузионной модели распределения радикалов в многопузырьковом кавитационном поле [текст] / М.А. Маргулис // ЖФХ. – 2008. – 82, №8. – с. 1581-1585.
78. Yachmenev, V.G. Intensification of the bio-processing of cotton textiles by combined enzyme/ultrasound treatment [текст] / V.G. Yachmenev, N.R. Bertonire, E.J. Blanchard // J. of Chem. tech. and Biotech. – 2002. – 77. – p.559-567
79. Swamy, K.M. Intensification of leaching process by dual-frequency ultrasound [текст] / K.M. Swamy, K.L. Narayana // Ultrasonics sonochemistry. – 2001. – 8. – p.341-346
80. Ganapati, D.Y. Synergism of ultrasound and solid acids in intensification of Friedel-Crafts acylation of 2-methoxynaphthalene with acetic anhydride [текст] / D.Y. Ganapati, M S M Mujeebur Rahuman // Ultrasonics sonochemistry. – 2003. – 10. – p.118-121
81. Sulman, M.G. The extraction process from the vegetable raw material in the ultrasonic field [текст] / M.G. Sulman, D.N.Pirog, T.V. Ankudinova, E.M. Sulman, N.V. Semagina // 1st European Congress on Chemical Engineering: Florence, Italy. – 1997. – Vol. 4. – p.3017-3018
82. Abramov, O.V. Ultrasonic intensification of ozone and electrochemical destruction of 1,3-dinitrobenzene and 2,4-dinitrotoluene [текст] / V.O. Abramov, O.V. Abramov, A.E. Gekhman, V.M. Kuznetsov, G.J. Price // Ultrasonics Sonochemistry. – 2006 – 4. – p.303-307
83. Sister , V.G. Ultrasonic intensification of reagent flotation for oil-bearing effluent [текст] / V.G. Sister, E.V. Karpova, O.V. Abramov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2005. – 41. – p.499-501

84. Shilling, H. Ultrasonic washing method for cotton fiber [текст] / H. Shilling, I. Rudnick, C. Allen, P. Mack, I. Sherril // Journ. Acoust. Soc. Amer. – 1949. – 21. – p.39.
85. Келлер, О.К. Ультразвуковая очистка [текст] / О.К. Келлер, Г.С. Кратыш, Г.Д. Лубяницкий. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.
86. Warmoeskerken, M. Laundryprocessintensificationbyultrasound [текст] / M. Warmoeskerken, P. VanderVlist, V.S. Moholkar, V.A. Nierstrasz // ColloidsandSurfaces. – 2002. – 210(23). – p.277-285.
87. Гарлинская, Е.И. Мойка шерсти с применением ультразвуковой энергии [текст] / Е.И. Гарлинская, Н.Н. Долгополов, А.В. Матецкий // Текстильная промышленность. – 1952. – №4. – с.10.
88. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов [текст] / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
89. Аджиашвили, Н.М. Интенсификация очистки шерстяного волокна [текст] / Н.М. Аджиашвили // Текстильная промышленность. – 1985. – №5. – с.23-24.
90. Кошелева, М.К. Исследование процесса промывки хлопчатобумажных тканей при разных скоростях фильтрации промывного раствора [текст] / М.К. Кошелева, А.А. Булекова, К.В. Евсеева, А.А. Паршин // Успехи в химии и химической технологии. – 2006, т.20. – №10. – с. 67-69.
91. Кошелева, М.К. Исследование и расчет диффузионных процессов в тонких волокнистых материалах и волокнообразующих полимерах [текст] / М.К. Кошелева, А.А. Булекова, П.П. Кереметин, Д.А. Наумов // Химические волокна. – 2007. – №3. – с. 7-8.
92. Булекова, А.А. Повышение эффективности и расчет процесса промывки хлопчатобумажных тканей при использовании ультразвука [текст]: автореферат диссертации ... кандидата технических наук: 05.17.08 / Булекова Анна Александровна. – Москва, 2007. – 16 с.

93. Сафонов В.В. Влияние ультразвука на процессы беления хлопчатобумажных тканей [текст] / В.В. Сафонов // Текстильная пром. – 1984. – № 1. – с.60-61
94. Kamel, M.M. Ultrasonic assisted dyeing. III. Dyeing of wool with lac as a natural dye [текст] / М.М. Kamel, М. El-Shishtawy Reda, В.М. Yussef, Н. Mashaly // Dyes and Pigm. - 2005. – 65, № 2. – p. 103-110.
95. Vajnhandl, S. Ultrasound in textile dyeing and the decolouration / mineralization of textile dyes [текст] / S. Vajnhandl, A. Majcen // Dyes and Pigments – 2005 №2 – p. 39-44.
96. Патент 2383674 Российская Федерация, МПК D 06P 5/20. Устройство непрерывного крашения полимерных материалов с использованием волн различной физической природы [текст] / С.А. Бахарев; заявитель и правообладатель Бахарев Сергей Александрович. – №2008104195/04; заявлено 02.08.2008; опубликовано 20.08.2009, бюллетень №7.
97. Thakore, K.A. Physico-chemical study on applying ultrasonic in textile dyeing [текст] / К.А. Thakore // American dyestuff reporter. – 1990. – vol.79 №5. – P.45-47.
98. Шибашов А.В. Интенсификация процессов пероксидного беления целлюлозосодержащих тканей ультразвуковыми полями. Дисс.кнд.техн.наук. Иваново.2010.Волков, С.С. Сварка пластмасс ультразвуком.[текст] / С.С. Волков, Б.Я. Черняк – М.: Химия, 1986. – 254 с.
99. Клеткин, И.Д. Ультразвуковая сварка при изготовлении одежды [текст] / И.Д. Клеткин, Н.В. Крючков, Р.Ф. Морева; под ред В.П. Полухина. – М.: Легкая индустрия, 1979. – 336с.
100. Волков, С.С. Сварка пластмасс ультразвуком. [текст] / С.С. Волков, Б.Я. Черняк – М.: Химия, 1986. – 254 с.



101. O'Driscoll, K.P. Continuous polymerization setup for the production of homopolymers and block copolymers [текст] / K.P. O'Driscoll, A.U. Sridharan // J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed. – 1973. – 11. – p.1111.
102. Прохоренко, П. П. Ультразвуковой капиллярный эффект [текст] / П. П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г. Е. Коновалов; под ред. В. В. Клубовича. – Минск.: Наука и техника, 1981. – 135 с.
103. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений [текст] / Н.К. Барамбойм. – М.: Химия, 1978. – 383с.
104. Пат. РФ 1780852. Устройство для пропитки волокнистых армирующих материалов.
105. Пат. РФ 2224649. Устройство ультразвуковой пропитки.
106. Пат. РФ 2538873. Устройство для ультразвуковой пропитки волокнистых материалов.
107. Ершов С.В. Динамическое нагружение валковой пары для интенсификации процесса отжима: диссертация кандидата технических наук: 05.02.13. - Кострома, 2013. - 130 с.: ил.
108. Перспективы применения и ограничения методов молекулярной динамики для описания межфазной границы в дисперсных системах - объектах текстильных технологий. Блинов О.В., Годлевский В.А., Калинин Е.Н., Стулов С.А. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 2 (362). С. 202-206.
109. Разработка методов анализа сложных реологических объектов. П.В. Королев, Е.Е. Корочкина, Е.Н. Калинин. LAP LAMBERT Academic Publishing. ISBN-978-3-659-80579-0. Saarbruecken, Deutschland, 2015. 61 s.
110. Суворов И.А., Ершов С.В., Анализ параметров поверхности текстильного волоконно-композитного слоя с использованием цифровых систем обработки изображения // Молодые ученые - развитию

- Национальной технологической инициативы (ПОИСК). Иваново: ИВГПУ, 2021. № 1. С. 131-132.
111. Моделирование тепломассопереноса при центробежном выпаривании раствора. И.П. Горнаков, С.О. Кожевников, Е.Н. Калинин. LAP LAMBERT Academic Publishing. ISBN-978-3-330-04326-0. Saarbruecken, Deutschland, 2017. 64 s.
112. Разработка системы компьютерного зрения для измерения направленности волокон в плетёных структурах. С.В. Ершов, В.Реймер, Е.Н. Калинин, Т.Грис. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2019, №5 (383), С. 128 – 133.
113. Устройство для контроля плотности ткани по утку. Пат. № 2552026 Российская Федерация, МПК D03J. О.В. Блинов, Е.Н. Калинин. Заявитель и патентообладатель Ивановский государственный политехнический университет; № 2013135336/05; заявл. 26.07.2014; опубл. 10.06.2015, Бюл. №16.
114. Программа реализации численных методов решения дифференциального уравнения теплопроводности для одномерного и двумерного случаев П.В. Королёв, Е.Н. Калинин. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614565; заявка № 2016611894 09.03.2016, дата регистрации 26.04.2016.
115. Пат. № 1788420 Российская Федерация, МПК D06B 5/08, D06B 3/20. Устройство для промывки движущегося текстильного материала / Е.Н. Калинин, В.Б. Кузнецов, Г.А. Колесов [и др.]; (РФ). -Заявитель и патентообладатель ООО «ПРОТЕКС» (РФ), № 2017119111/12; заявл. 31.05.2017.
116. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619711. Программа для расчёта массообменного процесса при промывке расправленного текстильного полотна: заявка № 2017616458

- от 04.07.2017 РФ /Е.Н. Калинин; Г.А. Колесов [и др.] (РФ). – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01.09.2017.
117. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616303. Программа для идентификации и верификации численной модели процесса вихревого тонкослойного течения жидкости по вращающейся конической поверхности: заявка № 2017613193 от 10.04.2017 РФ /Е.Н. Калинин; Г. А. Колесов [и др.] (РФ). – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.06.2017.
118. ОКР. «Организация серийного производства и отделки трикотажного полотна из полиэтилентерефталата» «Разработка мероприятий и технического обеспечения интенсификации процесса промывки трикотажного полотна из полиэтилентерефталата при его серийном производстве». Калинин Е.Н., Кузнецов В.Б., Блинов О.В., Ершов С.В. (НОЦ ЦК ТЛП ИЦ ТЛП ИВГПУ); Петров И.Р., Колесов Г.А. (ООО «ПРОТЕКС», г. Иваново) 2019.
119. Определение угла армирования плетеных преформ методом анализа изображений. Ершов С.В., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н., Никифорова Е.Н. Вестник Череповецкого Государственного университета. 2017. № 4 (79). С. 14 – 20.
120. Cell modeling of mass transfer in a dewatering process of fiber by distributed pressure. E. Kalinin, s. Ershov Techical Transactions 5/2017 Mechanics year. 2017 (114), Cracow University of technoiogy, (Chemical Abstracts) P.123-128.
121. Regeneration and utilisation rotary systems of waste technological liquids E.Kalinin, S. Ershov, S.Kozhevnikov. Techical transactions mechanics. ISSUE 2-m (3) year 2016 (113), Cracow University of technology, (Chemical Abstracts). P.123-128.
122. Ранжирование показателей качества геосинтетических материалов с применением теории нечётких множеств. Лысова М.А., Грузинцева

- Н.А., Кусенкова А.А., Гусев Б.Н., Калинин Е.Н. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2019, №3 (381), С. 51 – 54.
123. Chen X. Modelling and predicting textile behavior – 2010. С. 25 – 29.
124. Vassiliadis S. Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art // Advances in Modern Woven Fabrics Technology – 2011. С. 41 – 61.
125. Кожевников С.О., Кузнецов В.Б., Малов М.С. Анализ технических возможностей SolidWorks при моделировании движения жидкости в устройствах для механоактивации коллоидных систем. Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов 5-й Междунар. молодеж. науч.-практ.конф. в 2-х томах, Т.1., Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 335-341.
126. Калинин Е.Н., Суворов И.А., Адекватность геометрической модели тканой структуры армирующего слоя композита в функции конструктивных параметров текстильного волоконно-композитного слоя // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). Иваново: ИВГПУ, 2021. № 1. С. 132-133.
127. Ершов С.В., Калинин Е.Н., Тидт Т., Определение направленности волокон в углеродных нетканых структурах средствами преобразования Фурье // Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – Иваново: ИВГПУ, 2014. - №6. – С. 105 - 110.
128. Ершов С.В. Разработка программного комплекса для анализа направленности волокон в углеродных нетканых структурах / С.В. Ершов, Е.Н. Калинин // Вестник Череповецкого государственного университета. – Череповец: ЧГУ, 2015. - №1. – С. 12 - 17.
129. И.А. Суворов, Синтез 3D-модели тканой армирующей структуры текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования / С.В. Ершов, В.Б. Кузнецов, Е.Н.

- Никифорова, И.А. Суворов, Е.Н. Калинин //Известия вузов. Технология текстильной промышленности. Иваново: ИВГПУ, 2021. – №1 С. 114-119.
130. Ершов С.В., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н., Суворов И.А., Разработка программного модуля для геометрической оптимизации тканых структур в Matlab// Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). Иваново. ИВГПУ. – 2020. № 1. С. 105-108.
131. Е.А. Рогачев. Разработка методов моделирования и исследования структуры и упругих свойств полимерных композиционных материалов с использованием принципов клеточных автоматов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.09. - Омск, 2011. - 178 с.: ил.
132. Ю.Б.Колесов. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. СПб. СПбГПУ, 2004. 240 с.
133. Ф.А.Новиков. Моделирование на UML. Теория и практика. СПб. Проф. лит-ра. Наука и Техника. 2010. 156 с.
134. И.Р.Петрова. Методология объектно-ориентированного моделирования. Язык UML. Казань. 2018. 70 с.
135. Ершов С.В., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н., Суворов И.А., Разработка специализированного программного средства для построения базы управляющих параметров геометрической модели тканой структуры // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). Иваново: ИВГПУ, 2020. № 1. С. 650-652.
136. В.П.Иванов, А.С.Батраков. Трехмерная компьютерная графика. Под. ред. Г.М.Полещука. М., Радио и связь. 1995. 224 с.
137. Э.Энджел. Интерактивная компьютерная графика. Вводный курс. На базе OpenGL. 2 изд. М. Вильямс. 2001. 592 с.

138. Н.А.Малахов, Ю.Н.Жигулев. Структурно-параметрическое моделирование динамических объектов и систем управления в реальном времени. Современные наукоемкие технологии. №12-1. 2018. С.108-114.
139. В.В.Бенецкая, В.Ю.Селиверстов, А.М.Киселев, П.Н.Рудовский, М.В.Киселев. Моделирование структуры тканей. Изв.ВУЗов ТТП. №3 (345). 2013. С.23-28.
140. С.В.Ломов. А.В.Гусаков. Метод кодирования многослойных тканей. Изв.ВУЗов ТТП. № 3 (213). 1993, с. 40-45.
141. Ершов С.В., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н., Суворов И.А., Никифорова Е.Н., Козлова Н.Б., Численная параметризация структурной 3-D геометрии армирующей компоненты композита на волокнистой капиллярно-пористой основе (научная статья). Пластические массы // №9-10, 2023 С.12-14
142. С.В.Ломов. Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования: диссертация ... доктора технических наук: 05.19.01. - Санкт-Петербург, 1995. - 486 с.: ил.
143. Ершов С.В., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н., Суворов И.А., Никифорова Е.Н., Козлова Н.Б., Многофункциональный анализ параметров тканой армирующей структуры по функциональным свойствам элементарной периодической ячейки композитного материала. Пластические массы // №9-10, 2022 С.31-34
144. Р.Геллер. Метод конечных элементов. Основы. М. Мир. 1984.
145. О.Зенкевич. Метод конечных элементов. М.МИР. 1975.
146. Л.Сегерленд. Применение метода конечных элементов. М.Мир. 1979.
147. О.Зенкевич, К.Морган. Конечные элементы и аппроксимация. М.Мир. 1986.
148. Ю.С.Шустов. Разработка методов прогнозирования строения и свойств текстильных материалов с использованием теории подобия и

- анализа размерностей: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.19.01 Москва, 2003 281 с.: ил.
149. Д.В.Голубков. Моделирование механических свойств нити и тканых материалов на основе методов численного анализа: диссертация ... кандидата технических наук: 05.19.01. - Кострома, 2009. - 249 с.: ил.
150. Т.А.Самойлова, П.А.Севостьянов, С.С.Юхин. Конечномерная динамическая модель формирования элемента ткани. Изв. ВУЗов ТТП. № 3 (393). 2021, с.91-95.
151. П.А.Севостьянов. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов. М. Тисо Принт. 2013.
152. 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.А. Суворов, Е.Н. Калинин //Вестник Череповецкого государственного университета. Череповец: ЧГУ, 2020. № 6 С. 36-44.
153. П.А.Севостьянов, Т.А.Самойлова, М.Л.Тихомирова. Компьютерная конечно-элементная модель взаимодействия утка с основными нитями в процессе прибоа на ткацком станке. Материалы и технологии. № 1 (3). 2019, с.54-58.
154. П.А.Севостьянов, Т.А.Самойлова, В.В.Монахов. Моделирование удлинения основной нити в ткани. Изв.ВУЗов ТТП. №2 (380), 2019, с. 199-202.
155. Ершов С.В., Кузнецов В.Б., Суворов И.А., Разработка параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композиционного материала // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). Иваново: ИВГПУ, 2019. – № 1-1. С. 310-312.
156. П.А.Севостьянов, Т.А.Самойлова, В.В.Монахов. Простая конечноэлементная модель удлинения образца тканого полотна.

- Технология и материалы. Витебский ГТУ. Витебск. Респ. Беларусь. №1, 2018, с.33-36.
157. П.А.Севостьянов, Т.А.Самойлова, М.Л.Тихомирова. Компьютерное моделирование сил трения между волокнами и нитями в волокнистых материалах с учетом их статистических особенностей. Изв. ВУЗов ТТП. №5 (383). 2019, с.209-212.
158. Ершов С.В., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н., 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). ИВГПУ. – 2022. – № 1. С. 321-324.
159. Н.В.Переборова, А.Т.Макаров, Е.А.Буряк, А.Л.Макаров, М.И.Александров. Математическое моделирование и системный анализ процессов релаксации текстильных эластомеров хирургического назначения для качественной оценки их функциональных и эксплуатационных свойств. Изв.ВУЗов ТТП, №1 (391), 2021, с.157-161.
160. Н.В. Переборова, А.Т. Макаров, В.К. Васильева, А.М. Иванкин, И.М. Егоров. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов. Химические волокна. №6, 2018, с.3-6.
161. А.Б.Балашов. Методология расчета свойств композиционных материалов на основе структу с использованием воксельного подхода. Изв.ВУЗов ТТП. №4 (394), 2021, с.195-203.
162. А.П. Гречухин, А. Хабибуллоев, П.Н. Рудовский, М.Д. Рудовский. Технология формирования 3D-ортогональных тканей для композитов в составе бронезилета. Изв.ВУЗов ТТП. №6 (396), 2021, с.77-83.



163. А.И.Бизюк, Н.Н.Ясинская. Компьютерные 3D-модели тканых армирующих материалов для композитов. Изв.ВУЗов ТТП. № 6 (396), 2021, с.231-237.
164. И.А. Суворов, Разработка автоматизированной системы для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя с использованием систем обработки изображений. Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]. 2022. №3(53). С.101-108.
165. М.В.Киселев, М.А.Померанцев, В.В.Куликовский. Геометрическая модель структуры фильтрующих пористых элементов. Изв ВУЗов ТТП. №2 (374), 2018, с.210-213.
166. А.М.Киселев Моделирование структур и деформационных свойств волокнистых холстов. Дисс. канд. техн.наук. Кострома КГТУ, 2012.
167. А.М.Киселев, М.В.Киселев. Проектирование и прогнозирование физико-механических свойств композиционных материалов на основе текстильных 3D – преформ. Изв.ВУЗов ТТП, №1 (367), 2017, с.325-329.
168. П.Н.Колесников, А.Н.Иванов. Трехмерные модели текстильных материалов полотняного переплетения. Изв.ВУЗов ТТП. №5 (359), 2015, с.40-43.
169. Суворов, И.А. Компьютерное моделирование как инструмент в создании композитных материалов / С.В. Ершов, В.Б. Кузнецов, И.А. Суворов. // В сборнике: Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности (ИНТЕКС-2018). Сборник материалов Международной научной студенческой конференции. Москва. РГУ им. А.Н. Косыгина. – 2018. – С. 17-19.
170. А.П.Гречухин. Математическая модель строения ткани из углеродных нитей. Изв.ВУЗов ТТП. №5 (359). 2015, с.94-100.

171. А.П.Гочухин, В.Ю.Селиверстов. Трёхмерная модель формы нити в однослойной ткани полотняного переплетения. Изв.ВУЗов ТТП. №5 (334), 2011, с.62-65.
172. Stolyarov O. Influence of Process Parameters on Filament Distribution and Blending Quality in Commingled Yarns Used for Thermoplastic Composites / O. Stolyarov, P. Kravaev, G. Seide, T. Gries // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2014. - №27 (3). – P. 350-363.
173. Stolyarov O. A method for investigating blending quality of commingled yarns / O. Stolyarov, P. Kravaev, G. Seide, T. Gries // Textile Research Journal. – 2013. - №83 (2). – P. 122-129.
174. Gonzalez, R.C. Digital Image Processing Using MATLAB / R.C. Gonzalez, R.E. Woods, S.L. Eddins. - Dorsing Kindersley, 2004. - 620 p.
175. Королёв, П.В. Визуализация процесса взаимодействия компонентов нанокompозита методами молекулярного моделирования/ П.В.Королёв, Е.Н.Калинин, М.А.Шилов //Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2014, №2. С. 148-151.
176. 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.А. Суворов, Е.Н. Калинин //Вестник Череповецкого государственного университета. Череповец: ЧГУ, 2021. –№1 С. 9-19.
177. Суворов, И.А. Анализ плотности распределения волокон в нетканых плоских структурах по изображениям их поверхности / С.В. Ершов, И.А. Суворов, Е.Н. Калинин //Известия вузов. Технология текстильной промышленности. Иваново: ИВГПУ, 2018. – № 2 С. 194-200.
178. Das D., Pourdeyhimi B. Composite Nonwoven Materials: Structure, Properties and Applications / Woodhead Publishing. – 2014, 252 p.
179. Суворов, И.А. Получение бинарных изображений плоских нетканых структур для систем автоматического контроля их качества / С.В.

- Ершов, И.А. Суворов. // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). Иваново. ИВГПУ. – 2018. – № 1-2. С. 19-23.
180. Gonzales R.C., Richard R.E. Digital Image Processing / Pearson Education. – 2012, 1104 p.
181. Drobina R., Machnio M.S. Application of The Image Analysis Technique for Textile Identification // Autex Research Journal. – 2006, Vol. 6(№1), pp. 40 – 48.
182. Суворов, И.А. Моделирование скорости потока жидкости сквозь элементарную ячейку полимерной структуры / Е.Н. Калинин, И.А. Суворов. // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). Иваново: ИВГПУ, 2022. № 1. С. 1100- 1101.
183. Суворов, И.А. Исследование скорости потока жидкости в модели элементарной ячейки / В.Б. Кузнецов, И.А. Суворов. // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). Иваново: ИВГПУ, 2022. № 1. С. 1102- 1104.
184. Грузинцева Н.А, Грушина Ю.С., Павлов С.В., Гусев Б.Н. Совершенствование методики компьютерного исследования поверхности теплоизоляционных строительных материалов // Приволжский научный журнал. – 2017, №2 (42), С. 98 – 105.
185. Суворов И.А., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н., Манин Б.Е. Грис Т., Разработка программного комплекса для трехмерного моделирования волокнистых армирующих структур и расчета их оптимальной геометрии по заданным структурным параметрам тканого полотна и нитей // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). Иваново. ИВГПУ. – 2021. № 1. С. 325-328.
186. Суворов И.А., Ершов С.В., определение поверхностной плотности нетканых плоских структур методом анализа изображений // Физика

- волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). Иваново. ИВГПУ. – 2018. № 1. С. 19-23.
187. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Разработка программного комплекса для анализа направленности волокон в углеродных нетканых структурах // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015, №1, С. 12 - 17.
188. Ершов С.В., Калинин Е.Н., Тидт Т. Анализ направленности углеродных волокон в реальных нетканых структурах технического назначения // Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, №6, С. 189 – 193.
189. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Влияние пиксельной характеристики цифровых изображений нетканых структур на точность результатов их компьютерного анализа // Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, №6, С. 243 – 247.
190. Мизонов В.Е. Моделирование, расчет и оптимизация тепломассообменных процессов в текстильной промышленности: монография/ В.Е. Мизонов [и др.]; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.; Иван. гос. энергетич. ун-т. – Иваново, 2010. – 204с. ISBN 978-5-9616-0350-7.
191. Новиков Н.Е. Прессование бумажного полотна /Н.Е. Новиков; М.: Лесная промышленность, 1972. – 240 с.
192. Ершов С.В. Синтез ячеечной модели массообмена в процессе обезвоживания волокнистого материала распределенным давлением / С.В. Ершов, Е.Н. Калинин // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. -2011.- №6.- с. 118 - 121.
193. Пат. №2435992 Российская федерация, МПК F15B 21/12, B06B 1/18. Устройство для создания импульсного режима нагружения исполнительных органов технологических машин / С.В. Ершов, Е.Н. Калинин [и др.]: заявитель и патентообладатель Ивановская

- государственная текстильная академия - №2010115551/06; заявл. 19.04.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. №34.
194. Мизонов В.Е. Моделирование, расчет и оптимизация теплообменных процессов в текстильной промышленности: монография. Иваново, 2010. – 204 с. ISBN 978-5-9616-0350-7.
195. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Синтез ячеечной модели массообмена в процессе обезвоживания волокнистого материала распределенным давлением. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. - 2011.- №6.- с. 118 - 121.
196. Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур – режим доступа <https://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf/>
197. Schiavi A., Shtrepi L., Corona D. Effective scale of microstructure of fibrous permeable materials. ICSV25, Hiroshima, 8-12 July 2018.
198. S. Ershov, E. Kalinin, V. Kuznetsov, S.A. Koksharov and A. Baranov. Numerical Model of the Mass Transfer Transition States in the Vacuum Infusion Process of the Polymer Matrix and the Reinforcing Filler Structure. XVI international scientific and practical conference «new polymeric composite materials, Микитаевские чтения, НПКМ-2020, РФ, Нальчик.2020.
199. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Метод ячеечного моделирования как инструмент численного анализа массообмена при отжиге текстильного материала в валковой паре. Современные тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2012. С. 14 – 18.
200. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Использование механических колебаний как фактора интенсификации массообменных процессов в технологии обработки капиллярно-пористых структур. Динамика машин и рабочих процессов: сборник материалов Всероссийской научно-технической

- конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. С. 96 – 98.
201. Olyak M.R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. Vol. 102. Pp. 185–191.
202. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов теплообмена. — М.: Высшая школа, 2018. — 328 с.
203. Cell modeling of mass transfer in a dewatering process of fiber by distributed pressure. S. Ershov, E. Kalinin. Technical Transactions 5/2017 Mechanics year. 2017 (114), Cracow University of technology, (Chemical Abstracts) P.123-128.
204. Пат. №2435992 Российская федерация, МПК F15B 21/12, B06B 1/18. Устройство для создания импульсного режима нагружения исполнительных органов технологических машин. 19.04.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. №34.
205. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618393. Программный комплекс для определения параметров процесса массообмена в системе «волоknистый материал – валковое устройство»: заявка № 2012616323 от 24.07.2012 РФ / С.В. Ершов, Е.Н. Калинин, Е.С. Константинов (РФ). – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17.09.2012.
206. Артемов М.А. Математическое моделирование и компьютерный эксперимент / М.А. Артемов, Е.Н. Коржов. – Воронеж: ВГУ, 2011. – 64 с.
207. Ершов С. В. Компьютерный анализ ячеечной модели процесса механического обезвоживания волоknистого материала в валковой паре / С.В. Ершов, Е.Н. Калинин // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. -2012.- №1.- с. 137 - 140.

208. Дашченко О.Ф. Matlab в инженерных и научных расчётах. Монография. / О.Ф. Дашченко, [и др.]. - Одесса: Астропринт, 2003. - 214 с.
209. Потемкин В.Г. MATLAB 6. Средства проектирования инженерных приложений / В.Г. Потемкин. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 448 с.
210. Гультияев А. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде windows / А. Гультияев. - СПб.: Корона принт, 1999. - 288 с.
211. Потемкин В. Инструментальные средства Matlab 5.x. /В. Потемкин. - М.: Диалог-МИФИ, 2000. -336 с.
212. Мартынов Н.Н. Matlab 5.x Вычисления, визуализация, программирование / Н.Н. Мартынов, А.П. Иванов. - М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2000. -336 с.
213. Кутумова Е.О. Инновационная экономика текстильных предприятий как инструмент снижения энергоёмкости валового регионального продукта / Е.О. Кутумова, Е.В. Кутумова, Н.Ю. Матвиевская // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2012. - №3. – с. 33 – 39.
214. Дьяконов В. Matlab. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. / В. Дьяконов, В. Круглов. - СПб.: Питер, 2002.-448 с.
215. Льюнг Л. Идентификация систем / Л. Льюнг. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1991. – 432 с.
216. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
217. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов / А.М. Дейч. – М.: Энергия, 1979.
218. Пупков К.А. Статистические методы анализа, синтеза и идентификации систем автоматического управления / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, А.И. Трофимов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998.

219. Редько С.Ф. Идентификация механических систем / С.Ф. Редько, В.Ф. Ушкалов, В.П. Яковлев. – Киев: Наук. Думка, 1985. – 216 с.
220. Д.В.Зайцев, А.П.Гречухин. Компьютерное трехмерное моделирование строения ткани полотняного переплетения на различных этапах формирования. Изв.ВУЗов ТТП. №4 (340), 2012, с.85-88.
221. Пат. № 2224649 Российская Федерация, МПК В29В 15/10, С08J 7/18, В05С 3/12. Устройство ультразвуковой пропитки /Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Хмелев М.В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. - №2003104729/15; заявл. 17.02.2003; опубл. 27.02.2004]
222. А.с. № 1780852 СССР, МПК В05В 17/06, В05С 5/02. Устройство для пропитки волокнистых армирующих материалов /Курочкин Е.А., Романов Д.А., Смыслов В.И., Шалыгин В.Н., Орлова В.П., Карасик В.Н., Лебедев А.Б.; заявитель и патентообладатель Ленинградский механический институт им. маршала Советского Союза Устинова Д.Ф. - № 4832017, заявл. 29.05.1990; опубл. 15.12.1992 г.],
223. Пат. № 2538873 Российская Федерация, МПК В05С 3/12. Устройство для ультразвуковой пропитки волокнистых материалов / Красновский А.Н., Казаков И.А., Шурко А.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН». - № 2013140043; заявл. 29.08.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. №1
224. Центр ультразвукового оборудования: [Электронный ресурс]. М., 2006. URL: <https://www.psb-gals.ru/useful-information/physics.html>. (Дата обращения: 21.12.2021).
225. Ершов С. В., Влияние динамического воздействия на кинетику процесса пропитки в синтезе полимерного композитного материала / С.В. Ершов, Е.Н. Калинин, В.Б. Кузнецов, И.А. Суворов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. -2021.- №6.- с. 196 - 204.



226. Злобина И.В., Исследование влияния ультразвуковой пропитки на физико-механические характеристики армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // Вестник СГТУ. Metallurgy and materials science. – 2020. - № 2 с.72-78
227. Негров Д. А. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на структуру и механические свойства полимерного композиционного материала / Д. А. Негров Е. Н. Ерёмин // Омский научный вестник Машиностроение и машиноведение. – 2011. - №2 (100) с. 17-20.
228. 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 / В. Б. Кузнецов, И. А. Суворов, Е. Н. Калинин, С. В. Ершов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет».
229. 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 / И. А. Суворов, Е. Н. Калинин, О. В. Блинов, В. Б. Кузнецов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет».
230. 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 / И. А. Суворов, Е. Н. Калинин, В.

Б. Кузнецов, С. В. Ершов; заявитель ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "М СТРУКТУРС".

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

**Входные значения физико-механических параметров численного анализа процесса синтеза композитной системы, на основе армирующей полимерной капиллярно-пористой структуры и упруго-вязкой матрицы в зависимости от технологии получения композитного материала**

**1. Перепад давления на единичной длине диффузии (Па или н/м<sup>2</sup>)**

1. При получении композитного материала:
  1. Методом литья под давлением – давление впрыска ~160 МПа.
  2. Методом экструзии – 50 – 70 МПа.
  3. Методом контактной формовки (вручную) – 0,01 – 0,2 МПа.
  4. Методом контактно формовки (пултрузия – пропитка в ванне) – 0,3 – 0,5 МПа.
  5. Методом прессования – давление впрыска 40 – 50 МПа.
2. При получении композитного материала методом вакуумной инфузии:
  - разрежение – 0,071 – 0,101 МПа (0,7 – 1,0 Атм).

**2. Длина (толщина) волокнистого слоя – путь инфузии (L, м)**

1. Хлопчатобумажные ткани	0,16 – 0,6 мм
2. Льняные ткани	0,3 – 0,4 мм; до 1,3 мм
3. Углеродные ткани	0,2 – 0,6 мм
4. Стекловолоконные ткани	0,105 – 0.225 мм

**3. Коэффициент динамической вязкости связующего (матрицы) и его плотность (Па×с; кг/м<sup>3</sup>)**

1. Вязкость и плотность коллоидных композиций поливинилового спирта различных марок при 12%-ной концентрации матрицы

1.1. ПВС марки 10/2	15 Пз
1.2. ПВС марки 16/1	40 Пз
1.3. ПВС марки 18-11	32 Пз
1.4. ПВС марки 27/1	60 Пз

Плотность ПВС – 1,19 г/см<sup>3</sup>.

#### **4. Средний диаметр волокон (R, мкм)**

1. Хлопчатобумажные ткани 15 – 25 мкм (от 2 до 60 мкм)
2. Льняные ткани 12 – 20 мкм (от 20 до 30 мкм)
3. Углеродные ткани 5 – 10 мкм
4. Стекловолоконные ткани 5 – 24 мкм

#### **5. Динамическая (эффективная) пористость текстильного материала – критический диаметр молекул (R, мкм)**

1. Хлопчатобумажные ткани	2 – 220 мкм
2. Льняные ткани	40 – 280 мкм
3. Стекловолоконные ткани	5 – 45 мкм
4. Углеродные ткани:	
- полотняного переплетения	5 – 250 мкм
- между волокнами в нитях	0,5 – 6 нм

#### Методика определения капиллярности ткани

Капиллярность АС определена согласно ГОСТ 3816-81. Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств [111].

### Методы математической обработки данных

При определении доверительных границ точности измерений использовали метод математической теории ошибок. Для всех исследуемых показателей было проведено вычисление характеристик результатов испытаний:

- среднего арифметического значения  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$

- средней квадратичной ошибки  $S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}}$

- коэффициента вариации  $C_B = \frac{S_n}{\bar{X}} \cdot 100\%$

Достоверность результатов испытаний оценивали расчетом доверительного интервала:  $\Delta X = \frac{t \cdot S_n}{\sqrt{n}}$ , где  $t$  – критерий Стьюдента, связывающий эту величину с числом степеней свободы и выбранной величиной уровня значимости.

Математическое планирование и идентификацию, и верификацию результатов модельного эксперимента экспериментальных данных осуществляли средствами [198].

**Объекты интеллектуальной собственности**

Пат. 2774244, 15.12.2020. Устройство для ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов // Патент России № 2774244. 2020. Бюл. № 17/ В.Б. Кузнецов, И.А. Суворов, Е.Н. Калинин, С.В. Ершов.



Свидетельство. 2022661735, 11.06.2022. Программа для геометрической

оптимизации деталей из полимерных композиционных материалов //  
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №  
2022660886. 2022./ В.Б. Кузнецов, И.А. Суворов, Е.Н. Калинин, С.В. Ершов.

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2022661735**

**Программа для геометрической оптимизации деталей из  
полимерных композиционных материалов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный химико-технологический  
университет» (RU)*

Авторы: *Суворов Иван Александрович (RU), Калинин  
Евгений Николаевич (RU), Блинов Олег Владимирович  
(RU), Кузнецов Виктор Борисович (RU)*

Заявка № **2022660886**  
Дата поступления **11 июня 2022 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **24 июня 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 68b80077e14e49f0a94e6bd24145d5c7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*

Свидетельство. 2023610194, 08.23.2023. Система для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя и определения её неравномерности в нетканых плоских структурах. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612811. 3/ В.Б. Кузнецов, И.А. Суворов, Е.Н. Калинин, С.В. Ершов.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023612811

**Система для анализа качества текстильной поверхности  
волоконно-композитного слоя и определения её  
неравномерности в нетканых плоских структурах.**

Правообладатель: **ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "М СТРУКТУРС" (RU)**

Авторы: **Суворов Иван Александрович (RU), Калинин  
Евгений Николаевич (RU), Кузнецов Виктор Борисович  
(RU), Ершов Сергей Владимирович (RU)**



Заявка № 2023610194

Дата поступления 10 января 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 февраля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 6B8B0077E34C4890B4C0B124145d5c7  
Идентификатор: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 2013-02-22 г. до 26.05.2023

Ю.С. Зубов



Свидетельство. 2023617265, 07.04.2023. Программа для анализа кинетики вакуумной инфузии в капиллярно-пористой волокнистой структуре при статическом и динамическом воздействии. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615798. 2023./ В.Б. Кузнецов, И.А. Суворов, Е.Н. Калинин, С.В. Ершов.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023617265

**Программа для анализа кинетики вакуумной инфузии в капиллярно-пористой волокнистой структуре при статическом и динамическом воздействии**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет» (RU)*

Авторы: *Суворов Иван Александрович (RU), Калинин Евгений Николаевич (RU), Кузнецов Виктор Борисович (RU), Блинов Олег Владимирович (RU), Ершов Сергей Владимирович (RU)*

Заявка № **2023615798**

Дата поступления **29 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **07 апреля 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 68b80077e14e4f03a94e0bd24145d5c7  
Инициалы: **Зубов Юрия Сергеевич**  
Действителен с 20.03.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*





АКТ


об апробации результатов кандидатской диссертационной работы  
Суворова Ивана Александровича

Мы, нижеподписавшиеся, директор А.Е. Паутов и главный инженер А.Р. Данилов фирмы «Интех ЛВ» с одной стороны и авторы разработки «Устройство для ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов» (Патент на изобретение РФ № 2 774 244 МПК В05С 3/12, опубл. 15.06.2022, бюл. № 17) и «программы для ЭВМ «Программа для геометрической оптимизации деталей из полимерных композиционных материалов», (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022661735, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.06.2022), Блинов О.А., Суворов И.А., Калинин Е.Н., Кузнецов В.Б., с другой стороны, составили настоящий акт об апробации результатов исследований в обозначенном научно-производственном направлении.




В ходе рассмотрения результатов исследования установлено, что техническим результатом изобретения является повышение эффективности процесса пропитки многослойных волокнистых материалов и равномерности распределения связующего в структуре волокнистого наполнителя за счет попеременного воздействия ультразвуковых колебаний и уменьшения их амплитуды.

Использование разработанного диссертантом программного комплекса позволяет решить задачи оптимизации конструктивных и технологических параметров оборудования для формирования структуры композитного материала на волокнистой основе с заданными физико-механическими параметрами.

От ООО «Интех ЛВ»:

 А.Р. Данилов

От авторов разработки:

 И.А. Суворов  
 В.Б. Кузнецов  
 Е.Н. Калинин

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Стоксхим»

Ю.В. Бельцев

«10» апреля 2023 г.

АКТ

об апробации результатов кандидатской диссертационной работы  
Суворова Ивана Александровича

Я, нижеподписавшийся, директор фирмы ООО «Стоксхим» Бельцев Ю.В. с одной стороны и авторы разработки «Устройство для ультразвуковой пропитки многослойных волокнистых материалов» «программы для ЭВМ «Система для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя и определения её неравномерности в нетканых плоских структурах», (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610194, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.23.2023), Блинов О.А., Суворов И.А., Калинин Е.Н., Ершов С.В., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что 10.04.2023 г. проведена апробация результатов исследований в обозначенном научно-производственном направлении.

В ходе проверки результатов исследования установлено, что техническим результатом изобретения является повышение эффективности процесса пропитки многослойных волокнистых материалов и равномерности распределения связующего в структуре волокнистого наполнителя за счет попеременного воздействия ультразвуковых колебаний и уменьшения их амплитуды.

Использование разработанной диссертантом программной системы позволяет решить задачи анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя и определять её неравномерности в нетканых плоских структурах.

От ООО «Стоксхим»:

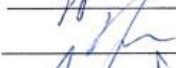
директор

 Ю.В. Бельцев




От авторов разработки:

 И.А. Суворов

 В.Б. Кузнецов

 Е.Н. Калинин

 С.В. Ершов