

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное учреждение науки  
Институт конструкторско-технологической информатики  
Российской академии наук

На правах рукописи

Александров Ислам Александрович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
ПРОИЗВОДСТВА РЕАКТОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВЯЗИ СВОЙСТВ  
ИЗДЕЛИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЕГО  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (машиностроение)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., Шептунов Сергей Александрович

Москва 2020

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА.....	15
1.1. Обоснование необходимости использования композиционных материалов на основе наноразмерных углеродных структур в современном машиностроении ...	15
1.2. Подходы, применяемые для решения задачи обеспечения технологической подготовки производства изделий из композиционных материалов .....	20
1.3. Методы моделирования целевых свойств и идентификации технологических параметров производства композиционных материалов, модифицированных наноразмерными структурами .....	24
1.4. Обоснование актуальности исследований, направленных на разработку автоматизированных систем технологической подготовки производства модифицированных композитных конструкций .....	30
1.5. Методологические подходы, позволяющие обеспечить автоматизацию технологической подготовки производства композитных конструкций .....	34
1.6. Выводы и заключения.....	37
Глава 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	39
2.1. Обоснование нового подхода и предложение концепта, позволяющего реализовать метод обеспечения автоматизации производства .....	39
2.2. Основные задачи, решение которых необходимо для реализации концепции метода обеспечения автоматизации производства .....	48
2.3. Базовые принципы и основные положения реализации концепции метода обеспечения автоматизации производства .....	52
2.4. Взаимосвязь ключевых элементов, определяющих концепцию метода обеспечения автоматизации производства .....	58
Глава 3. РАЗРАБОТКА ОБЩЕСИСТЕМНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И МЕТОДОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ.....	66

3.1. Постановка задачи идентификации теплофизических характеристик модифицированного композиционного материала .....	66
3.2. Математическое моделирование теплофизических характеристик модифицированных композиционных материалов .....	68
3.3. Построение нейросетевой модели идентификации целевых свойств и технологических параметров переработки.....	80
3.4. Метод экспериментальных исследований теплофизических характеристик модифицированных композиционных материалов .....	88
3.5. Технологические средства и методы изготовления экспериментальных образцов модифицированных материалов .....	98
Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АПРОБАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	106
4.1. Формирование базы данных экспериментальных исследований целевых характеристик с вариацией технологических параметров переработки .....	106
4.2. Оценка адекватности математической модели теплопереноса в модифицированном композиционном материале.....	111
4.3. Апробация и анализ нейросетевой модели идентификации целевых свойств.....	118
4.3. Апробация и анализ нейросетевой модели идентификации технологических параметров переработки.....	125
4.4. Оценка и сопоставление результатов нейросетевого моделирования с результатами экспериментальных исследований и математического моделирования.....	137
4.5. Выводы и заключения.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	147
Приложение А. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	158
Приложение Б. АКТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ .....	161

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие промышленности и различных секторов гражданского хозяйства преимущественно определяется техническим прогрессом в машиностроении. Разработку и внедрение в производство новейших конструкций машин, механизмов и приспособлений, соответствующих современному уровню развития науки и техники, возможно обеспечить только при повышении эффективности производства, обеспечиваемой, прежде всего, автоматизацией технологических процессов. Современная мировая стратегия развития машиностроительного производства предлагает создание принципиально новых материалов, существенное повышение уровня автоматизации производственного процесса и управления с целью обеспечения выпуска продукции требуемого качества в заданный срок при минимальных затратах [1]. Освоение принципиально новых технологических процессов в машиностроении обусловлено комплексным продвижением по указанным стратегическим направлениям, так как сами по себе направления не являются самодостаточными.

### **Актуальность темы исследования**

Создание новых материалов для задач машиностроения, на сегодняшний день, неразрывно связано с композиционными материалами (КМ), которые получили широкое применение как в традиционных отраслях, таких как судостроение, авиационная, ракетно-космическая, автомобильная промышленность, так и в строительстве, производстве спортивного инвентаря, энергетике и прочих, благодаря возможности обеспечения сочетания комплексов целевых свойств, умеренной стоимости и технологичности [2, 3, 5, 83]. Под целевыми свойствами в данном случае понимаются конструкционные требования, заложенные на этапе проектирования, определяемые условиями и средой эксплуатации конечного изделия. К ним можно отнести высокую удельную

прочность, работоспособность в большом интервале температур и т.д. Целевые свойства композитной конструкции достигаются правильным выбором исходных компонентов и рациональной технологией производства, обеспечивающей прочную связь между компонентами, при сохранении первоначальных свойств [12], с обеспечением экономической эффективности технологических процессов. Для реактопластичных полимерных композиционных материалов (РПКМ) традиционными являются задачи обеспечения прочности и устойчивости в условиях переменных температур. В последнее время не менее актуальной становится задача обеспечения размеростабильности композитных конструкций. Под размеростабильностью в данном случае понимается способность материала в максимальной степени сохранять свои размеры и форму в условиях воздействия переменных силовых и тепловых нагрузок [57, 58].

### **Степень разработанности темы исследования**

Теоретические и экспериментальные исследования вопроса разработки научных основ, моделей и методов идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления, направленных на обеспечение автоматизации технологических процессов производства, детально разработаны в трудах ученых Ю.М. Соломенцева, С.А. Шептунова, Л.М. Червякова, А.В. Олейника, В.Г. Митрофанова, В.Л. Сосонкина, Г.М. Мартинова, А.В. Васильева, Д.В. Гусарова, Т. Zaborovsky, M. Jenek и др. В обозначенных трудах рассмотрены вопросы повышения качества технологических процессов и, в частности, вопросы, связанные с формированием требуемых показателей качества этих процессов средствами автоматизации.

Основные положения, определяющие теоретическую основу проектирования композитных конструкций и технологических процессов их производства, сформулированы учеными В.В. Васильевым, А.А. Берлиным, Е.Н. Кабловым, Ю.М. Тарнопольским, В.Д. Протасовым, И.М. Булановым, D.I. Chung, М.А. Комковым, Г.Е. Нехороших, А.Г. Братухиным, В.С. Боголюбовым, О.С. Сироткиным, П.В. Просунцовым и др, в работах которых было показано, что

одним из методов достижения высокой размерной стабильности является обеспечение минимизации коэффициента линейного термического расширения (КЛТР). Для этого, при проектировании КМ, его слои укладываются в пакет под разными углами, что снижает значение КЛТР. В данном случае, отдельные слои независимо реагируют на тепловое воздействие, а необходимый синергетический эффект термонеutrальности достигается за счет укладки отдельных слоев. Другим способом обеспечения размеростабильности является уменьшение перепадов температур в конструкции под действием тепловых нагрузок. Снижение перепада температур может быть достигнуто за счет использования материалов с высокой теплопроводностью [57, 58]. При проектировании композитных конструкций возникает проблема несоответствия характеристик, в том числе теплофизических, матрицы (связующего) и волокнистого армирующего наполнителя. Теплофизические характеристики, такие как теплопроводность и температуропроводность, для армирующего наполнителя, как правило, значительно превосходят свойства матрицы [57, 58]. В ином случае, армирование обладает ярко выраженными антиадгезионными свойствами, что не позволяет в полной мере использовать потенциал механических характеристик материала. Введение нанотрубок в полимеры позволяет создавать новые классы композитов конструкционного назначения [59].

Появление наноразмерных дисперсных наполнителей позволило обеспечить повышение механических и теплофизических свойств реактопластичных полимеров, используемых в качестве связующего до значений, сопоставимых со свойствами армирующего наполнителя. На сегодняшний день, динамичное развитие получили работы В.Д. Вермеля, С.А. Титова, Ю. В. Корнева, В.А. Тарасова, Г.В. Малышевой, Н.А. Степанищева, И.П. Суздалева и др., посвященные созданию композиций на основе наполнителей из углеродных наноматериалов, к которым относятся углеродные нанотрубки (УНТ) и углеродные нановолокна (УНВ). Это обусловлено тем, что модифицированные углеродными наноразмерными структурами композиции привлекают к себе внимание благодаря

своим потенциально высоким свойствам, а также широкому спектру областей прикладного применения [21 – 26, 86 – 89].

Определение параметров технологического процесса введения наноразмерных частиц в реактопластичную среду – многопараметрическая задача, содержащая большое количество нелинейных зависимостей, аналитическое описание которых представляет собой сложный наукоемкий процесс, требующий индивидуального подхода к каждой конкретной совокупности технологических итераций, определяющих формирование композитной конструкции. Экономическая эффективность такого подхода является неоправданной, что делает актуальной задачу поиска методов автоматизации технологической подготовки производства (ТПП) при модификации реактопластичных полимеров углеродными наноразмерными структурами. В трудах ученых F. Rosenblatt, А.И. Галушкина, А.Н. Горбань, В.Л. Дунина-Барковского, В.А. Головки, В.В. Борисова, И.С. Кабак, Н.В. Сухановой, S Lawrence, C.L. Giles, CL, A.C. Tsoi, M. Majewski, J. Mořaryn и др. сформулированы теоретические основы и решены задачи практического применения нейросетевого моделирования в прикладных задачах, связанных с вопросами автоматизации машиностроительных производств.

### **Цель и задачи**

**Целью работы** является обеспечение требуемых целевых свойств изделий из РПКМ в условиях неопределенной взаимосвязи целевых свойств с технологическими параметрами изготовления изделий на основе интеллектуальных моделей.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **основные задачи**:

- 1) Анализ путей автоматизации процесса обеспечения требуемых целевых характеристик изделий из РПКМ;
- 2) Обоснование основных целевых характеристик изделий из РПКМ и выявления сущности и характера взаимосвязи между свойствами этих материалов и технологическими режимами их изготовления;

3) Анализ моделей теплопереноса в связующем РПКМ с различным содержанием углеродных наноразмерных модификаторов для расчетного определения теплопроводности, как основной меры размерной стабильности изделий;

4) Разработка и обоснование модели автоматизированной системы обеспечения требуемых свойств РПКМ с позиции достижения целевых свойств изготавливаемого изделия;

5) Формирование базы данных результатов экспериментальных исследований теплофизических характеристик образцов РПКМ, модифицированных углеродными наноразмерными структурами при различных вариациях технологических режимов их изготовления;

6) Разработка архитектуры и принципов построения нейросетевых моделей идентификации теплофизических характеристик РПКМ и технологических параметров переработки реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными структурами;

7) Оценка адекватности решений, полученных на основе предложенных нейросетевых моделей, путем сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы включает:

1) Раскрытие и объяснение сущности проявления взаимосвязи между целевыми характеристиками изделий из РПКМ и режимами их изготовления, обеспечивающими эти характеристики;

2) Формирование структуры и описание модели автоматизированной системы обеспечения требуемых свойств РПКМ с позиции достижения целевых свойств изготавливаемого изделия;

3) Нейросетевые модели, раскрывающие взаимообусловленную связь целевых свойств изделий из РПКМ и технологических режимов их изготовления;

4) Метод автоматизации процесса обеспечения требуемых целевых свойств изделий из РПКМ в условиях неопределенности режимов их изготовления на основе интеллектуальных моделей принятия технологических решений.

Подтверждение научной новизны представленных положений и результатов основано на сопоставлении результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований с целью верификации и апробации разработанных моделей, методов и систем.

Из всей предметной области автоматизации технологических процессов с использованием человеко-машинных систем выделим:

**Объект исследования** – автоматизированный процесс обеспечения требуемых характеристик изделий на этапе подготовки их производства;

**Предмет исследования** – взаимосвязь свойств изделия из РПКМ с технологическими параметрами его изготовления.

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

Теоретическая значимость работы заключается в расширении представлений о возможности применения нейросетевых моделей для автоматизации этапа технологической подготовки производства композитных конструкций в условиях неопределенности режимов их изготовления.

Полученные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований нашли применение при решении задач автоматизации этапа технологической подготовки производства изделий из РПКМ и включают:

1. Методику перехода от целевых свойств изделий из РПКМ к технологическим режимам их изготовления на этапе подготовки производства;

2. Метод построения автоматизированной системы обеспечения требуемых целевых свойств изделий из РПКМ, основанный на рациональном выборе технологических режимов их изготовления на этапе подготовки производства;

3. Формальное представление архитектуры и описание принципов построения нейросетевых моделей идентификации характеристик РПКМ и технологических

режимов переработки реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными структурами;

### **Методология и методы исследования**

Диссертационные исследования выполнены на базе применения основных положений и принципов системного анализа, современной теории управления и автоматизации технологических процессов, математического моделирования процессов и систем, планирования эксперимента, теплопереноса, математической логики, теории вероятностей и математической статистики, методов искусственного интеллекта (метод нейросетевого моделирования).

При выполнении работ реализовано практическое применение методов нейросетевого моделирования при решении задачи оптимизации ТПП модифицированных реактопластичных полимеров. Разработан и апробирован метод создания и обработки базы данных, содержащей информацию о входных и выходных характеристиках процесса модификации реактопластов углеродными наномодификаторами. Проведены необходимые экспериментальные, теоретические и расчетные исследования, выявляющие зависимости технологических параметров обработки от исследуемых свойств изделия.

Методологическая основа работы базируется на установлении зависимости, путем формирования и последующего анализа базы данных экспериментальных зависимостей технологических параметров изготовления образцов реактопластичных полимеров модифицированных углеродными наноразмерными структурами от целевых теплофизических характеристик. Целевыми теплофизическими характеристиками в данном случае будут являться тепло- и температуропроводность.

Экспериментальные исследования тепло- и температуропроводности осуществлялись методом лазерной вспышки в широком интервале температур с использованием анализатора температуропроводности и теплопроводности LFA 427, производитель NETZSCH-Gerätebau GmbH, Германия, внесен в Государственный реестр средств измерений РФ под № 41647-09.

Экспериментальные исследования теплоемкости выполнены на Универсальном дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204 F1 Phoenix, производитель NETZSCH-Gerätebau GmbH, Германия, внесен в Государственный реестр средств измерений РФ под № 54912-13. Определение плотности экспериментальных образцов путем гидростатического взвешивания выполнено с применением аналитических весов AD-1653 с комплектом для определения плотности AND GH-252 методом гидростатического взвешивания, производитель «A&D Company Limited», Япония, внесены в Государственный реестр средств измерений РФ под № 28101-04.

Математическое моделирование осуществлено с применением программной системы конечно-элементного анализа ANSYS, разработчик Ansys Inc., США и системы конечно-элементного автоматизированного расчета и проектирования конструкций APM Multiphysics, производитель ООО НТЦ «АПМ», Россия, зарегистрирована в Реестре российских программ для ЭВМ и баз данных за № 2018617790. Расчетное ядро продукта APM Multiphysics – модуль APM Structure3D – имеет аттестационный паспорт программного средства, выданный РОСТЕХНАДЗОР, ФБУ «НТЦ ЯРБ» (рег. № 330 от 18.04.2013 г.).

Построение твердотельных электронных моделей элементарных ячеек, обладающих структурой модифицированного материала выполнено в программном пакете Digimat, разработчик MSC Software Corporation, США.

Разработка нейросетевой модели технологического процесса модификации реактопластичных полимеров наноразмерными углеродными структурами была выполнена в интерактивной среде для программирования, численных расчетов и визуализации результатов Matlab, разработчик The MathWorks, Inc., США.

Для исследований влияния технологических параметров модификации реактопластичных полимеров углеродными наноразмерными структурами на теплофизические характеристики были выбраны:

– эпоксидная смола Araldite CY 179 с ангидридным отвердителем HY 917 и катализатором на основе имидазола DY 070, производитель Huntsman Advanced Materials GmbH, Германия;

– многослойные углеродные нанотрубки Baytubes C 150 P, производитель Bayer MaterialScience AG, Германия.

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

На защиту выносятся следующие основные положения работы, определяющие решение поставленных задач:

- 1) Результаты анализа возможностей автоматизации процесса обеспечения требуемых целевых свойств изделий из РПКМ, в том числе оценка взаимосвязи этих свойств с технологическими режимами переработки указанных материалов;
- 2) Принцип построения автоматизированной системы обеспечения целевых свойств изделий из РПКМ, на основе которого осуществляется выбор режимов переработки;
- 3) Метод и модель оценки ключевых характеристик РПКМ, которые существенно влияют на целевые свойства изготавливаемых изделий;
- 4) Метод идентификации взаимозависимости целевых свойств изделий из РПКМ и режимов их изготовления, основанный на нейросетевом моделировании, неформализованных процессов.

### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, приведенных в диссертационной работе, обеспечивается использованием согласованной методологией решения поставленных задач и базируется на применении современных методов исследования теплофизических свойств реактопластичных полимеров, а также на использовании современных программных платформ конечно-элементного анализа, высокоуровневого языка и интерактивной среды программирования, численных расчетов и визуализации результатов.

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение при выполнении государственных научно-технических целевых программ, прикладных научных исследований и контрактов. Предложенные методы послужили основой для разработки нового инструментального средства производства модифицированных композитных конструкций на машиностроительных предприятиях, специализирующихся на производстве изделий для нужд судостроительной (ЗАО «Псковская лодочная верфь»), станкостроительной (ООО «ПОТОК-М») и нефтедобывающей (ООО НПП «ЗСТ») отрасли.

Основные положения диссертации докладывались на 6 международных и всероссийских конференциях, выставках и семинарах:

- 1) 2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications, 11-13 июня 2012 г., Wrexham, UK;
- 2) Международной научно-технической конференции молодых ученых, 22-23 октября 2015 г., г. Могилев, Республика Беларусь;
- 3) Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», 15-17 декабря 2014 г., г. Москва, Россия;
- 4) Всероссийской конференции «Информационные технологии, менеджмент качества, информационная безопасность» (IT&MQ&IS – 2015), 20-25 мая 2015 г., Учебно-научная база КБГУ в п. Эльбрус.
- 5) 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", (IT&QM&IS – 2018), 24-28 сентября 2018 г., Санкт-Петербург, Россия.

По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для кандидатских диссертаций. Количество публикаций, проиндексированных в библиографической и реферативной базе данных Scopus равно 3.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа и ее научная новизна соответствуют паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение), а именно пунктам 3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.», 6 «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления» и 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)».

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы из 97 наименований и 2 приложений. Текст изложен на 157 страницах, включает 76 рисунков и 5 таблиц.

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА

### **1.1. Обоснование необходимости использования композиционных материалов на основе наноразмерных углеродных структур в современном машиностроении**

Технический прогресс в различных отраслях машиностроения неразрывно связан с разработкой новых конструктивных решений и прогрессивных технологий. Среди наиболее важных требований, предъявляемых к разработке изделий можно выделить минимальную массу, высокую надежность, максимальный ресурс работы, в том числе в агрессивных условиях эксплуатации. Достижение данных требований возможно только при использовании новых видов материалов и, прежде всего, композитных конструкций, проектирование и производство которых выполняется на основе современных методов.

Увеличение объема применения композиционных материалов обусловлено ростом требований современной техники и высокотехнологичных отраслей машиностроения [5]. Статистика мирового потребления конструкций и изделий из РПКМ (в стоимостном выражении) показывает, что основной их объем сосредоточен в гражданских секторах экономики. Среди них следует выделить строительную индустрию, включая строительство объектов транспортной инфраструктуры (18% мирового объема потребления), энергетику и электронику (21%), транспортное машиностроение (15%), жилищно–коммунальное хозяйство (12%), ветроэнергетику (более 11%). Таким образом, основным драйвером роста выступает строительный сектор, на который, с учетом транспортной и коммунальной инфраструктуры, приходится 30% общего объема мирового потребления РПКМ и изделий из них [6].

Опыт применения композиционных материалов в решении различных инженерно–технических задач показал, что путем оптимизации состава и свойств

компонентов композиционных материалов можно обеспечить получение изделий с заданным сочетанием технологических, физико–механических и эксплуатационных свойств.

С появлением наноразмерных добавок открылась возможность повышения свойств матричных материалов до более высокого уровня. Это, в свою очередь, значительно улучшает свойства композита в целом и позволяет, например, применять более технологичные полимеры, которые ранее не использовались из-за своих ограниченных физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Углеродные наноразмерные структуры – аллотропная форма углерода, представляющая собой замкнутые макромолекулярные каркасные системы. Отдельным классом квазиодномерных наноразмерных структур являются углеродные нанотрубки (УНТ). Диаметр УНТ варьируется в диапазоне от 1 до 50 нм, длина – до нескольких микрометров. Структура нанотрубки и представляет собой цилиндрические организованные структуры, состоящие из свернутых гексагональных графитовых слоев (графенов), торцы которых закрыты полусферической головкой [6, 7].

Упорядоченная структура фрагментов обеспечивает нанотрубкам такие свойства, как теплопроводность, термическая и химическая стабильность, электропроводность, в сочетании с высокими значениями прочности и упругой деформации. УНТ обладают свойствами адсорбции, способностью к аккумулярованию газов, холодной эмиссии электронов.

Материалы, созданные на основе углеродных наноразмерных структур могут использоваться как структурные модификаторы конструкционных материалов, обеспечивая достижение широкого перечня эксплуатационных и технологических свойств. Нанотрубки могут быть бесшовными, в идеальном случае, строго цилиндрическими, или представлять собой рулон. В зависимости от способа свертывания графенов существуют три формы цилиндрических нанотрубок (Рисунок 1.1): типа «кресло» (две стороны каждого шестиугольника ориентированы перпендикулярно оси нанотрубки), типа «зигзаг» (две стороны каждого шестиугольника ориентированы параллельно оси нанотрубки) и

хиральные УНТ (любая пара сторон каждого шестиугольника расположена к оси нанотрубки под углом, отличным от 0 или 90 °). [10]

Наименьший диаметр однослойной УНТ составляет порядка 0,3 нм для находящейся внутри многослойной УНТ и порядка 0,7 нм для индивидуальной однослойной УНТ. Наибольший диаметр нанотрубки – около 5 нм. [10]

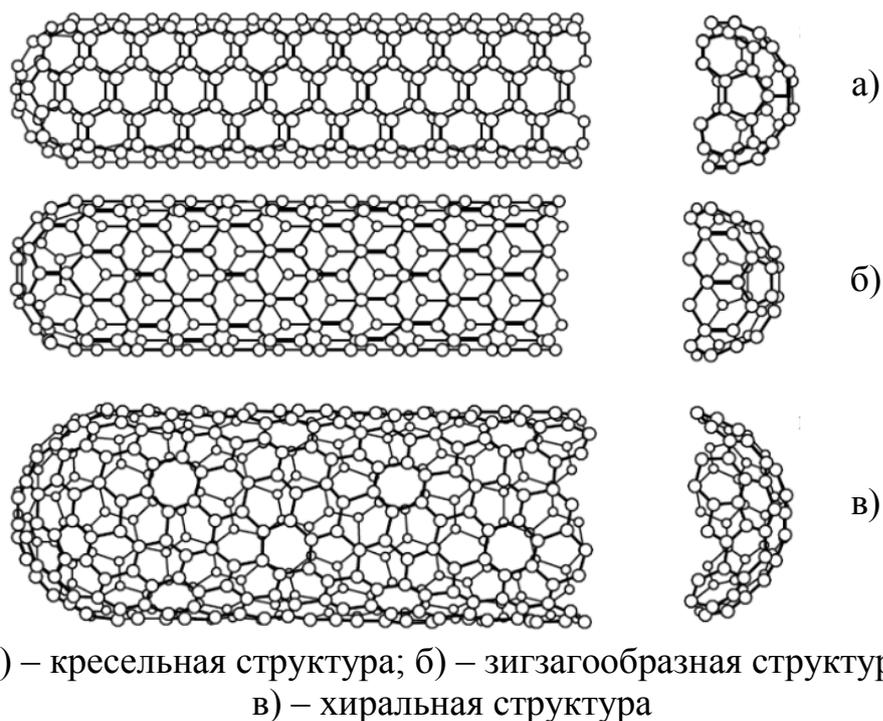


Рисунок 1.1 – Формы цилиндрических углеродных нанотрубок [10]

Нанотрубки различного строения могут быть близки по величине диаметра. Двухслойные УНТ образуют значительно больше структурных вариантов и могут быть четырех основных типов: «зигзаг–зигзаг», «кресло–кресло», «зигзаг–кресло» и «кресло–зигзаг» [9]. Многослойные нанотрубки имеют схему строения и структуру. Тонкие однослойные УНТ обладают максимальной удельной площадью поверхности до 1360 м<sup>2</sup>/г [10] и, следовательно, теоретически имеют наибольший потенциал. Но на практике они больше других подвержены образованию агломератов под действием сил Ван–дер–Ваальса.

Межслоевое расстояние в многослойных нанотрубках сопоставимо с расстоянием между слоями графита (0,34 нм), у дефектных многослойных УНТ

может достигать от 0,4 до 0,5 нм. Число слоев многослойной нанотрубки может достигать нескольких десятков.

На практике широкое применение получили многослойные УНТ, которые производятся в промышленных объемах методом химического осаждения на катализаторе (пиролиз природных газов). Упрочняющее воздействие на полимеры у многослойных УНТ ниже чем у однослойных УНТ, но они гораздо доступнее и обладают более стабильными свойствами.

К углеродным нановолокнам (УНВ) относятся нитевидные наноразмерные углеродные частицы, не имеющие ярко выраженной цилиндрической ориентации графеновых слоев, а также внутренней полости [21]. Исследования нанокompозитов с УНВ [23] продемонстрировали стабильность роста характеристик, но в небольшом диапазоне. Связано это с тем, что УНВ меньше подвержены агрегатированию и позволяют без дополнительной обработки (функционализации) вводить их в полимер.

Теплопроводность индивидуальных УНТ имеет высокие значения и по расчетам может достигать значений до 6600 Вт/(м·К) [10]. Данные значения могут быть получены исключительно вдоль материала нанотрубки. Значения теплопроводности нанотрубок, рассматриваемых в объеме, значительно ниже, тем не менее они превышают величину в 100 Вт/(м·К), что сопоставимо с теплопроводностью металлов [10].

Кроме того, исследования [21 – 26, 86 – 89] говорят о возможности формирования принципиально новых свойств наномодифицированных композитов, существенно меняющих свойства исходных материалов, что позволяет использовать матрицу нанокompозита даже без привычного армирующего наполнителя.

Обзор литературных источников свидетельствует о том, что многие характеристики как жестких полимеров (реактопластов), так и эластомеров могут быть существенно, иногда в разы, улучшены путем их модификации малыми добавками наночастиц – фуллеренов, нанотрубок, нановолокон, неорганических наночастиц и пр. [18,19]. Обусловлено это тем, что наночастицы, участвуя в

формировании надмолекулярной полимерной структуры, через нее, по–видимому, положительно влияют на свойства образующегося материала [51].

Углеродные наноразмерные частицы способны, в довольно малых концентрациях, влиять на свойства получаемых композиций, в отсутствие химического взаимодействия с полимерным связующим. В работах [65, 66] показано, что использование УНТ в матричных материалах оказывает положительное влияние на прочностные и технологические характеристики композиции.

Установлено [21 - 26], что малые добавки фуллерена существенно изменяют эксплуатационные характеристики полимерных материалов, повышая теплофизические и механические свойства. Так, например, введение от 0,01 до 3,6 % фуллерена увеличивает прочностные и адгезионные характеристики эпоксидной смолы в 2–4 раза по сравнению с контрольными образцами, а прочность углепластика при межслоевом сдвиге – примерно в 1,5 раза [20].

На сегодняшний день традиционные материалы, главным образом металлы, в большинстве случаев не в полной мере отвечают потребностям современной инженерной практики [6]. Это обусловлено тем, что в определенных условиях эксплуатации конструкции из КМ обладают сочетанием комплекса свойств, таких как высокая механическая прочность, теплостойкость, размеростабильность и т.д.

Использование композитов, как материалов для конструктивных изделий, имеет большие перспективы, но сдерживается из-за значительной проблемы – невозможности обеспечить заданные высокие и стабильные свойства материала в процессе формирования из него изделия. Устранение этой существенной проблемы возможно путем решения задачи обеспечения эксплуатационных характеристик изделия, определенных его прикладным назначением, на основе поиска технологических решений целенаправленного, научно выверенного изменения свойств матричного материала в композитном изделии. Необходимость решения задачи именно таким путем обусловлена тем, что в отличие от металлов, свойства которых известны, композиция с необходимым комплексом свойств формируется одновременно с изделиями в процессе производства. Иными словами,

производство композитной конструкции означает не только придание формы в соответствии с геометрическими требованиями, но и обеспечение номенклатуры и уровня свойств, обозначенных заказчиком в технических требованиях к изделию.

Обеспечение производства композитных конструкций заданного качества в соответствии с установленными целевыми свойствам достигается на этапе ТПП. Это связано с тем, что на этапе ТПП формируется производственная структура, определяется ее гибкость и обеспечивается соответствие характеристик компонентов композиции заданным путем выбора и реализации оптимального режима переработки. Совокупность обозначенных факторов определяет свойства композитной конструкции. Кроме того, режимы переработки, определенные на этапе ТПП, определяют расход трудовых, материальных и финансовых ресурсов, формируя экономическую эффективность конечного изделия.

## **1.2. Подходы, применяемые для решения задачи обеспечения технологической подготовки производства изделий из композиционных материалов**

Технологический процесс производства РПКМ фактически совмещен с технологическим процессом производства конечного изделия. На стадии инженерного проектирования объекта производства, совмещение технологических процессов позволяет обеспечить комплексное решение вопросов конструирования и формообразования изделий. При этом сокращаются затраты и время на все виды конструкторско–технологических и проектных работ, повышается взаимосвязь и взаимообусловленность и, как следствие, обоснованность и надежность инженерно–технических проектов [8].

Достижение требуемых характеристик обеспечивается широким диапазоном различных исходных материалов и их компонентов, а также технологией их переработки при формировании композитной конструкции [6]. При этом,

применяемые на сегодняшний день технологические операции производства изделий из КМ (вакуумное, термовакуумное, трансферное формование, литье, прессование, пултрузия, экструзия и др.) позволяют обеспечить минимизацию производственных затрат, связанных с производственными отходами, возникающими при формообразовании требуемой геометрии изделия. Это объясняется тем, что в большинстве случаев, формирование структуры материала и геометрии конечного изделия совмещены в единую технологическую операцию.

Адгезионное взаимодействие волокна и матрицы определяет свойства композитной конструкции и обеспечивает и их сохранение в процессе эксплуатации. Локальные напряжения в композите достигают максимальных значений как раз вблизи или непосредственно на границе раздела, где обычно и начинается разрушение материала [12]. Граница раздела должна иметь определённые свойства, обеспечивающие эффективную передачу механической нагрузки от матрицы на волокно [13]. Адгезионная связь на границе раздела компонентов должна сохраняться при воздействии напряжений, возникающих по причине различия КЛТР компонентов, либо в результате усадки связующего при его отверждении. Защита волокон от внешнего воздействия так же в значительной степени определяется адгезионным взаимодействием по границе раздела [14].

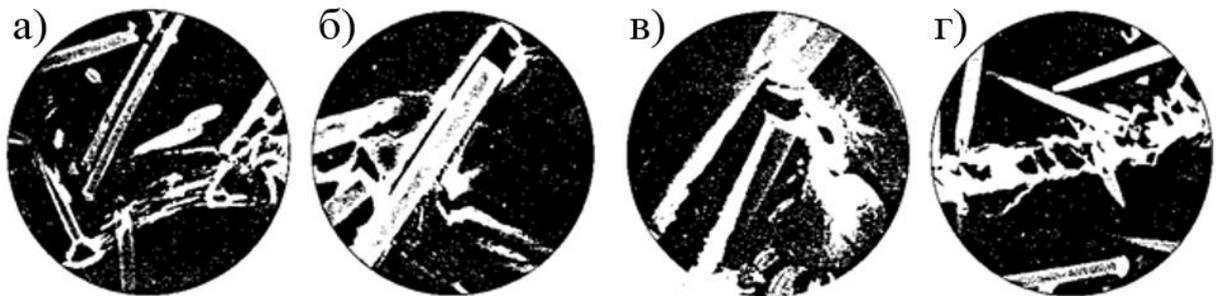
Существенный вклад в формирование свойств композита оказывают также способы армирования. По способам армирования можно выделить группы однонаправленно, структурно и хаотически армированных композитов.

При проектировании и изготовлении волокнистых композитных конструкций применяются принципы проектирования, основанные на совмещении технологических процессов формирования изделия и материала. Совмещение компонентов композиционного материала приводит к формированию уникальных свойств, которыми не обладают отдельно рассматриваемые элементы композиции. В отдельных случаях это обусловлено наличием обширной поверхности раздела компонентов, формирующей гетерогенную структуру композиции. [14].

Свойства композитной конструкции определяются свойствами армирующих элементов композиции, свойствами матрицы (связующего) и взаимодействием на

границе раздела матрица–волокно. Совокупность вышеуказанных параметров определяет свойства композита, характер его разрушения и требования к условиям его эксплуатации на протяжении жизненного цикла. Работоспособность композитной конструкции, помимо рационального выбора исходных компонентов, обеспечивается выбором оптимальной технологии производства, которая, в свою очередь, обеспечивает сохранение первоначальных свойств компонентов, а также формирование свойств композиции, заложенных на этапе проектирования.

В качестве полимерных матриц обычно применяют термореактивные связующие или реактопласты на основе отверждающихся синтетических смол: полиэфирных, эпоксидных или фенолоформальдегидных, реже термопласты, например, полиамид, лавсан, фторопласт или полиимид [2]. Основные технологические требования, предъявляемые к матричным материалам, заключаются в перераспределении напряжений на армирующий элемент (наполнитель) и предотвращении роста трещин. Препятствие роста трещин достигается за счет разрушения части волокон и деформирования матрицы в местах разрушения или отслоения волокон (Рисунок 1.3) [2, 3].



а) – разрушение волокна, б) – выдергивание волокна, в) – отслоение матрицы от волокна, г) – разрушение матрицы.

Рисунок 1.3 – Виды повреждений, сопровождающих распространение трещины в композите, армированном короткими волокнами, снятые электронным микроскопом [2]

При создании современных гибридных композитов возможно не только формирование широкого спектра физико-механических свойств, но и их направленное изменение. Это позволяет варьировать такими параметрами, как вязкость разрушения, жесткость, электропроводность, прочность, теплопроводность и др.

Потребность в разработке новых материалов лежит в основе постоянного усовершенствования технологических процессов их производства, создания принципиально новых технологий и оборудования для их реализации. В течение относительно короткого времени новые конструкторские и технологические решения, появившиеся при разработке уникальных материалов, распространяются в различных отраслях производства и становятся привычными для специалистов. Подходы, применяемые для решения задачи ТПП композитных конструкций, направлены на обеспечение соответствия свойств армирующего, матричного материала, а также взаимодействия на границе раздела компонентов, обеспечивают соответствие условиям конечной эксплуатации изделия.

С позиции теории систем, технологический процесс формирования композитной конструкции следует отнести к сложным динамическим объектам, в которых принятие технологических решений при функционировании осуществляется в условиях априорной неопределенности. Это обусловлено стохастической неопределенностью выходных параметров и недостаточной информацией о возмущающих факторах, влияющих на стабильность и точность функционирования производственной системы [1].

Указанную неопределенность можно уменьшить путем разработки математических моделей, представляющих собой зависимости между основными свойствами исходных компонентов, целевыми свойствами композиции и технологическими параметрами переработки. Тем не менее, сформировать универсальные модели или принципиальные подходы, позволяющие обеспечить существенное снижение неопределенности, не привязываясь к конкретной композиции и технологии ее переработки, на сегодняшний день, не представляется возможным.

### **1.3. Методы моделирования целевых свойств и идентификации технологических параметров производства композиционных материалов, модифицированных наноразмерными структурами**

Проблема идентификации целевых свойств реактопластичных полимеров при модификации углеродными наноразмерными структурами исследовалась в работах [20, 62 – 64, 67]. Было показано, что существует закономерность, описывающая зависимость прочностных характеристик нанокompозита от изменения вязкости нанодисперсии, которая, в свою очередь, зависит от концентрации УНТ. Вязкость нанодисперсии при очень малых концентрациях УНТ (до 0,01 – 0,15 %) монотонно снижалась при увеличении концентрации, а при дальнейшем увеличении концентрации УНТ процесс падения вязкости замедляется и переходит в фазу роста (Рисунок 1.4, кривая 1).

Согласно теории Ван-дер-Ваальса, на малом расстоянии между молекулами действуют силы отталкивания, которые с увеличением расстояния сменяются силами притяжения (Рисунок 1.5). Из чего следует, что при достижении оптимальной концентрации УНТ, имеющих большую удельную площадь поверхности (до 1000 м<sup>2</sup>/г), молекулы УНТ располагаются друг от друга на минимальном расстоянии. При этом возникает такое воздействие полей УНТ на молекулы связующего в межфазной зоне, при котором оно становится более подвижным и силы отталкивания между УНТ способствуют увеличению текучести связующего. Таким образом, нанодисперсия в целом становится менее вязкой [62].

В дальнейшем, при полимеризации нанокompозита замечено, что наличие агломератов даже несколько ухудшает прочностные характеристики нанокompозита. Это ухудшение прочностных характеристик можно объяснить тем, что вытесненная из агломератов масса связующего увеличивает межфазную зону между ними. Учитывая то, что прочностные характеристики матрицы существенно ниже аналогичных свойств УНТ, увеличением межфазной зоны между агломератами можно объяснить уменьшение прочности нанокompозита.

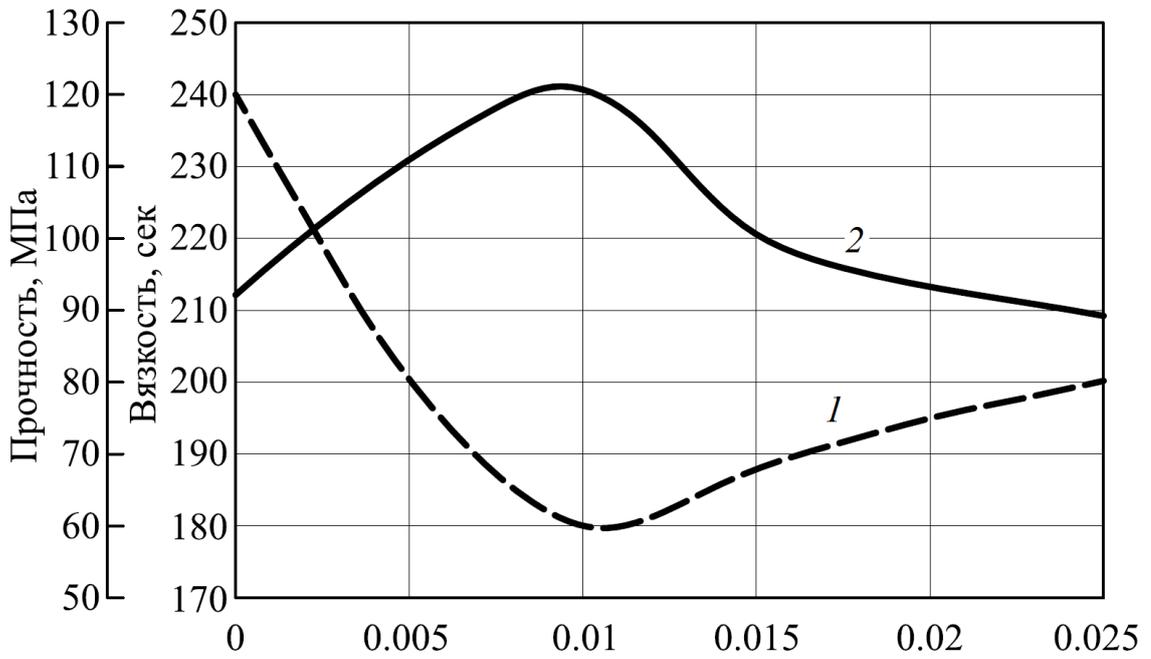
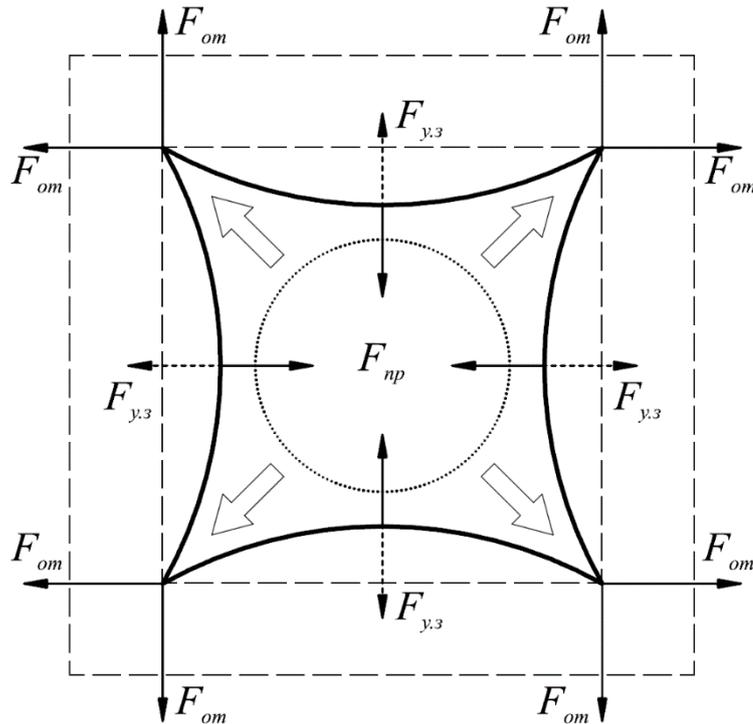


Рисунок 1.4 – Обобщенная зависимость физикомеханических характеристик (2) нанокomпозитов от концентрации нанотрубок и вязкости (1) наносuspензии [62 – 64]

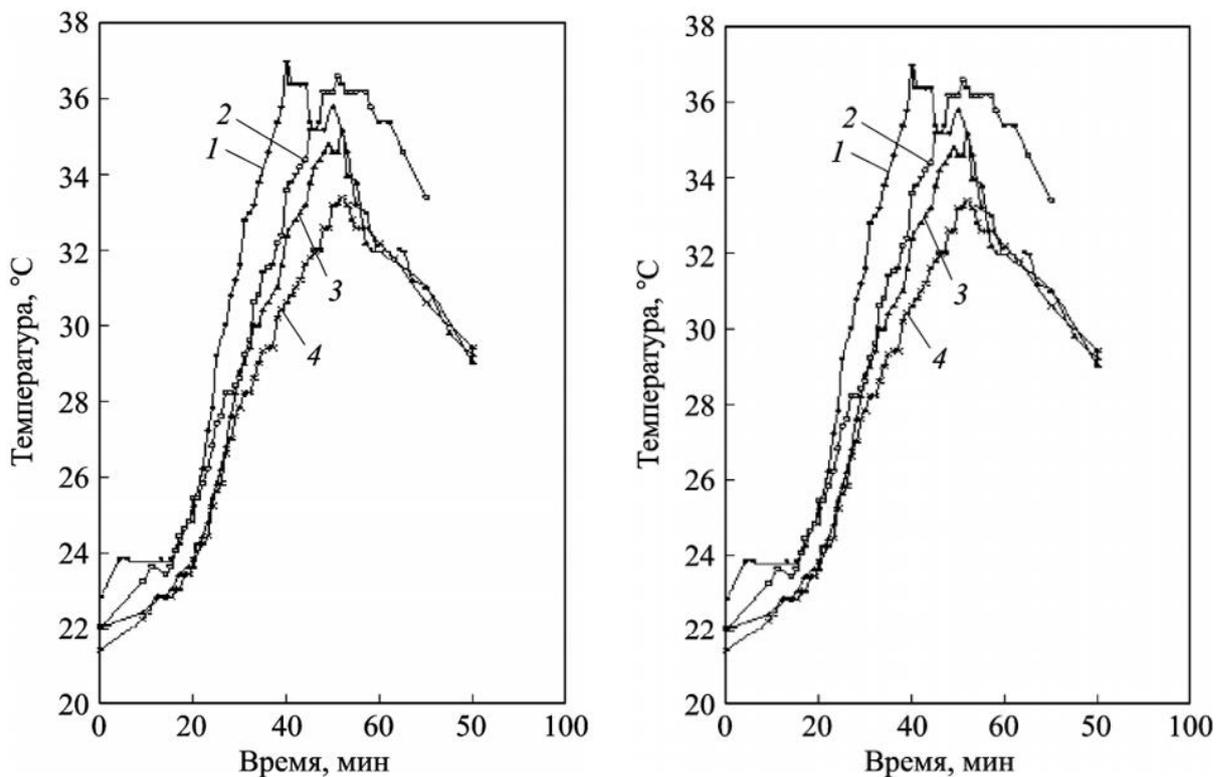


$F_{у.з}$  – силы ультразвукового воздействия на УНТ в агломерате;  $F_{пр}$  – силы притяжения УНТ;  $F_{от}$  – силы отталкивания УНТ

Рисунок 1.5 – Схема сил, действующих на агломерат наноразмерной частицы в ультразвуковом поле

Агломераты в полимеризованной матрице можно рассматривать как пустоты, которые играют роль концентраторов напряжения и также способствуют уменьшению прочностных характеристик нанокompозита в целом (Рисунок 1.4, кривая 2). При введении УНТ в реактопластичный полимер было отмечено снижение температуры экзотермической реакции с увеличением количества углеродных нанотрубок (Рисунок 1.6, а), что позволило одновременно с упрочнением композита значительно уменьшить усадочные явления и снять внутренние напряжения без проведения дополнительной термической обработки.

Увеличение количества наноразмерных частиц приводит к уменьшению времени начала гелеобразования (Рисунок 1.6, б), что на фоне улучшения свойств наномодифицированной композиции позволяет минимизировать количество катализирующих добавок и, следовательно, уменьшить их негативное влияние на структуру и прочность композита.



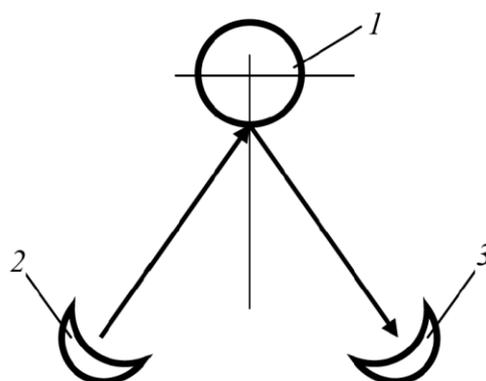
а) Зависимость изменения экзотермической температуры  
 б) Изменение времени начала гелеобразования  
 1 — чистая полиэфирная смола; 2 — полиэфирная смола + 0,005 % УНТ; полиэфирная смола + 0,01 % УНТ; 4 — полиэфирная смола + 0,02 % УНТ

Рисунок 1.6 – Диаграммы состояния полиэфирной смолы с различным содержанием УНТ в процессе отверждения [67]

Получение качественных наносuspензий является важной технической задачей в различных отраслях техники. Такой задачей является наномодифицирование связующего в целях повышения качества матриц полимерных композиционных материалов. Исследования различных методов введения наночастиц в полимерную матрицу [62 – 64, 68] доказывают важность равномерного распределения наночастиц по всему объёму с целью максимального использования главного преимущества наночастиц - обеспечения прочной связи с молекулами связующего.

Наиболее перспективным можно назвать ультразвуковой метод, однако при проектировании технологических процессов важно обоснованно назначить длительность ультразвуковой обработки. В работе [68] предлагается метод экспериментального определения характеристических моментов времени технологического процесса приготовления наносuspензий в условиях ультразвукового воздействия. Предложен оптический метод определения однородности суспензии по изменению её цветовой гаммы в соответствии со схемой испытаний, представленной на Рисунке 1.7. На рисунке 1.8 представлены фотографии отдельных стадий процесса ультразвукового диспергирования. Последовательность кадров, характеризующая изменение интенсивности цвета наносuspензии, представлена на Рисунке 1.9. Анализ фотографий проводился исходя из предположения о том, что распределение УНТ в объёме связующего равномерно. По мере разделения агломератов на отдельные наночастицы под действием ультразвуковой обработки и заполнения ими рабочего объёма, интенсивность цвета наносuspензии изменяется во времени. После нормирования уровня интенсивности цвета, была получена кривая увеличения концентрации нанотрубок во времени, которая позволяет определить момент начала разрушения агломератов во время ультразвуковой обработки (Рисунок 1.10).

Таким образом, теоретически и экспериментально показано, что моменты начала действия на наносuspензию ультразвукового поля и начала разрушения агломерата УНТ не совпадают [68]. Разработанный метод удобен при назначении времени ультразвуковой обработки в производственных условиях.



1 – объект испытания; 2 – источник света; 3 – фоторегистратор

Рисунок 1.7 – Схема оптического определения концентрации наночастиц в суспензии по цветовой гамме [68]

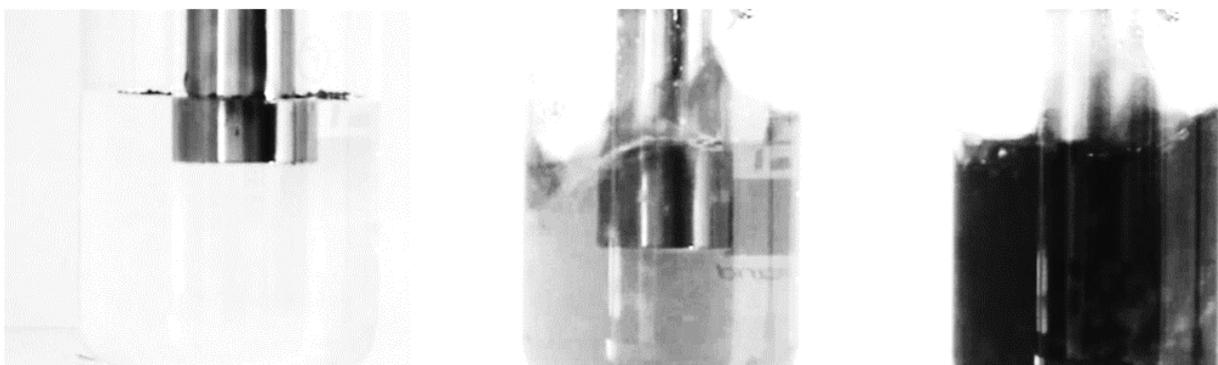


Рисунок 1.8 – Фотографии стадий диспергирования наночастиц в реактопластичном полимере под действием ультразвукового поля [68]

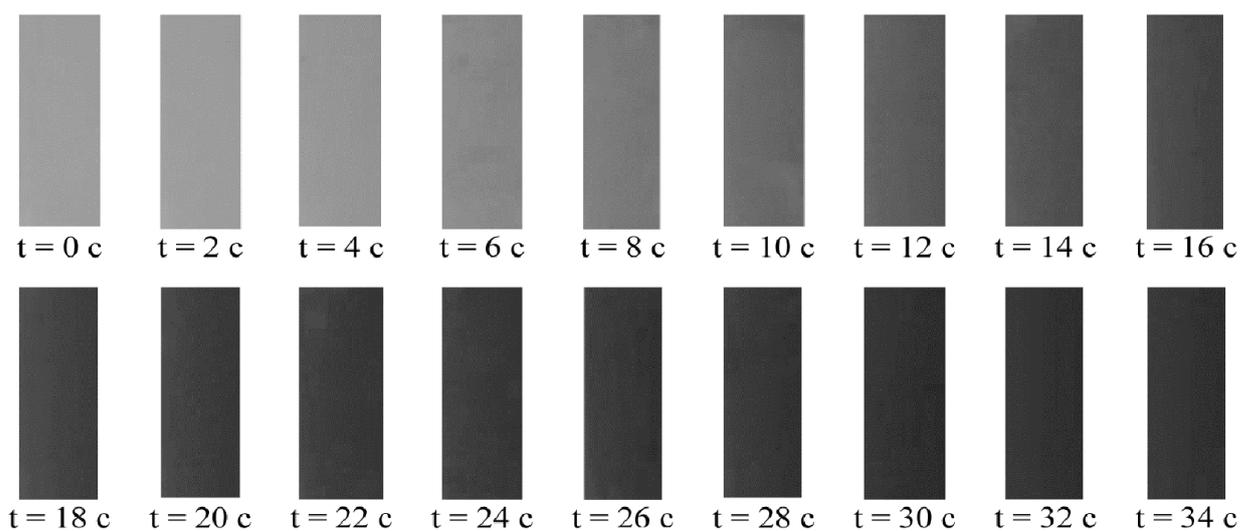
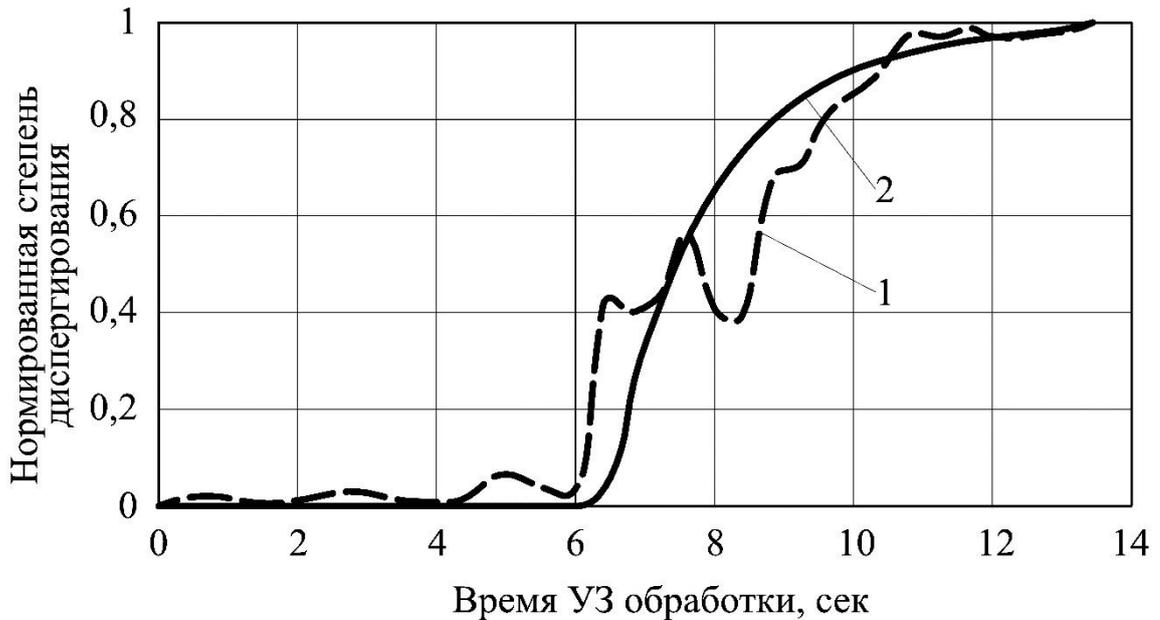


Рисунок 1.9 – Фотофиксация процесса изменения концентрации УНТ в связующем по интенсивности черного цвета суспензии [68]



1 – экспериментальные данные, полученные на основе фоторегистрации,  
2 – сглаженная аппроксимация экспериментальной кривой

Рисунок 1.10 – Графическая зависимость изменения интенсивности цвета наносuspензии во времени ультразвуковой обработки [69].

Предложенный метод позволяет по экспериментальным данным определить время начала разрушения агломератов и общее время ультразвуковой подготовки наносuspензии. Полученные соотношения позволяют осуществлять выбор мощности ультразвукового генератора по требуемой производительности технологического процесса приготовления наносuspензии.

Сформулированные подходы подтверждают зависимость технологических параметров переработки от целевых свойств модифицированной композиции. Они позволяют решать задачи идентификации оптимальных режимов переработки и моделирования целевых свойств в лабораторных условиях, при условии соответствия компонентов требованиям проведения эксперимента. Однако применение описанных подходов в качестве универсального инструмента обеспечения ТПП невозможно в виду чувствительности к исходным компонентам и большого количества нелинейных зависимостей, аналитическое описание которых представляет собой сложный наукоемкий процесс, требующий индивидуального подхода к каждой конкретной совокупности технологических

итераций, определяющих формирование композитной конструкции.

Таким образом, актуальной становится задача поиска методов автоматизации ТПП при модификации реактопластичных полимеров углеродными наноразмерными структурами.

#### **1.4. Обоснование актуальности исследований, направленных на разработку автоматизированных систем технологической подготовки производства модифицированных композитных конструкций**

Экономическая эффективность производства изделий из композиционных материалов напрямую зависит от уровня производительности технологических операций. Технологические режимы переработки компонентов композитной конструкции являются одним из ключевых факторов, определяющих свойства конечного изделия. При этом, специфика производственных процессов РПКМ заключается в том, что вариация свойств исходных компонентов в допустимых пределах оказывает существенное влияние на соответствие оптимальным значениям технологических режимов переработки. В критических случаях, это может приводить к несоответствию изделия заявленным целевым свойствам, а, следовательно, к браку. Обеспечение оптимальных значений технологических режимов переработки, в данном случае, достигается путем применения средства автоматизации ТПП. Таким образом, можно установить, что экономическая эффективность производства композитных конструкций зависит, в том числе, от степени автоматизации.

Системный подход к рассмотрению различных процессов является одним из важнейших требований современного этапа научно–технического прогресса и должен найти применение при изучении вопросов, связанных с развитием и совершенствованием производственных процессов [42]. Сложная система может быть расчленена на конечное число составных подсистем. Подсистемы, в свою очередь, могут быть рассмотрены как отдельные системы, состоящие из более

мелких структурных единиц. Свойства композиционного материала, как сложной системы, определяются не только свойствами компонентов, но и характером, и процедурой их взаимодействия.

Согласно положениям теории управления следует выбрать два основных признака, по которым целесообразно, для получения необходимого результата, проводить классификацию. Первым из них является степень полноты априорной информации об объекте управления, а вторым – сложность структурной схемы системы. В свою очередь, по первому признаку системы подразделяются на системы с априорной информацией, заданной в виде теоретико–вероятностных характеристик и системы с неполной априорной информацией. Что касается второго признака, то системы могут быть многомерные, взаимно регулируемые, регулируемые с переменной структурой, замкнутые с иерархической структурой управления и системы произвольной сложности. Кроме данной классификации, системы могут классифицироваться по области применения: это технические, экономические, информационные и другие системы. [39 – 41]

При производстве композитных конструкций, проектирование технологических процессов занимает основное место на стадии ТПП. Трудоемкость выполнения этой задачи может достигать 60 % трудоемкости всей технической подготовки производства, т. е. труд инженеров–технологов при проектировании технологических процессов может быть равен почти 2/3 всех трудовых затрат различных специалистов на трех этапах технической подготовки [7]. Технологический процесс производства КМ может быть представлен в качестве совокупности параллельно работающих иерархических подсистем высокого уровня. Подсистемы имеют различные степени значимости, а система в целом может быть представлена в виде «древовидной» структуры (Рисунок 1.11). Структура эффективности технологического процесса производства изделий из КМ представлена на Рисунке 1.12.

Как видно из Рисунка 1.12, технологический процесс производства изделий из полимерных композиционных материалов включает в себя целый ряд подсистем, которые вносят свое значение эффективности  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, \dots, Q_N$  в общую

эффективную работу системы. Каждая из этих подсистем содержит в себе подсистемы более низкого уровня. Они имеют свои особенности и задачи и действуют совместно для достижения общей цели – реализации производственного процесса. Каждую из этих подсистем можно рассматривать как самостоятельную систему по обеспечению производственного цикла.

Отечественные производственные предприятия различных отраслей народного хозяйства, связанные с производством изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов, существенно уступают зарубежным производителям в плане использования современных информационных технологий и средств автоматизации в производственных процессах.



Рисунок 1.11 – Иерархическая система технологического процесса производства изделий из РПКМ

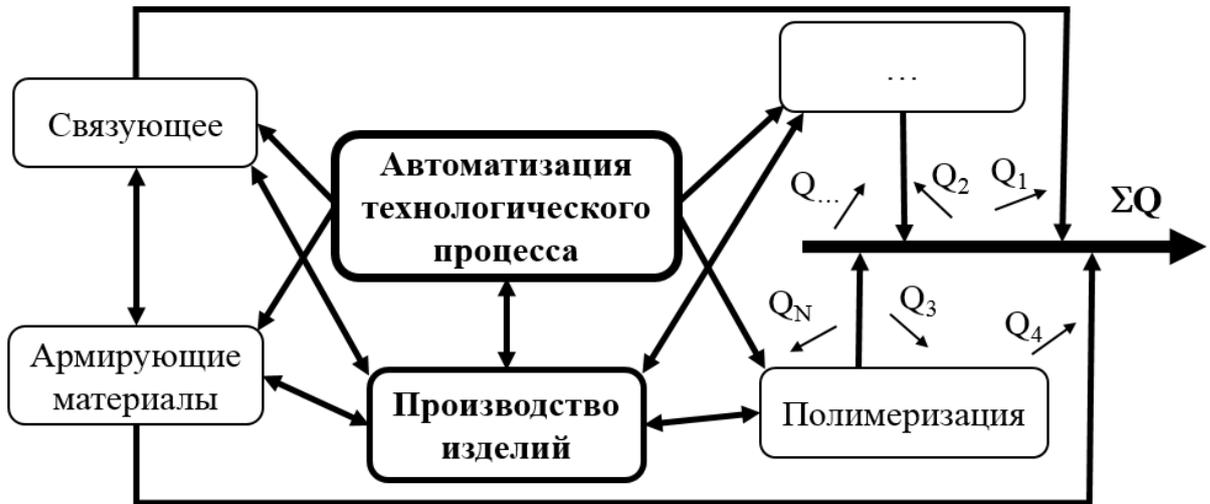


Рисунок 1.12 – Структура эффективности технологического процесса производства изделий из полимерных композиционных материалов

Основной причиной является отсутствие соответствующего информационного и программного обеспечения, позволяющего в максимальной степени автоматизировать процесс управления производством изделий из композитных полимерных материалов на этапе технологической подготовки производства. Это объясняется тем, что вопросы обеспечения производства вычислительной техникой и подготовка соответствующих специалистов имеют, в настоящее время, апробированные и результативные методы решения, в то время как разработка и создание программного и информационного обеспечения, требует разработки соответствующих методологических подходов, позволяющих с максимальной отдачей использовать возможности вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения, при решении задач технологического обеспечения производственных процессов, независимо от специфики решаемых задач и иерархического уровня производства.

В связи с этим, на сегодняшний день является актуальным совершенствование существующих и разработка новых методов технологического обеспечения производственных процессов, опирающихся на использование современных средств автоматизации технологической подготовки производства.

### **1.5. Методологические подходы, позволяющие обеспечить автоматизацию технологической подготовки производства композитных конструкций**

Выбор рационального способа производства композитных конструкций зависит от материально-технологических, конструктивно-технологических и производственных факторов. Технологические факторы, в свою очередь, определяются технологическими свойствами, которые предопределяют выбор компонентов и осуществление процессов их переработки в изделия.

В зависимости от количественных показателей технологических свойств, различные КМ считаются технологичными или, наоборот, нетехнологичными. Мера технологичности КМ соотносится, как правило, с существующими методами и серийными средствами технического оснащения технологического процесса производства.

Технологические свойства КМ способны претерпевать радикальные изменения при варьировании состава, структуры, межфазного взаимодействия и других признаков, характеризующих определенный вид материала. В результате, вариабельность технологических свойств КМ одного вида, фиксируемая различными марками материала, обуславливает способность этого материала к переработке в изделия сразу несколькими различными методами [7].

Возможности варьирования составов полимерных материалов могут приводить и к более радикальным изменениям. Так, при увеличении длины волокон волокнистых наполнителей свыше критической полимерные материалы переходят из разряда пластмасс в разряд армированных пластиков, специфика технологических свойств которых исключает возможность их переработки в изделия, например, литьем под давлением, экструзией, раздувом, вынуждая использовать для этого методы намотки, пултрузии, выкладки. Следовательно, в общем случае проектная зависимость технологического процесса от технологических свойств полимерного материала может быть представлена в виде схемы, изображенной на Рисунке 1.13 [7].

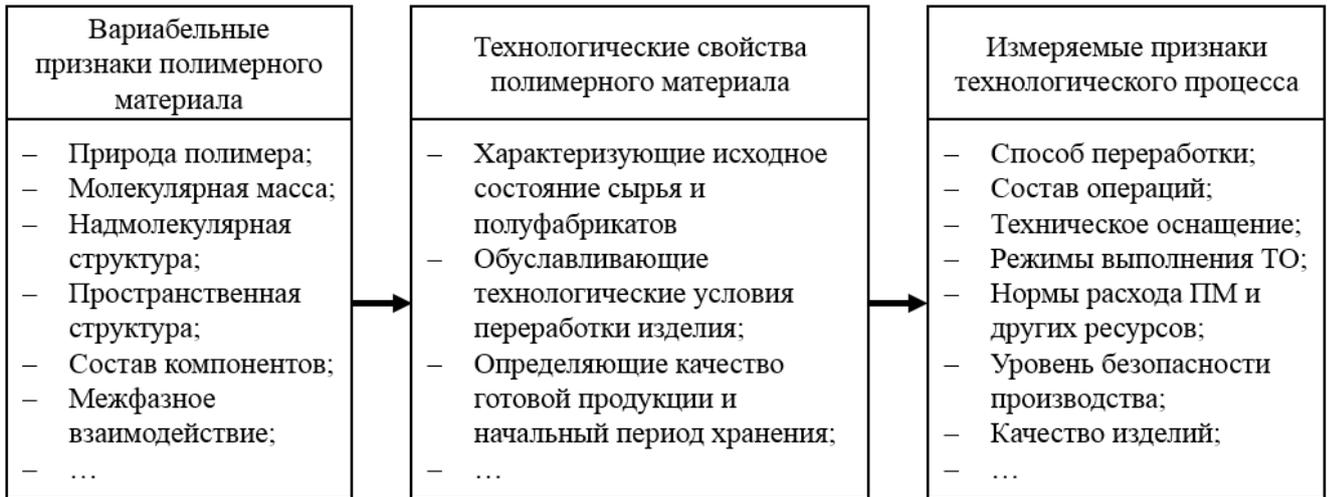


Рисунок 1.13 – Связь технологического процесса и технологических свойств полимерного материала [7]

Современные предприятия сталкиваются с необходимостью обеспечения модификации реактопластичных полимеров исходя из требований к повышению теплопроводности (электропроводности) конечного изделия. При этом, прогнозирование и обеспечение требуемых свойств конечного изделия достигается путем определения параметров технологических процессов путем последовательного приближения. Требования к сужению диапазона разброса параметров изделий от заданных повышаются, ограничиваются сроки выпуска и объемы партий деталей. В этих условиях, отсутствие автоматизированных методов проектирования параметров операций для изделий и конструкций из композиционных материалов приводит к увеличению периода технологической подготовки производства до 30–40% от общей трудоемкости и становится соизмеримым со сроком нахождения изделия в производстве, а иногда и превышает его [7]. Закономерно возникает необходимость автоматизации проектных работ для сокращения длительности периода технологической подготовки производства. Автоматизация технологических операции по модификации связующего на этапе ТПП изделий из КМ затруднена отсутствием моделей, характеризующих процессы диспергации наноразмерных структур в вязкой среде, меняющей вязкость нелинейно в процессе обработки, а также баз данных (Рисунок 1.14), рекомендующих оптимальные режимы проведения технологических операций.

Решение задачи эффективного управления ТПП изделий из КМ позволит снизить себестоимость их изготовления, сократить время разработки технологической документации, повысить производительность производства.



Рисунок 1.14 – Схема информационного потока данных на этапе ТПП изделий из композиционных материалов

Из вышеизложенного следует, что исследования, направленные на разработку моделей, описывающих взаимосвязь между качественными характеристиками

изделия и технологическими параметрами операции, построение на их основе алгоритмов, позволяющих автоматизировать проектирование технологических операций для изделий из КМ, являются актуальными.

## 1.6. Выводы и заключения

Проведенный анализ состояния исследуемого вопроса позволяет сделать следующие выводы:

1) Технический прогресс в машиностроении связан с разработкой новых конструктивных решений и прогрессивных технологий. Достижение требований, предъявляемых к разработке изделий, применяемых в машиностроении, не возможно без разработки современных прогрессивных технологий проектирования и производства изделий из КМ.

2) Производство композитных конструкций для обеспечения соответствия требованиям машиностроительных производств гражданского хозяйства, среди которых можно выделить минимальную массу, высокую надежность, максимальный ресурс работы, в том числе в агрессивных условиях эксплуатации, требует применения наноразмерных структур, для чего необходимо решение задачи подбора оптимальных параметров их переработки в составе КМ;

3) Совокупность большого количества нелинейных физических процессов, определяющих условия переработки наноразмерных компонентов, приводят к необходимости проведения большого количества экспериментальных исследований, направленных на выявление закономерностей, определяющих соответствие между технологическими параметрами изготовления и целевыми характеристиками конечного изделия;

4) Конечная стоимость изделий, произведённых с использованием наноразмерных модификаторов, как следствие, является неприемлемой для применения в продуктах массового производства, снижая области практического

применения потенциала, заложенного в идее применения наноструктурированных композиций.

Таким образом, актуальной и востребованной становится разработка и апробация методологических подходов к формированию систем, направленных на интеллектуализацию процесса решения задачи определения целевых свойств изделия по технологическим параметрам его переработки и, что не менее важно, на решение задачи определения технологических параметров переработки изделия по его целевым характеристикам.

## **Глава 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **2.1. Обоснование нового подхода и предложение концепта, позволяющего реализовать метод обеспечения автоматизации производства**

Анализ литературных источников позволил заключить, что модификация композитных конструкций может быть выполнена различными способами, исходя из технологических возможностей производства, специфики исходных компонентов, квалификации исполнителей, требований к конструктивному либо функциональному исполнению изделий и т.д. Тем не менее, задача обобщения и формализации связей между требованиями к изделию, заложенными на этапе проектирования, технологиями изготовления этого изделия, конечными целевыми характеристиками изделия и их соответствия функционалу и условиям эксплуатации не имеет решения в общем виде, универсального для разного рода композиций. Кроме того, существующие методы и концепции не позволяют в полной мере объяснить и описать процесс формирования структуры модифицированного наноразмерными структурами КМ, определяемой совокупностью многочисленных факторов.

Каждой группе композиционных материалов характерен определенный порядок ее описания, сложившийся, в основном, из опыта полученных знаний при исследовании отдельных структур, материалов, технологий или изделий этой группы. Имеющийся порядок, как правило, ограничен и относится исключительно к соответствующей группе. Его обобщение и применение к другим группам КМ, как правило, не дает результата.

Возникает очевидная необходимость формирования нового, охватывающего различные группы КМ, подхода, обеспечивающего оптимальное моделирование

свойств и процессов формирования изделия. Попытка реализовать новый подход через обобщение закономерностей в уже существующих методах не дало универсального решения, что подтвердило необходимость формирования нового подхода. Концепция композитной конструкции исходит из формирования изделия и структуры его макрогоетерофазной системы в едином технологическом процессе. В отличие от изотропных и квазиизотропных материалов, для которых понятие заготовки определено однозначно, композиционный материал представляет собой анизотропную систему, с ярко выраженной границей раздела между компонентами, составляющими основу материала. Эта особенность лежит в основе выдвигаемого Положения о позиционировании изделия, его размеров, свойств и образующих компонентов, как единой, взаимосвязанной системы, процесс формирования которой с позиции создания материала, совпадает с формированием конечного изделия.

Значимыми показателями изделий являются адекватность технологических процессов его производства и соответствие требованиям условий конечного применения – соответствие служебному назначению. При этом адекватность применения технологических процессов определяется уровнем автоматизации производства.

Концепция системы автоматизации производства должна иметь границы адекватных значений целевых характеристик и технологических параметров производства. Для целевых характеристик граничные параметры определяются физико-химическими свойствами веществ и научно-обоснованными возможностями их превышения. В свою очередь, технологические параметры ограничены производственными и функциональными возможностями оборудования, технологическими решениями и компетенциями персонала.

В работе выдвигается к рассмотрению Положение об оценке адекватности технологического процесса в совокупности с целевыми характеристиками, что отличает предлагаемый подход от традиционных, анализирующих преимущественно требования к конечному изделию.

Применение наноразмерных модификаторов в составе КМ позволяет

изменить их свойства, что дает основу для решения широкого спектра задач народного хозяйства и расширения областей практического применения в реальном секторе экономики. Однако в этом случае необходима разработка универсальных методов, позволяющих выполнять работы по разработке конструкторских решений и технологических регламентов производства без проведения большого количества дорогостоящих, но имеющих частный характер, экспериментальных исследований.

Достижение выше обозначенных результатов возможно при условии реализации Подхода, позволяющего с высокой степенью достоверности идентифицировать технологические параметры и целевые свойства модифицированных изделий. В связи со сложностью и многофакторностью реализация выдвинутого положения возможно только при активном использовании средств автоматизации технологических процессов. Развитие средств автоматизации в вопросах формирования композитной структуры сложных изделий является фактором, обеспечивающим развитие направления создания многокомпонентных систем, содержащих различные, в том числе наноразмерные, наполнители, обеспечивающие формирование необходимых физико-механических характеристик, повышении его качества и технологичности.

Задача идентификации технологических параметров изделий, произведенных с использованием наноразмерных структур, по целевым характеристикам, и обратная ей задача определения целевых характеристик по технологическим параметрам изготовления являются многомерными многопараметрическими задачами идентификации процессов, взаимосвязь между которыми не может быть однозначна установлена универсальными аналитическими методами. Решение задачи взаимной идентификации целевых и технологических характеристик изделия с использованием методов аналитического моделирования наноразмерных гетерофазных систем, требует рассмотрения каждой композиции в отдельно взятом случае.

Повышение качества ТПП для деталей из КМ может быть достигнуто с помощью современных методов организации и управления производством. Перспективным, на сегодняшний день, является направление ресурсного

обеспечения решения задач многофакторной автоматизации процессов, связанных с технологической подготовкой производства посредством использования автоматизированных систем управления, построенных с помощью искусственных нейронных сетей, основанных на массовой параллельной обработке большого объема информации и способности к самообучению по примерам обучающей выборки [43, 44, 47].

В общем случае, искусственной нейронной сетью является вычислительная система, реализующая работу конечного числа слоев, состоящих из простых, параллельно работающих процессорных элементов – нейронов, соединенных адаптивными линиями передачи информации – связями или синапсами (Рисунок 2.1) [48 – 50].

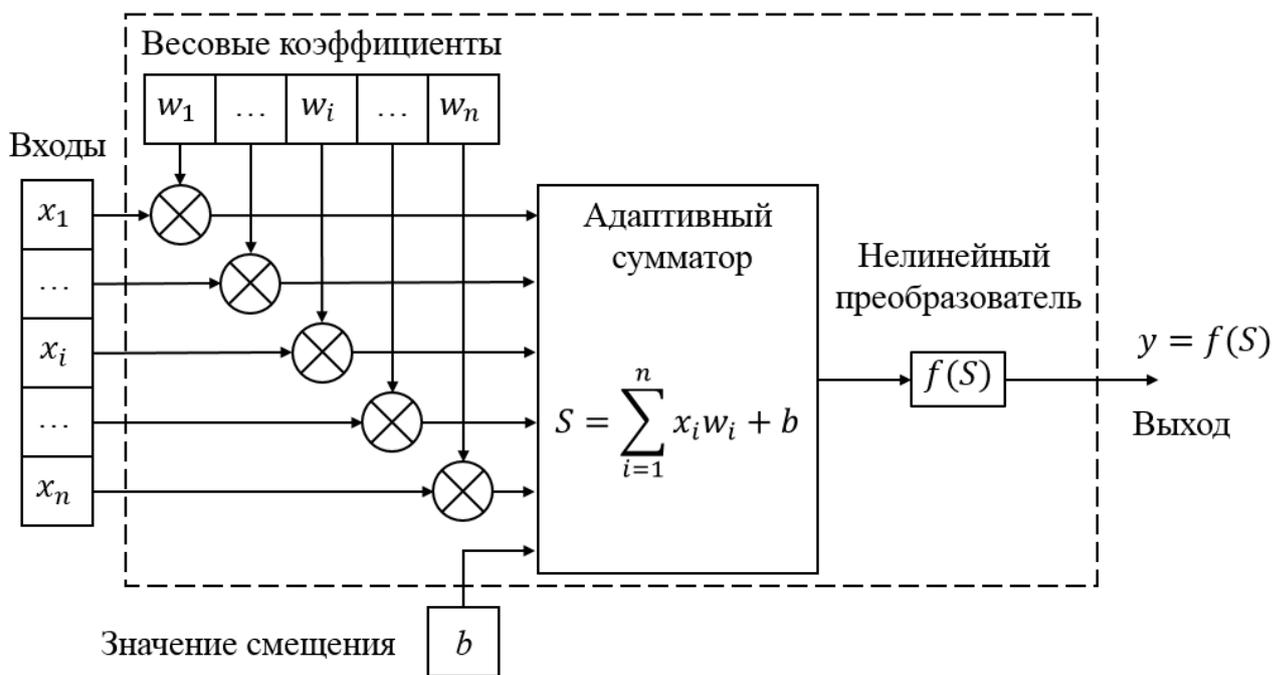


Рисунок 2.1 – Модель нейрона

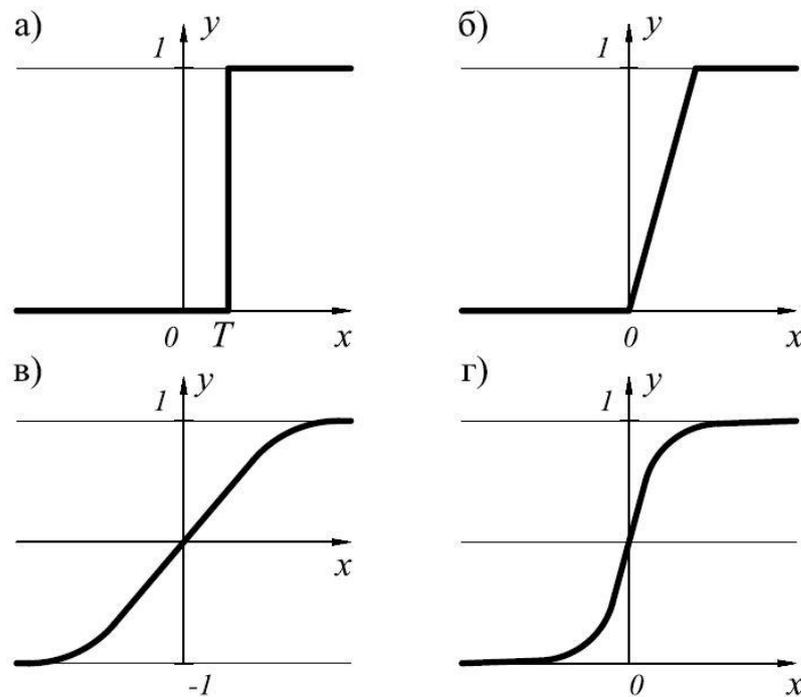
Базовыми элементами искусственного нейрона являются адаптивный сумматор ( $S$ ), в блоке которого происходит накопление общего входного сигнала, равного взвешенной сумме входов, поступающих по синаптическим связям от других нейронов или внешних входных сигналов и нелинейный преобразователь сигнала или функция активации нейрона ( $f$ ), имеющая вид сигмоидной функции,

которую называют нелинейной усилительной характеристикой искусственного нейрона; Выходной сигнал после преобразования выражается в виде

$$y = f(S) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\sum_{i=1}^p w_i x_i\right)},$$

где  $S$  – результат суммирования,  $w_i$  – весовой коэффициент связи, принимающий значения в диапазоне от  $-1$  до  $1$ ,  $x_i$  – входной сигнал,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – число входов;  $y$  – выходной сигнал нейрона;  $f$  – функция активации нейрона (рисунок 2.2) [54 – 56].

Функция активации выбирается исходя из характера решаемой задачи. Примеры функций приведены на рисунке 2.2, общим для них всех является то, что входной параметр может принимать любые значения, а значения выходного принадлежит ограниченному диапазону. Для кусочно–линейной функции единичного скачка выходом является минимально или максимально допустимое значение. Определяется это по достижению входным значением порогового. Основным недостатком применения данной функции активации является малая гибкость при обучении сети.



а) функция единичного скачка; б) гистерезис; в) гиперболический тангенс; г) сигмоида

Рисунок 2.2 – Виды функций активации нейрона [54-56]

Выходной импульс не будет формироваться если значение не будет доходить до порога, что приводит к тому, что нейрон не будет активирован, и на следующих слоях формируются малые значения. Кусочно–линейная функция гистерезиса имеет диапазон монотонного роста. Использование функции обеспечивает невысокую сложность при вычислениях. Перечисленные функции активации используются очень редко. Наиболее распространенными являются функции активации гиперболического тангенса и сигмоида, приведенные соответственно (Рисунок 2.2 в, г). Сигмоида непрерывна, монотонно возрастает и дифференцируема. Гиперболический тангенс симметричен относительно начала координат, принимает любые значения и имеет S–образную форму.

Совокупность искусственных нейронов, которые связаны между собой, образуют нейронную сеть. Состоит из нескольких слоев, которые делятся на обязательно входной и выходной и любое количество скрытых слоев, в каждом из которых обрабатывается информация. Структура нейронной сети проиллюстрирована на рисунке 2.3.

Количество нейронов во входном слое выбирается исходя из размерности вектора признаков, которые описывают объект. Соответственно количество выходов представляет собой размерность вектора ответа. Количество скрытых слоев и нейронов в них определяется экспериментальным путем, который достигает оптимальной работы сети.

В настоящее время распространены множество моделей искусственных нейронных сетей. Ниже приведены некоторые из них.

Персептрон. Модель сети с прямолинейной архитектурой, состоящей из входного, одного или нескольких промежуточных и выходного слоев нейронов. Работа сети основана на том, что выходной вектор сети, которая обучается методом обратного распространения ошибки, сравнивается с правильным. Полученная разность значений и является величиной ошибки, которая распространяется обратно по сети. Величина уменьшается за счет корректировки значений весов, в этом и заключается обучение сети.

Радиально базисные функции. Менее точные, но простые по структуре и

обучению сети, состоящие из трех слоев с различными функциями. Второй слой представляет собой слой радиальных элементов, размерность которого намного больше, чем у входного слоя. Требуют большого количества данных.

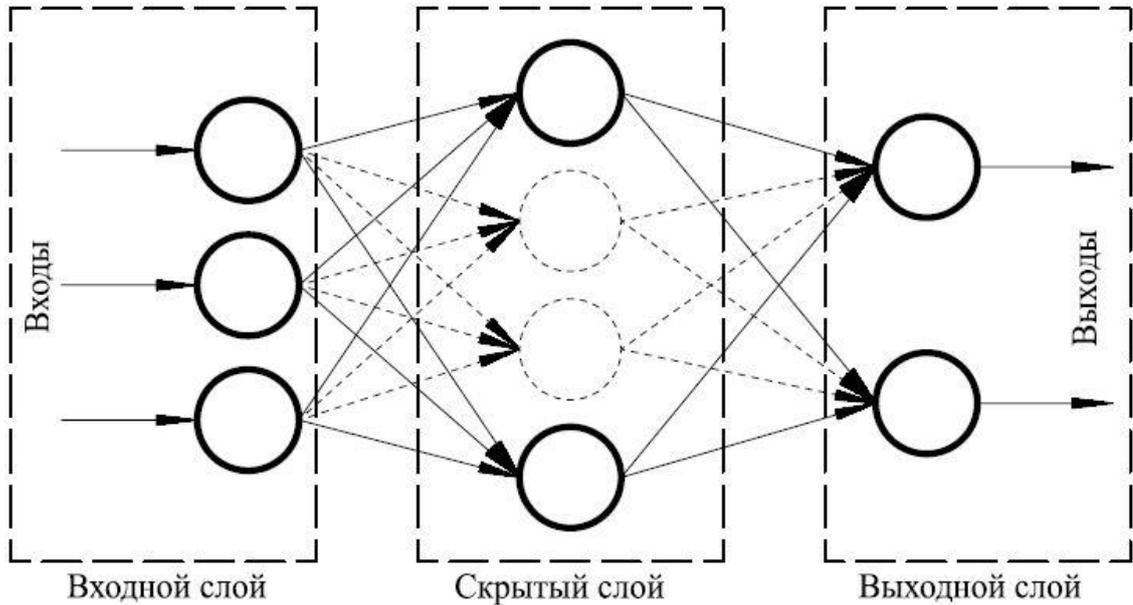


Рисунок 2.3 – Структура нейронной сети

Нейронная сеть Хопфилда. Сеть с обратной связью, также называемая рекуррентной сетью. Состоит из одного слоя нейронов, но при этом является полносвязной за счет того, что выход каждого нейрона связан с входами остальных нейронов. Такая архитектура создает симметричную матрицу связей. Произвольный сигнал, поданный на вход, проверяется на соответствие с уже известным образцом, поэтому сеть можно определять как сеть с ассоциативной памятью. Благодаря этому свойству, сеть Хопфилда в состоянии восстанавливать данные с шумом.

Сети Кохонена. Иначе их еще называют картами самоорганизации. Обучается сеть самостоятельно без учителя, так они построены на конкурентном обучении. В узлах двумерного пространства находятся нейроны, причем нейроны выходного слоя конкурируют между собой за право стать активным. В узлах происходит адаптация под входные сигналы и местоположение нейронов в пространстве является указателем статистических признаков входных векторов. Зачастую за счет

того, что сети Кохонена могут сжимать большие данные, их часто используют при распознавании изображений.

Условно сети можно разделить на следующие типы:

– однослойные – в таких сетях информация со входного слоя идет сразу на выходные нейроны, в которых и происходит обработка информации;

– многослойные – сети со скрытыми слоями, причем однозначного решения об используемом количестве промежуточных слоев и нейронов не существует, все необходимые параметры подбираются эмпирически;

– с прямыми связями – реализация связей между нейронами в одном направлении: от одного слоя к следующему, данные сети не имеют память, их выход обусловлен всегда текущими значениями входа и весами;

– с обратными связями – в отличие от предыдущих сетей присутствует связь между нейронами в пределах одного слоя, сигналы идут от выхода к входу.

Каждый нейрон осуществляет взвешенное суммирование входного сигнала. Результат такого суммирования образует промежуточный выходной сигнал, который преобразуется нелинейным преобразователем, называемым активационной функцией, в выходной сигнал нейрона. По аналогии с электронными системами активационную функцию можно считать нелинейной усилительной характеристикой искусственного нейрона, имеющей большой коэффициент усиления для слабых сигналов и падающее усиление для больших возбуждений.

У нейронной сети выделена группа входных связей, по которым она получает информацию из внешней среды, и группа выходных связей, с которых снимаются выдаваемые сетью сигналы. Нейронная сеть обучается решению задачи на основании некоторой обучающей выборки, состоящей из набора пар «вход–требуемый выход», и далее способна решать примеры, не входящие в обучающую выборку.

Отличительной особенностью архитектуры таких вычислительных устройств является упрощение процессорного элемента однородной структуры до уровня нейрона, у которой резко усложнены связи между элементами и

программирование перенесено на изменение весовых коэффициентов связей между вычислительными элементами.

Их особенностью является способность обучаться решению задач, для которых не существует формализованных, быстрых или работающих с приемлемой точностью алгоритмов решения. Применение в составе автоматизированной системы проектирования технологической операции оптимизационных алгоритмов с варьируемыми критериями оптимальности, построенных с помощью ИНС, позволит повысить эффективность принятия проектных технологических решений, минимизировать продолжительность ТПП, а также обеспечит возможность приспособлять базовый вариант системы к производственным и хозяйственным условиям конкретного предприятия. Однако, отсутствие баз данных, содержащих информацию о входных и выходных характеристиках процесса модификации реактопластичных полимеров, осложняет задачу моделирования с помощью нейросетевых моделей процессов обработки при ТПП.

Для построения нейросетевых моделей, описывающих процессы модификации реактопластичных полимеров, необходимо проводить экспериментальные исследования влияния технологических параметров на качественные показатели связующего для производства изделий из композиционных материалов. Полученные в ходе экспериментов данные можно будет использовать для составления таблиц обучающей и тестирующей выборок, необходимых при построении нейросетевых моделей процесса модификации реактопластичных полимеров.

Таким образом, при разработке автоматизированной системы идентификации целевых свойств и технологических параметров производства наномодифицированных композиций, целесообразным становится применения концепции автоматизированной системы, основанной на искусственной нейронной сети. Применение нейросетевого моделирования, в данном случае, обеспечивает решение задачи идентификации нетривиальных зависимостей между технологическими параметрами производственных процессов и целевыми свойствами готовой продукции.

## **2.2. Основные задачи, решение которых необходимо для реализации концепции метода обеспечения автоматизации производства**

Для реализации концепции автоматизированной системы идентификации целевых свойств и технологических параметров производства, основанной на искусственной нейронной сети необходимо определить закономерности изменения характеристик матричных материалов при использовании наномодификаторов. Анализ путей достижения целевых характеристик является определяющим при формировании теоретических основ, дающих обоснование процессам теплопереноса в реактопластичном связующем с различным содержанием углеродных наноразмерных модификаторов, необходимых для расчетного определения теплопроводности и иных свойств материала. Разработка моделей теплопереноса необходима для выявления закономерности изменения целевых свойств изделия при изменении условий модификации. Закономерности изменения свойств изделия, в свою очередь, необходимы для оценки адекватности предлагаемых решений. Таким образом, разработка моделей теплопереноса в реактопластичном связующем с различным содержанием углеродных наноразмерных модификаторов для расчетного определения теплопроводности и иных свойств материала является одной из задач, решение которой необходимо для реализации автоматизированной системы идентификации целевых свойств конечной продукции и технологических параметров производства.

Использование средств и методов идентификации необходимых параметров технологических процессов и свойств конечной продукции, выполняемых в условиях применения нейросетевого моделирования, требует решения задачи многопараметрической нелинейной оптимизации, первым этапом которой является реализация возможности обучения сети. Процесс обучения нейронной сети представляет настройку параметров нейронной сети при помощи моделирования среды, в которую она встроена (Рисунок 2.4). В настоящее время можно выделить три направления в обучении нейронных сетей: с учителем, без учителя и

смешанная [5]. В случае обучения с учителем, сети предоставляется выборка обучающих примеров, каждый пример подается на вход, а полученный выход сравнивается с имеющимся верным ответом. Далее вычисляется ошибка и перенастройка параметров нейронной сети в зависимости от выбранного алгоритма. В случае обучения без учителя на каждый пример обучающей выборке не нужно знания требуемого значения. В этом случае происходит распределение образцов по кластерам в соответствии с внутренней структурой данных или степенью корреляции между образцами. В третьем случае часть нейронов настраивается при помощи обучения с учителем, а вторая часть – на основе самообучения.

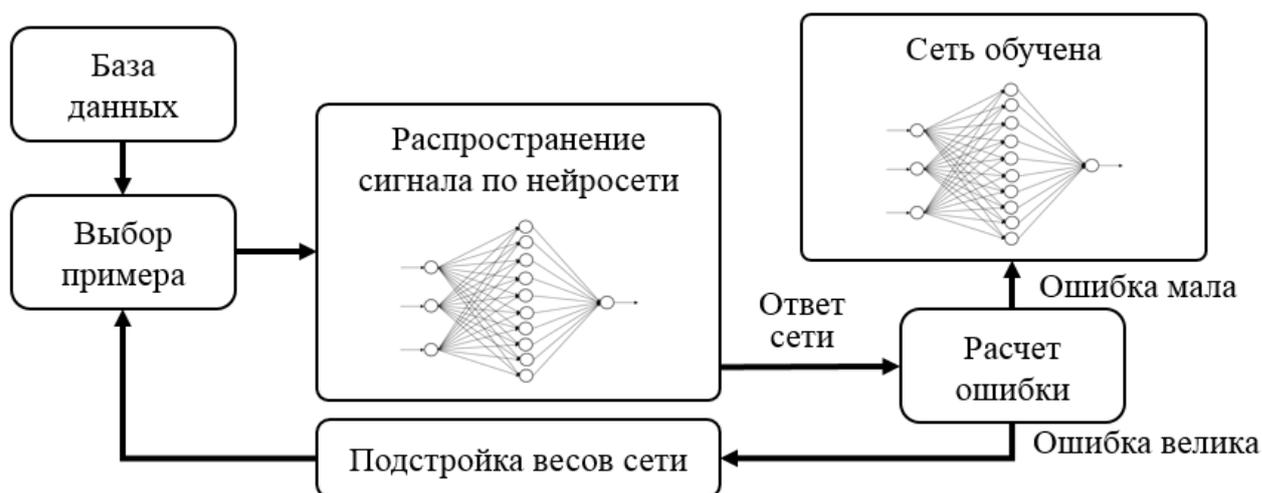


Рисунок 2.4 – Структура процесса обучения нейронной сети

Процесс обучения нейронной сети можно представить в виде многоэкстремальной невыпуклой (т.к. функция может иметь произвольный вид обучения) задачи многомерной оптимизации, с наличием большой размерности, для решения которой применимы итерационные алгоритмы локальной оптимизации с вычислением частных производных первого и второго порядка, стохастические алгоритмы и алгоритмы глобальной оптимизации, решаемые с помощью последовательного поиска значений переменных, определяющих контрольную функцию.

В математическом представлении, процесс обучения нейронной сети можно описать в следующем виде. Реализуя функцию  $y = f(x)$ , нейросеть формирует выходной сигнал  $y$ . Если архитектура сети однозначно определена, вид функции  $f$  определяется значениями смещения сети и синаптических весов. Если допустить, что функция  $y = R(x)$ , заданная параметрами  $(x^1, y^1), (x^2, y^2), \dots, (x^n, y^n)$ , являющимися наборами пар данных входа и выхода, является решением для  $y^i = R(x^i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , то справедливо положение о том, что обучение сети заключается в формировании функции  $R$ , соответствующей функции  $f$  в поле допуска функции ошибки  $E$ , которая может иметь произвольный вид. Для случая, когда известна функция ошибки  $E$ , а формулировка задачи предусматривает наличие требуемого множества обучающих пар  $(x^i, y^i)$ , задача обучения нейронной сети является задачей многомерной оптимизации. При этом справедливой является постановка задачи обучения нейронной сети в задачах прогнозирования как задачи аппроксимации, для решения которой необходимо построить нейронную сеть, являющуюся аппроксимирующей функций. Назначение нейронной сети, в этом случае, заключается в приеме и сопоставлении контрольных данных и данных, участвовавших в обучении, с заданной точностью. Следует отметить, что сопоставление данных, участвовавших в обучении является задачей приближенной интерполяции. В задачах аппроксимации каждому обучающему входному вектору соответствует обучающий выходной вектор. Иными словами, используется обучение с учителем.

Формирование контрольных выборок, необходимых для обучения нейронной сети требует выполнения работ по изготовлению экспериментальных образцов материала либо образцов изделий, позволяющих определить требуемые целевые характеристики и осуществить контроль варьируемых технологических параметров в процессе изготовления. Следовательно, неотъемлемым требованием к реализации предлагаемого метода обеспечения автоматизации производства, является наличие методов идентификации целевых свойств и изготовления

экспериментальных образцов материалов (либо элементов конструкций) с осуществлением вариации и контроля технологических параметров в процессе изготовления. Массив результатов, определяющих взаимосвязь технологических параметров изготовления и целевых свойств, определенных в результате исследований будет являться обучающей выборкой, необходимой для формирования и последующей апробации средств и методов нейросетевого моделирования.

Таким образом, основные задачи, решение которых необходимо для реализации концепции метода обеспечения автоматизации производства, можно сформулировать в следующем виде:

1) разработка и обоснование концепции метода построения автоматизированной системы управления технологическим процессом производства модифицированных КМ с позиции достижения целевых свойств конечного изделия;

2) анализ путей повышения целевых характеристик матричных материалов, посредством использования наномодификаторов. Разработка моделей теплопереноса в реактопластичном связующем с различным содержанием углеродных наноразмерных модификаторов для расчетного определения теплопроводности;

3) апробация метода модификации реактопластичных полимеров и последующее изготовление образцов связующего с различным содержанием углеродных наноразмерных модификаторов. Формирование базы данных экспериментальных исследований теплопроводности образцов реактопластичных полимеров, модифицированных углеродными наноразмерными структурами с вариацией технологических параметров изготовления;

4) разработка архитектуры и принципов построения нейросетевых моделей идентификации теплофизических характеристик и технологических параметров переработки реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными структурами.

5) апробация нейросетевых моделей с последующей оценкой

адекватности предложенных решений, путем сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований.

### **2.3. Базовые принципы и основные положения реализации концепции метода обеспечения автоматизации производства**

При формировании базовых принципов реализации концепции автоматизированной системы идентификации целевых свойств и технологических параметров производства, в качестве основополагающих, были приняты сформулированные профессором, академиком Академии наук СССР В. М. Глушковым научно-методические положения и практические рекомендации по проектированию автоматизированных систем, в соответствии с которыми основополагающими являются принципы: системности, развития, совместимости, стандартизации и унификации, эффективности [71, 72]. Исходя из этого, можно сформулировать следующие базовые принципы реализации концепции автоматизированной системы идентификации целевых свойств и технологических параметров производства композитных модифицированных конструкций [72]:

1) при декомпозиции должны быть установлены такие связи между структурными элементами системы, которые обеспечивают цельность автоматизированной системы и ее взаимодействие с другими системами;

2) исходя из перспектив развития объекта автоматизации, автоматизированная система должна создаваться с учетом возможности пополнения и обновления ее функций и состава без нарушения процесса функционирования;

3) при создании системы должны быть реализованы информационные интерфейсы, благодаря которым она сможет взаимодействовать с другими системами;

4) при создании системы должны быть рационально применены типовые,

унифицированные и стандартизированные элементы, проектные решения, пакеты прикладных программ, комплексы, компоненты.

5) работа системы должна обеспечивать рациональное соотношение между затратами на создание и целевыми эффектами, включая конечные результаты, получаемые в результате автоматизации.

В составе жизненного цикла композитных конструкций наиболее широко изучены и формализованы методы проектирования, оптимизации, переработки и «традиционные» методы производства. Вопросы технологической подготовки в контексте производства композитных конструкций ограничиваются выбором оптимальных параметров формирования гетерофазной структуры на макроуровне. Анализ и попытка формализации процессов, протекающих в микро- и наноразмерных средах с целью выявить общие положения, являющиеся основой реализации различных методов и позволяющие строить новые методы, дают возможность установить не явно сформированные, косвенно используемые общие закономерности и подходы. Они состоят в том, что каждая задача обособливается в своем решении. Локализация задач происходит путем идентификации характеристик исходных и целевых свойств компонентов и конечной композиции.

Тем не менее, предлагаемые методы не могут являться универсальными для задач, сочетающих уникальный набор комплексных факторов взаимодействия различных систем, обладающих несвязанной природой и формами. К данному классу однозначно может быть отнесена задача автоматизации производственного процесса наноструктурной модификации композитной конструкции.

Концепция автоматизированной системы прогнозирования целевых свойств и управления производственными процессами композитных конструкций и степень ее новизны определяются обуславливающими ее базовыми обобщающими положениями.

**Положение 1.** Появление любого изделия мотивировано. Из совокупности причин, приводящих к формированию изделия доминирующей и обобщающей является потребность в удовлетворении требований конечного пользователя (потребителя).

Обеспечение соответствия изделия требованиям потребителя можно сформулировать как достижение соответствия целевых свойств ( $Z$  – от нем. *zielmerkmal*) заданным функциональным характеристикам ( $F$  – от нем. *funktionsmerkmal*). Формализовано, состояние изделия удовлетворяющего требованиям потребителя можно сформулировать в виде

$$\sum_{i=1}^n \langle Z_i \rangle \geq \sum_{i=1}^n \langle F_i \rangle$$

Целевые свойства можно определить, как совокупность целевых характеристик ( $z$ )

$$Z_i = \langle z_{i,1}, z_{i,2}, \dots, z_{i,m} \rangle.$$

В общем виде, это формализует состояние изделия, обладающего целевым свойством  $Z$  и, как следствие, совокупностью целевых характеристик  $z_n$ .

Исходное состояние ( $Z^0$ ), в котором находится изделие до достижения целевого свойства можно формализовать в виде

$$Z_i^0 = \langle z_{i,1}^0, z_{i,2}^0, \dots, z_{i,m}^0 \rangle.$$

При этом, исходное состояние должно быть представлено совокупностью целевых характеристик  $z_i^0$ , аналогичных целевым характеристикам  $z_i$ .

**Положение 2.** При переходе изделия из исходного состояния в состояние, в котором изделие обладает целевым свойством, происходит комплекс качественных изменений. Эти действия можно охарактеризовать как процесс достижения целевого свойства изделия. Формализовать суть процесса можно в виде выражения

$$Z_i^0 \rightarrow Z_i.$$

Процесс определяет пути и направление, а также содержание действий перехода изделия из одного состояния в другое.

**Положение 3.** Следующим шагом в формировании концепции является выявление возможности и реализация процесса достижения целевого свойства (Рисунок 2.5).

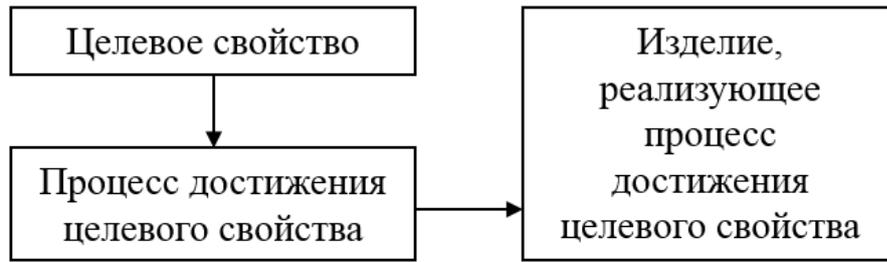


Рисунок 2.5 – Последовательность, обуславливающая возникновение изделия с позиции достижения целевого свойства

Непосредственное воздействие на изделие при достижении целевого свойства характеризуется некоторым количеством функций ( $A_i$ ), которые определяются количеством реализуемых действий ( $a_i$ ), необходимых для достижения целевых характеристик

$$A_i = \langle a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,m} \rangle.$$

Целевое свойство формируется и остается актуальным в определенных временных границах. Следовательно, процесс достижения целевого свойства будет эффективным, если произойдет в определенных временных рамках ( $T_i$ ), которые определяются временными интервалами, необходимыми для достижения целевых характеристик

$$T_i = \langle t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,m} \rangle.$$

Не менее важным показателем, определяющим эффективность достижения изделием целевого свойства является интегральный показатель качества ( $Q_i$ ), который определяется показателями качества достижения целевых характеристик

$$Q_i = \langle q_{i,1}, q_{i,2}, \dots, q_{i,m} \rangle.$$

Изделие, наделенное необходимым целевым свойством, может быть востребовано только в том случае, когда затраты на его достижение не будут превышать пороговые значения. Пороговые значения могут быть определены путем анализа экономической эффективности реализации разрабатываемого

изделия исходя из области его конечного применения и конъюнктуры рынка.

Стоимость ресурса, затраченного на достижение целевого свойства может быть определена как совокупная стоимость реализуемых действий, необходимых для достижения целевых характеристик

$$S_i = \langle s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,m} \rangle.$$

Изложенное позволяет сформулировать следующие основные тезисы положения. Достижение целевого свойства обеспечивается только в результате динамически протекающего процесса. Процесс достижения целевого свойства, характеризующийся показателем ( $W$ ) может быть определен как совокупность равных по значимости характеристик

$$W_i = \langle A_i, T_i, Q_i, S_i \rangle.$$

В результате достижения целевого свойства изделия должны быть обеспечены все приведенные показатели.

**Положение 4.** Из характеристик, определяющих достижение целевого свойства, функции  $A_i$  являются процессообразующими. Это связано с тем, что воздействие, возникающее при выполнении действий  $a_i$ , приводит к достижению целевого свойства. От адекватности выбора функций воздействия во многом зависит эффективность достижения целевых свойств и возможность обеспечения требуемых характеристик. В связи с этим, принципиально важным является выявление закономерностей и свойств функций воздействия.

Независимо от адекватности определения функций, требуются дополнительные показатели, необходимые для достижения целевых свойств. Действие функций направлено на объект воздействия. Под объектом, в данном случае, понимается совокупность свойств, объединённая определенным образом в рамках выбранных ограничений. Ограничения, в свою очередь, могут формировать систему ограничений. Для реализации процесса должны быть сформированы средства, обладающие способностью воздействия на свойства объекта.

Алгоритм воздействия, в свою очередь, определен функцией  $A_i$ . Одна и та же

функция может быть реализована различными средствами для разных объектов. Обеспечение средствами, обладающими способностью воздействовать на объект по предписанному функцией алгоритму – основное условие реализации процесса достижения целевого свойства изделия.

**Положение 5.** Принципиальным шагом в формировании концепции существования изделия является формулирование положения о выявлении средств, соответствующих условиям реализации процесса достижения целевых свойств.

Процесс достижения целевого свойства характеризуется некоторым набором функций  $A_i$ . Соответственно, должна существовать некая совокупность элементов  $R_i$ , позволяющая реализовать  $A_i$ . При этом, существует соответствие между каждым элементом  $r_i$  и реализуемым им действием  $a_i$ . Таким образом, средство реализации процесса достижения целевого свойства можно представить как

$$R_i = \langle r_{i,1}, r_{i,2}, \dots, r_{i,m} \rangle.$$

Объект, удовлетворяющий полному набору характеристик, формирующих показатель достижения целевого свойства  $W$  и способный обеспечить реализацию достижения целевого свойства – изделие, назначенное для достижения целевого свойства (Рисунок 2.6)

На основании изложенного можно сформулировать следующие положения:

- 1) Реализовать процесс достижения целевого свойств возможно только при помощи изделия.
- 2) Изделие, обеспечивающее реализацию процесса должно обладать характеристиками, соответствующим  $W$ .

Сформулированные положения подразумевают многообразие вариантов, как при определении возможных процессов, позволяющих обеспечить достижение целевых свойств, так и при определении возможных изделий.

Важно отметить, что предложенный подход позволяет установить причины, а, следовательно, на начальном этапе обеспечить возможность создания большего количества возможных изделий и соответствующих им процессов, тем самым повышая вероятность нахождения адекватного и эффективного решения.



Рисунок 2.6 – Процесс формирования изделия с позиции объекта, удовлетворяющего комплексному набору характеристик

#### 2.4. Взаимосвязь ключевых элементов, определяющих концепцию метода обеспечения автоматизации производства

Традиционные методы описания процесса достижения изделием целевого свойства используют различные системы ограничений. Они довольно разнообразны и возникали по мере изучения материалов, их свойств и факторов, определяющих условия их переработки. Для определения основных факторов, определяющих реализацию концепцию автоматизированной системы, рассмотрим интегральную систему требований к изделию, предназначенному для достижения целевого свойства, с позиции основных положений функционирования автоматизированной системы. В интегральном виде можно установить взаимосвязь характеристик, определяющих процесс достижения целевого свойства  $W_i$  (Рисунок 2.7).

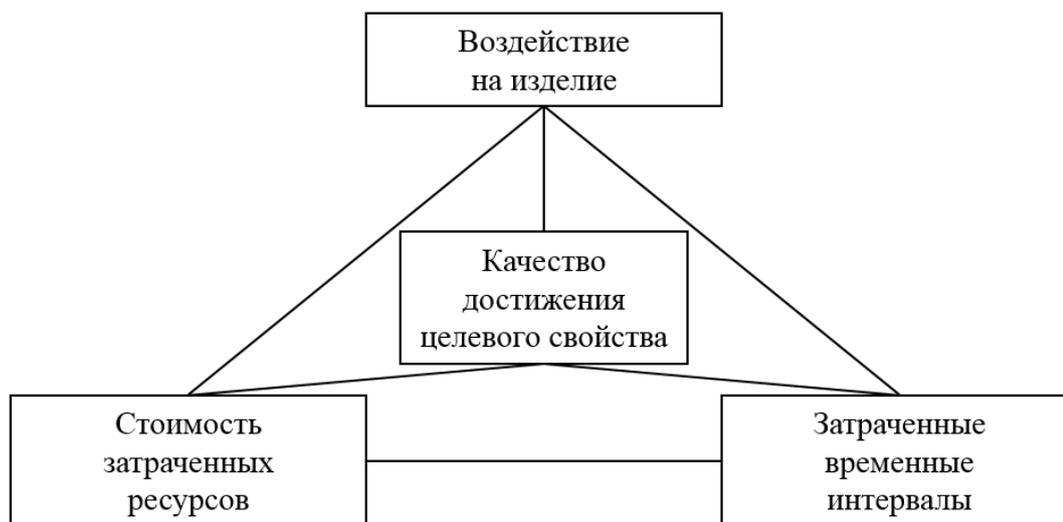
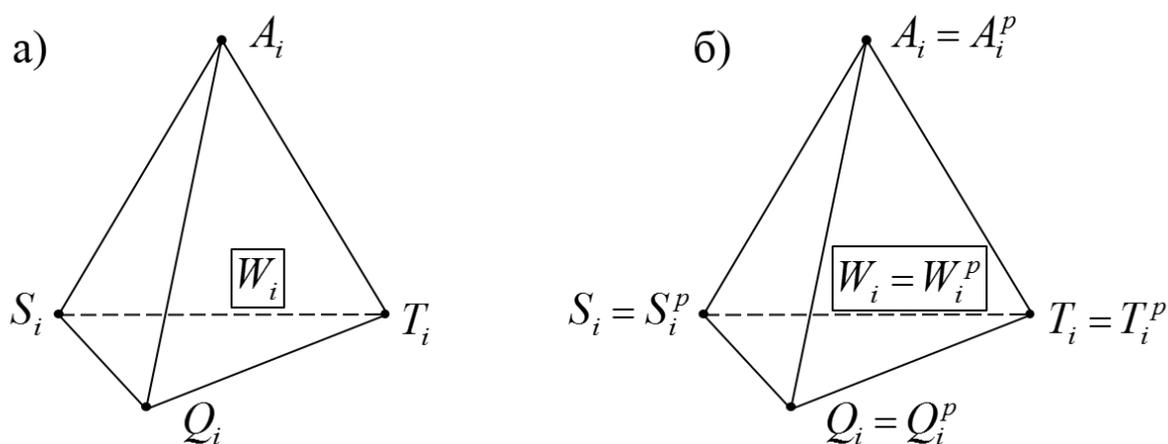


Рисунок 2.7 – Взаимосвязь характеристик, определяющих процесс достижения целевого свойства

Выявленные связи обязательны и отображаются при любом комплексном описании процесса достижения целевого свойства изделия. Поскольку процесс удовлетворения потребности имеет тот же набор равнозначных характеристик, геометрическая интерпретация взаимосвязи, определяющая процесс достижения целевого свойства  $W_i$  может быть представлена в виде пирамиды (Рисунок 2.8, а).



а) – процесс достижения целевого свойства; б) – условие адекватности изделия процессу достижения целевого свойства

Рисунок 2.8 – Геометрическая модель взаимосвязи характеристик целевого свойства

Следовательно, условие адекватности изделия процессу достижения целевого свойства будет соответствовать случаю, когда геометрическая модель

взаимосвязи характеристик изделия совпадает с пирамидой заданных функциональных характеристиках (рисунок 2.8, б). Иными словами

$$W_i = W_i^p.$$

Отличие между изделием соответствующим и несоответствующим процессу достижения целевого свойства заключается в несоответствии отдельных характеристик (либо комплекса характеристик).

Изделие, обладающее набором характеристик, отличных от формируемых целевым свойством, можно обозначить как заготовка. Технологические особенности производства композитных конструкций ограничивают употребление термина «заготовка» с полной смысловой нагрузкой, соответствующей изотропным изделиям, процесс переработки которых не требует сохранения целостности внутренней структуры компонент. В связи с этим, смысловое содержание обозначения «заготовка» ограничено исключительно критериальным соответствием характеристик изделия целевым.

Значения целевых характеристик заготовок могут принимать различные значения, отличные от требуемых. Рассматривая целевые характеристики, определенные установленными целевыми свойствами, в качестве размерной величины с установленным полем допуска  $\delta$  обозначим критерий, определяющий положение характеристики изделий как

$$\Delta = z_i - (z_i^F + \delta).$$

В этом случае, становится возможным формализовать случаи оценки характеристик изделия в следующем виде (Рисунок 2.9). Характерными положениями характеристик изделия будут являться случаи нулевого (в пределах интервала  $2\delta$ ), незначительного верхнего и нижнего ( $\Delta \rightarrow 0$ ) нижнего, а также значительного верхнего и нижнего ( $\Delta \rightarrow \infty$ ) отклонений соответственно. Находясь за пределами поля допуска, значение целевой характеристики может быть фиксированным либо произвольным, принимая любое значение, ограниченное диапазоном.

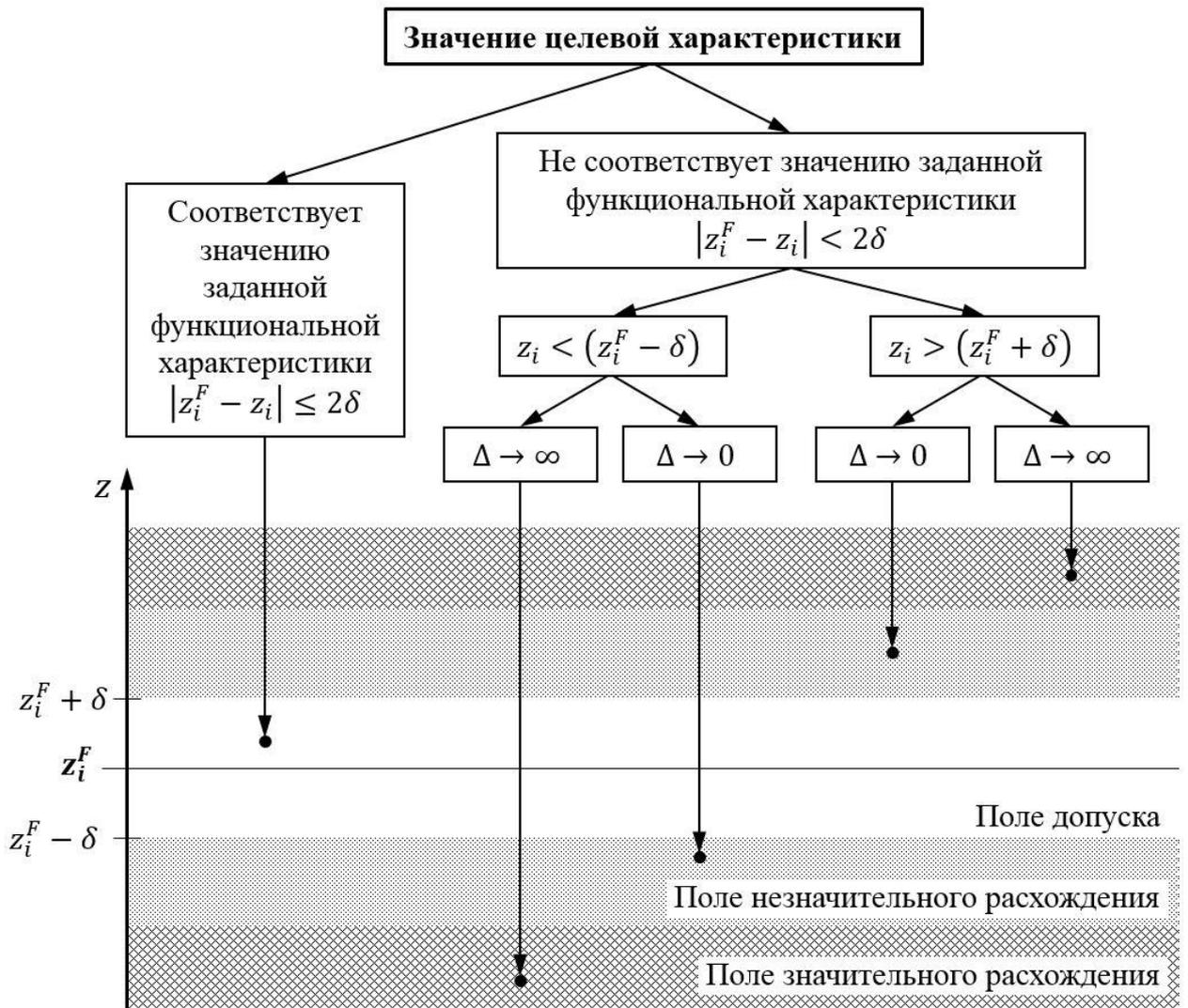


Рисунок 2.9 – Целевые характеристики с позиции размерной величины с установленным полем допуска

Для графической интерпретации целевых характеристик с позиции размерной величины с установленным полем допуска, условно введены поле значительных и незначительных расхождений между значениями характеристик. Нахождение целевой характеристики в зоне значительного расхождения говорит о принципиальном противоречии в реализации целевого свойства изделия назначенным технологическим процессом. Подобный результат требует пересмотра либо технологического решения о выборе рассматриваемого пути достижения целевого свойства, либо требований к функциональным (либо эксплуатационным) характеристикам изделия, заложенным на этапе проектирования. Для характеристик, находящихся в зоне незначительного

расхождения, исходя из характера отклонения, достижение требуемого значения осуществляется либо путем снижения, либо путем увеличения значения характеристики.

Таким образом, первостепенной задачей идентификации технологических параметров переработки изделия является исследование возможности обеспечения перемещения в поле допуска требуемого значения целевой характеристики из выявленных первоначальных положений.

**Принцип реализации метода** обеспечения автоматизации процесса подготовки производства модифицированных композиционных материалов заключается в идентификации технологических параметров переработки, обеспечивающих формирование целевых характеристик изделия, которые соответствуют характеристикам заданных целевых свойств в пределах установленных полей допуска.

Реализация метода опирается на систему идентификации влияния целевых свойств на технологические параметры переработки (Рисунок 2.10). Ключевыми элементами системы являются технологические параметры переработки, как объект поиска, а также целевые свойства изделия и свойства исходных компонентов как вводные данные.

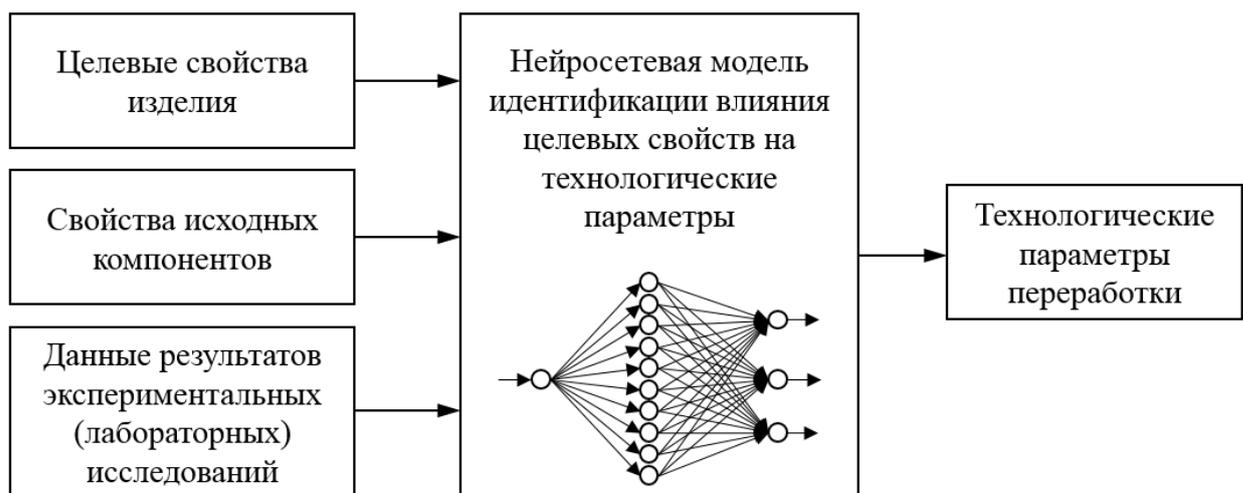


Рисунок 2.10 – Структура взаимосвязи ключевых элементов системы идентификации влияния целевых свойств на технологические параметры переработки

Определяющим фактором повышения эффективности функционирования технологического процесса является наличие оптимальной по структуре системы управления, адекватно отображающей протекающие в системе процессы [1]. Использование методов нейросетевого моделирования для построения системы идентификации влияния целевых свойств на технологические параметры, требует формирования базы данных результатов экспериментальных исследований. Наличие базы данных является обязательным условием обеспечения адекватного отображения процессов формирования свойств изделия.

Предлагаемые подходы могут быть реализованы в структуре автоматизированной системы управления технологической подготовки производства (АСТПП), представленной на рисунке (Рисунок 2.11).

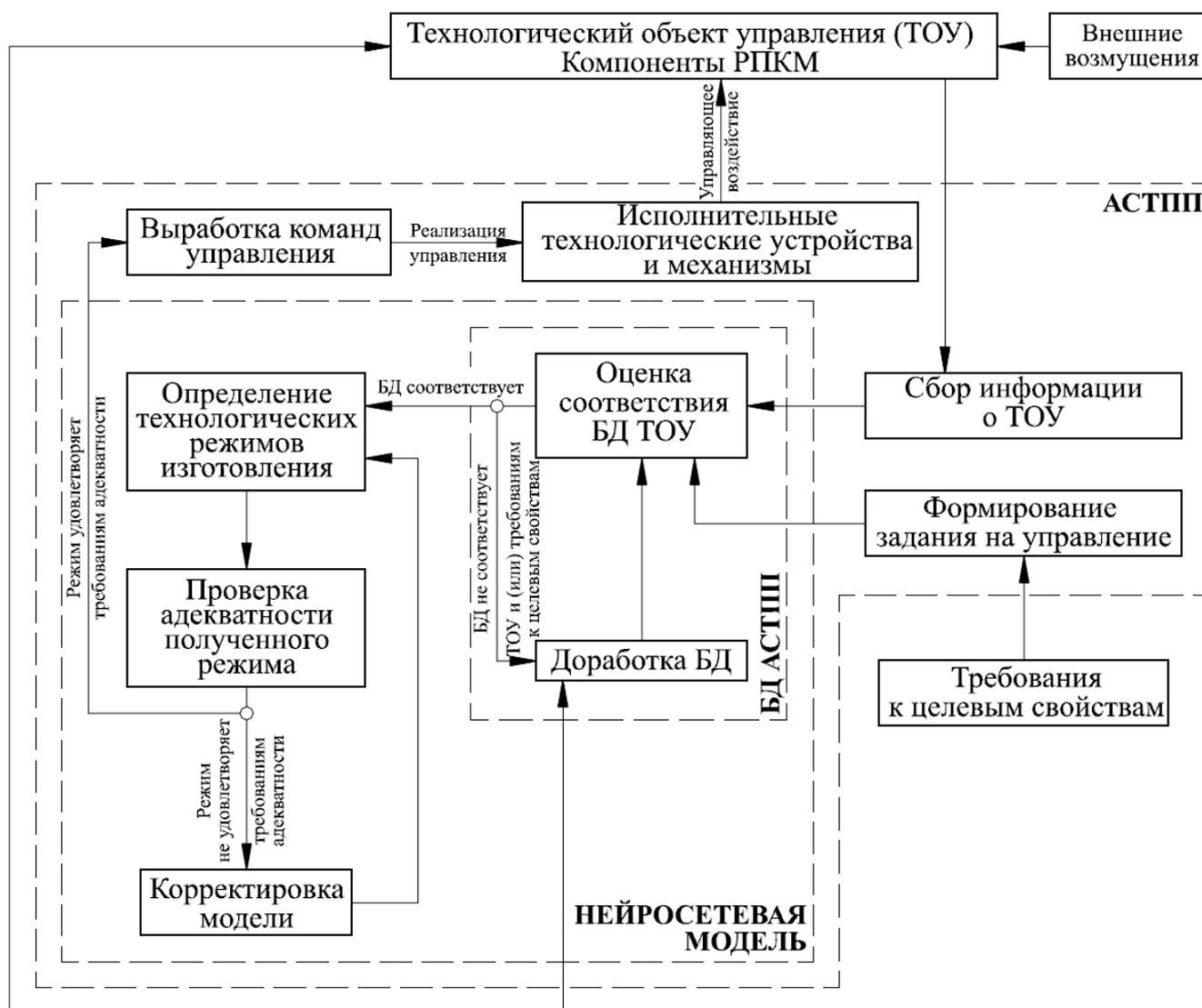


Рисунок 2.11 – Структура АСТПП изделий из РПКМ

## 2.5. Выводы и заключения

В результате выполненной работы достигнуты следующие основные результаты:

- 1) Предложена концепция и обоснован подход к реализации метода обеспечения автоматизации производства модифицированных композитных конструкций за счет применения методов нейросетевого моделирования;
- 2) Сформированы и обоснованы основные задачи, решение которых необходимо для реализации предлагаемой концепции метода обеспечения автоматизации производства;
- 3) Сформулированы базовые принципы и основные положения реализации концепции разработанного метода;
- 4) Установлена взаимосвязь ключевых элементов, определяющих концепцию предлагаемого метода, сформированы основные принципы ее реализации;
- 5) Показано, что применение предлагаемого метода способно обеспечить решение задачи идентификации нетривиальных зависимостей между технологическими параметрами производственных процессов и целевыми свойствами готовой продукции.

В общем виде автоматизированная система представляет собой организационно-техническую систему, обеспечивающую выработку решений на основе автоматизации информационных процессов и реализует информационную технологию в виде определенной последовательности информационно связанных функций, задач или процедур, выполняемых в автоматизированном (интерактивном) или автоматическом режимах [72]. При разработке современных технологических, производственных, информационных и автоматизированных систем возникают проблемы, меньше связанные с рассмотрением свойств и законов функционирования элементов, а больше – с выбором наилучшей структуры, оптимальной организации взаимодействия элементов системы, определения

оптимальных режимов функционирования, учетом влияния внешней среды и т.д. [1]. Дальнейшая апробация и оценка адекватности предлагаемого метода требует решения прикладной задачи обеспечения взаимосвязи технологических параметров переработки и целевых свойств модифицированного материала. Задача идентификации теплопроводности анизотропных материалов по технологическим параметрам изготовления является характерной и показательной для большинства целевых свойств изделий. Это связано с тем, что целевое свойство теплопроводности зависит от совокупности технологических параметров производства, однако связь не может быть описана универсальными аналитическими методами с должной степенью точности.

### Глава 3. РАЗРАБОТКА ОБЩЕСИСТЕМНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И МЕТОДОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

#### 3.1. Постановка задачи идентификации теплофизических характеристик модифицированного композиционного материала

Для постановки задачи идентификации теплофизических характеристик модифицированного композиционного материала, рассмотрим теплопроводность с точки зрения процесса переноса тепловой энергии, обусловленного движением структурных элементов тела под воздействием внешней температуры. Возникновение градиента температур в элементарной ячейке будет способствовать теплопереносу от более нагретой части ячейки к менее нагретой. Принимая, в качестве допущения модифицированный композиционный материал как непрозрачную твердую среду, установим теплопроводность как единственный способ теплопереноса. В этом случае процесс теплопереноса определяется температурным полем – процессом пространственно-временного распределения температуры в теле. В общем случае температурное поле является нестационарным и может быть определено как

$$t = f(x, y, z, \tau),$$

где  $x, y, z$  – координаты точки с температурой  $t$ ,  $\tau$  – длительность процесса.

Для стационарного температурного поля, температура всех точек тела остается неизменной с течением времени, и может быть представлена как

$$t = f(x, y, z)$$

В общем виде, для условий стационарного теплового потока справедливо соотношение, установленное законом Фурье

$$Q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \cdot S,$$

где  $Q$  – тепловой поток,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $S$  – площадь поверхности теплообмена,  $grad(T)$  – градиент температурного поля, определяемый как векторная сумма составляющих по осям декартовых координат с помощью ортогональных единичных векторов, соответствующих осям координат, в виде

$$grad(T) = \vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z}.$$

Рассмотрим элементарную ячейку в виде кубического элемента с равной длиной ребер  $l$ , противоположные поверхности которого нагреты до температур  $T_1$  и  $T_2$  соответственно (Рисунок 3.1).

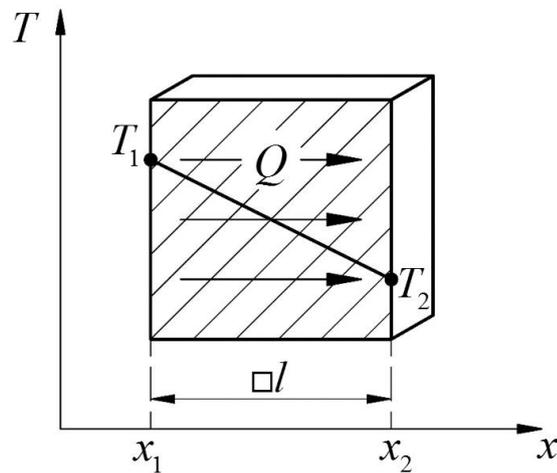


Рисунок 3.1 – Схема теплового нагружения элементарной ячейки

В этом случае, элементарную ячейку можно рассмотреть в виде плоского тела в условиях стационарного теплового состояния, для которого справедливо выражение закона Фурье в виде

$$Q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \cdot S(x). \quad (3.1)$$

Принимая  $dT = T_2 - T_1 = \Delta T$ ,  $dx = x_2 - x_1 = l$ , а  $S(x) = l^2$ , можно представить выражение (3.1) в виде

$$\lambda = \frac{q}{l \cdot \Delta T},$$

где  $q$  – суммарное тепловое излучение боковой стенки,  $l$  – длина ребра элементарной ячейки,  $\Delta T$  – разница начальных температур противоположных стенок.

Таким образом, задача идентификации теплофизических характеристик, а именно, теплопроводности элементарной ячейки, с размерами, определенными на этапе ее формирования, сводится к определению величины теплового потока при заданном градиенте температур.

В вопросе моделирования теплопроводности композиционных гетерофазных материалов величина теплопроводности определяется по идеологии принципа суперпозиции компонентов. Зная их структуру и пространственную ориентацию, становится возможным установить теплопроводность композиции.

### **3.2. Математическое моделирование теплофизических характеристик модифицированных композиционных материалов**

Для исследования влияния целевых свойств модифицированных композиционных материалов от количественных характеристик и пространственной ориентации модификатора, был использован структурный алгоритм процесса моделирования (Рисунок 3.2), состоящий из следующих основных этапов:

1) подготовка входных данных и условий нагружения, необходимых для процесса моделирования;

2) построение твердотельной модели элементарной ячейки модифицированного материала. При построении твердотельной модели используются сведения о геометрических характеристиках и пространственной ориентации модификатора;

3) конечно-элементное моделирование. При моделировании

осуществляется идентификация физических свойств геометрических элементов и формируются условия нагружения;

4) обработка и анализ результатов моделирования.

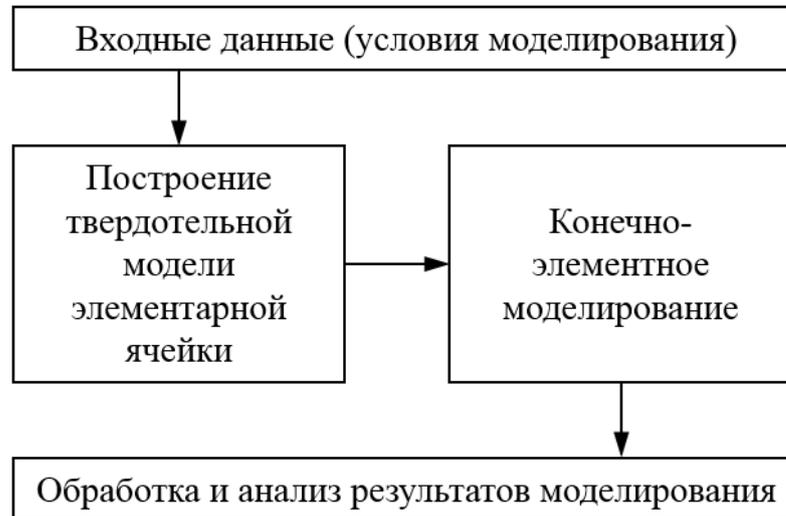


Рисунок 3.2 – Структурный алгоритм процесса моделирования

Входные данные, необходимые для формирования элементарных ячеек, представляют собой набор геометрических и физических характеристик компонента модифицированного композита. Для исследования теплофизических характеристик необходимы значения плотности, теплоемкости и теплопроводности рассматриваемых компонентов. Определение структурных параметров зависит от типа фазы рассматриваемого компонента. Для материала, рассматриваемого в качестве матрицы, отсутствует необходимость формирования четко выраженной геометрии, в связи с чем перечень параметров ограничивается заданием физических свойств. Для фазы включений необходимо задать, помимо физических параметров, массовое либо объемное содержание, геометрические параметры, ориентацию включений. Для отработки методов моделирования и оценки адекватности модели были использованы типовые данные о компонентах, приведённые в литературных источниках. Для оценки адекватности разработанных моделей путем сопоставления с результатами экспериментальных исследований были использованы свойства компонентов в соответствии с паспортными данными, предоставленными производителем.

Свойства компонентов, используемых для моделирования  
элементарной ячейки [12-14]

Компонент	Параметр	Единица измерения	Значение
Модификатор	Длина	нм	1000
	Диаметр	нм	13
	Плотность	кг/м <sup>3</sup>	130
	Теплопроводность	Вт/(м·К)	100
Связующее	Плотность	кг/м <sup>3</sup>	1200
	Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,23

Моделирование структуры композиционного материала, модифицированного наноразмерными структурами, в виде элементарных ячеек является упрощенным и основывается на ряде допущений.

Идеальную УНТ можно представить в виде гексагональной сетки углеродных атомов, свернутых в бесшовный цилиндр. С торцов цилиндр «запечатан» половинкой молекулы фуллерена. Таким образом, одним из допущений является то, что упрощенная модель нанотрубки представлена в виде цилиндра.

Процесс производства УНТ на сегодняшний день не гарантирует производство нанотрубок в виде фуллеренов из шестигранных сеток. Присутствуют дефектные пяти- и четырехгранные ячейки атомов углерода. Причем, оценить процент «дефектных» трубок довольно проблематично из-за трудоемкости и стоимости подобного рода оценки. Следующим допущением является то, что рассматриваемые в процессе моделирования трубки не отражают возможную витиеватость.

В процессе распределения УНТ в объеме связующего происходит свертывание части продиспергированных УНТ в агломераты. Это обусловлено тем, что для каждой конкретной концентрации нанотрубок необходимо подбирать

режимы введения, в зависимости от реологической среды, в которую они вводятся. При этом подбор режима введения должен включать в себя стадию отверждения связующего, так как образование агломератов возможно вплоть до завершения стадии гелеобразования. Оценить содержание агломератов в связующем и их влияние на характеристики нанокомпозита в рамках данной работы не представляется возможным. Таким образом, было принято допущение, подразумевающее идеальное распределение нанотрубок по всему объему связующего.

Для построения твердотельных моделей элементарных ячеек модифицированных композиционных материалов был использован программный пакет нелинейного многоуровневого моделирования композиционных материалов и конструкций Digimat [29], который позволяет сгенерировать элементарную ячейку в виде сплошной твердотельной среды с цилиндрическими включениями установленных размеров, ориентированными в соответствии с установленными параметрами структуры.

Технологические параметры переработки модифицированного композиционного материала определяют ориентацию и геометрические параметры включений. Построение конечно-элементной математической модели с возможностью вариации геометрических параметров и пространственной ориентации включений, позволит оценить пороговые возможности достижения целевых свойств модифицированной композиции. Результатом моделирования является теплопроводность элементарной ячейки и механизмы ее изменения, в зависимости от пространственной ориентации и геометрических параметров модификатора. Задача идентификации теплопроводности элементарной ячейки сводится к определению величины теплового потока при заданном градиенте температур. Решение поставленной задачи было осуществлено путем проведения расчетных исследований по идентификации теплового потока с применением системы конечно-элементного автоматизированного расчета и проектирования конструкций APM Multiphysics [30] и ANSYS [31].

Для проведения расчетных исследований, твердотельная геометрическая модель элементарной ячейки экспортировалась в среду программного пакета, где проводилось моделирование процесса теплопереноса (Рисунок 3.3).

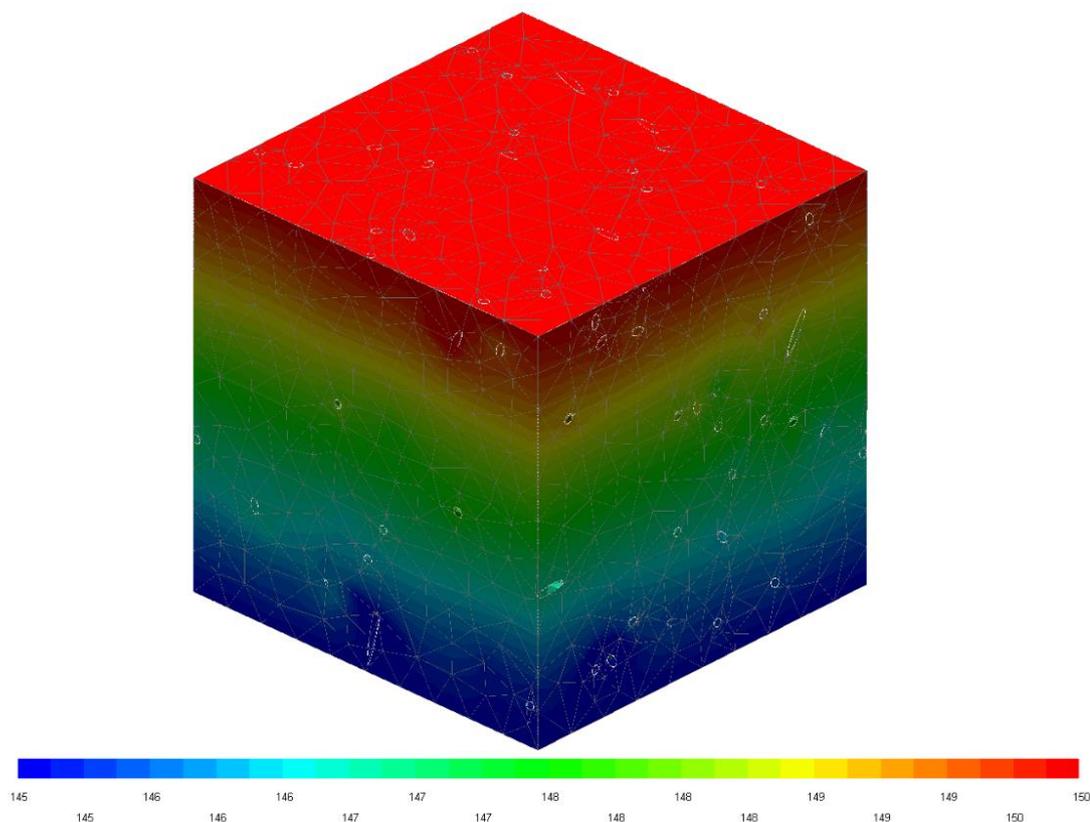
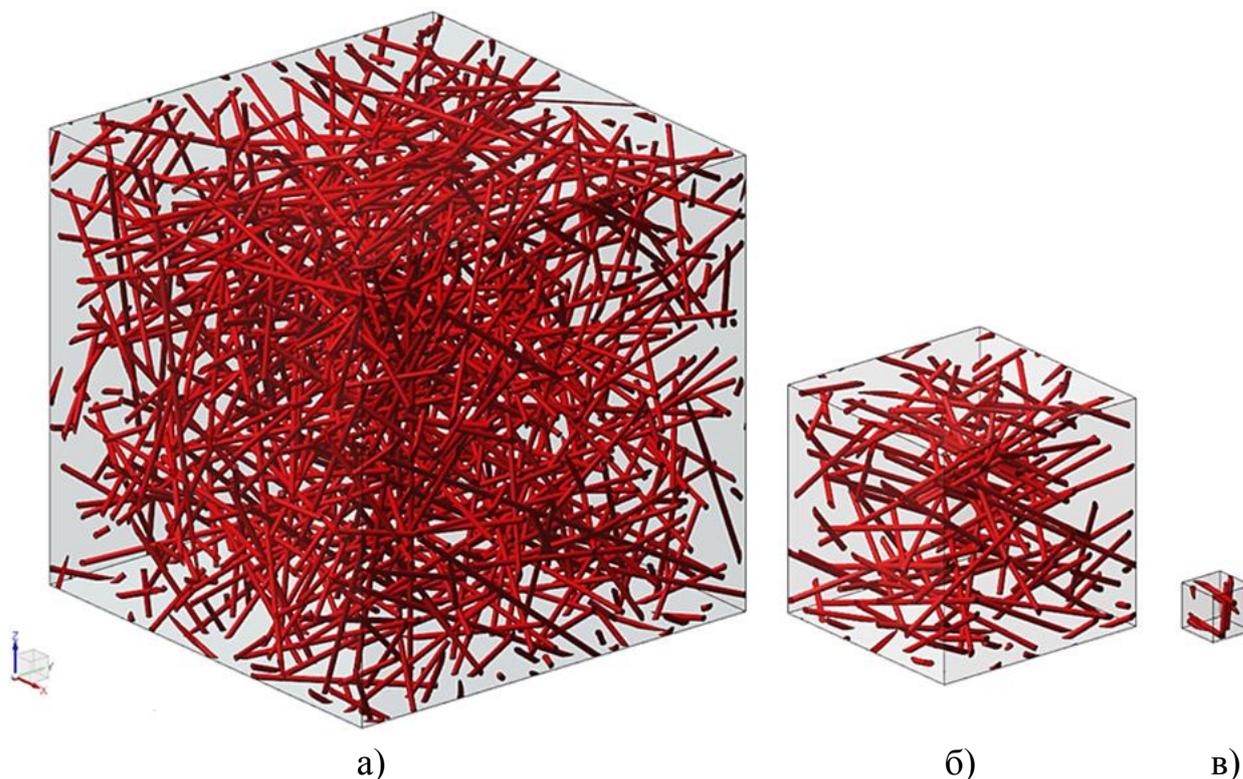


Рисунок 3.3 – Результаты моделирования процесса теплопереноса в программном пакете конечно-элементного автоматизированного расчета и проектирования конструкций APM Multiphysics

Построение модели элементарной ячейки требует определения оптимального значения характеристического размера – длины ребра. При увеличении длины ребра увеличивается количество включений, что, соответственно, позволяет получить более точные значения параметров теплопереноса. Однако, построение моделей с большим числом поверхностей ведет к увеличению продолжительности конечно-элементного анализа. Следовательно, встает вопрос о выборе оптимальной длины ребра элементарной ячейки.

Для исследования влияния длины ребра на теплопроводность элементарной ячейки были построены модели с массовой долей цилиндрических включений УНТ 0,4% и длиной ребра от 100 до 1000 нм с шагом 100 нм. Сравнительные изображения ячеек приведены на Рисунке 3.4.



а) – длина ребра 1000 нм; б) – длина ребра 500 нм; в) – длина ребра 100 нм  
 Рисунок 3.4 – Хаотически армированные элементарные ячейки с массовой долей УНТ 0,4%, различного размера

Параметры ячеек и результаты моделирования приведены в Таблице 1 Приложения А. На рисунке 3.5 показано, что зависимость теплопроводности от длины ребра имеет зависимость, по характеру приближенную к логарифмической. При этом минимальные отклонения от логарифмического характера соответствуют значениям длины ребра 500, 800 и 900 нм. Увеличение длины ребра элементарной ячейки экспоненциально увеличивает количество включений в элементарной ячейке. Увеличение включений, в свою очередь, приводит к росту продолжительности и трудоемкости конечно–элементного анализа. Таким образом, наиболее оптимальным, с точки зрения соотношения трудоемкости вычислений к их достоверности, является длина ребра в 500 нм.

Для последующего анализа, в качестве опорной, была выбрана массовая доля наполнителя 0,4%, как характерное значение концентрации УНТ. Геометрические параметры нанотрубок определяются параметрами технологического процесса их

производства. Это позволяет варьировать рядом параметров, таких как: диаметр, длина, количество слоев, удельная площадь поверхности, дефектность поверхности, количество примесей и пр. Это необходимо не только для того, чтобы максимально использовать огромную удельную площадь поверхности УНТ, которая порой достигает  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ , но и для того, чтобы максимально задействовать их поверхностную энергию[20].

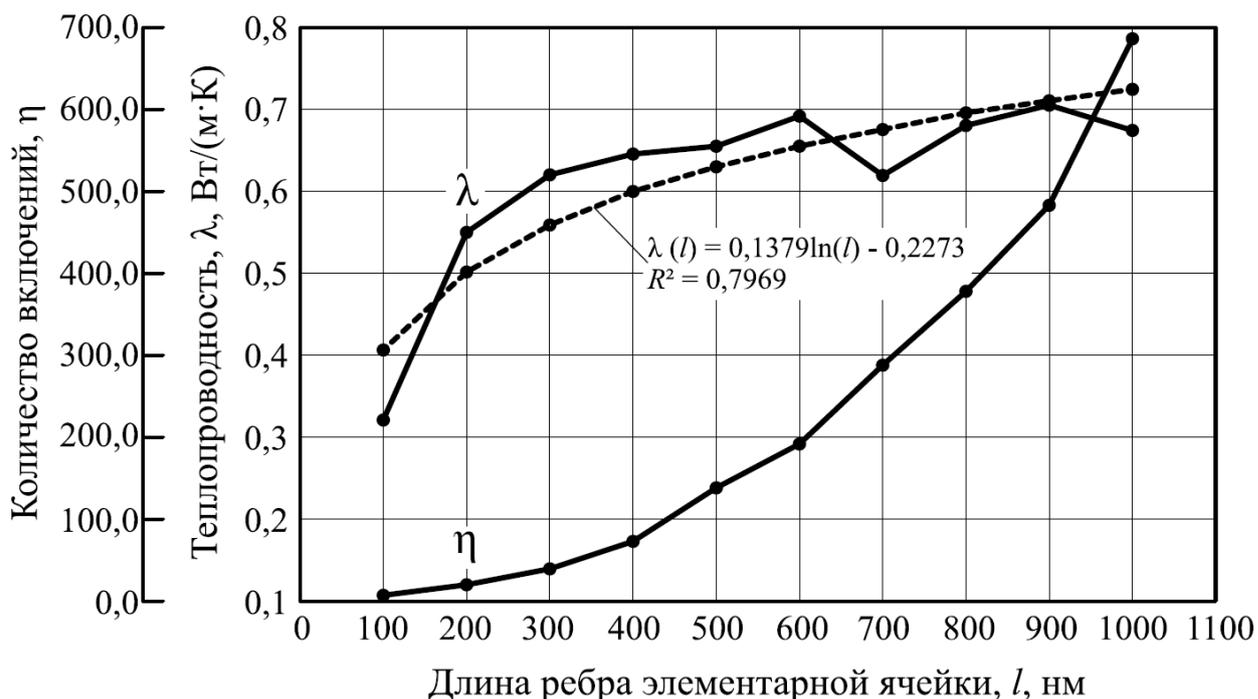


Рисунок 3.5 – Зависимость теплопроводности ( $\lambda$ ) и количества включений ( $\eta$ ) от длины ребра хаотически армированных элементарных ячеек с массовой долей УНТ 0,4%

Кроме того, согласно теории Ван-дер-Ваальса, межмолекулярное взаимодействие имеет электрическую природу, а сами УНТ можно рассматривать как заряженные молекулы–диполи [20]. Рассматривая УНТ в виде заряженного диполя, справедливо предположение о том, что можно ориентировать в пространстве под действием электрического поля. Оптимальная концентрация УНТ в полимере, обеспечивающая максимальные характеристики нанокompозита, для каждого конкретного вида наночастиц должна быть единственно возможной. До достижения этой концентрации, характеристики будут равномерно возрастать. Превышение оптимальной концентрации приведет к тому, что силы притяжения

молекул УНТ начнут превышать силы отталкивания, а это, в свою очередь, приведет к образованию агломератов. [20]

Таким образом, интерес вызывает исследование влияния геометрических параметров УНТ и их ориентации в среде связующего на теплофизические характеристики формируемого нанокompозита. В рамках данной работы было проведено исследование влияния диаметра нанотрубок на процесс теплопереноса, при сохранении массовой доли включений в элементарной ячейке. Для этого были построены элементарные ячейки с массовой долей включений 0,4% и диаметром цилиндрических включений от 5 до 30 нм, с шагом 5 нм. Результаты анализа процесса теплопереноса представлены в Таблице 2 Приложения А.

Зависимость теплопроводности и количества включений элементарных ячеек от диаметра включений представлена на Рисунке 3.6. С уменьшением диаметра включений, теплопроводность элементарной ячейки асимптотически увеличивается. Это объясняется тем, что с уменьшением диаметра включения, при постоянной массовой доле включений на единицу элементарного объема, количество включений увеличивается, что приводит к увеличению теплопроводности. Уменьшение количества включений на единицу объема, при сохранении массовой доли включений, объясняется тем, что при увеличении диаметра при постоянной длине увеличивается объем включения. Это приводит к тому, что при постоянной плотности включения, увеличение объема влечет за собой увеличение массы включения. Масса единичного включения увеличивается прямо пропорционально увеличению диаметра, что приводит к уменьшению количества включений при постоянной массовой доле на фиксированный элементарный объем ячейки.

Для исследования влияния длины цилиндрических включений на процесс теплопереноса были построены модели элементарных ячеек с длиной цилиндрических включений от 250 до 1500 нм, с шагом в 125 нм. Сравнительное изображение ячейки с длиной включений 250 нм и 1000 нм приведено на Рисунке 3.7. Результаты анализа процесса теплопереноса приведены в Таблице 3 Приложения А.

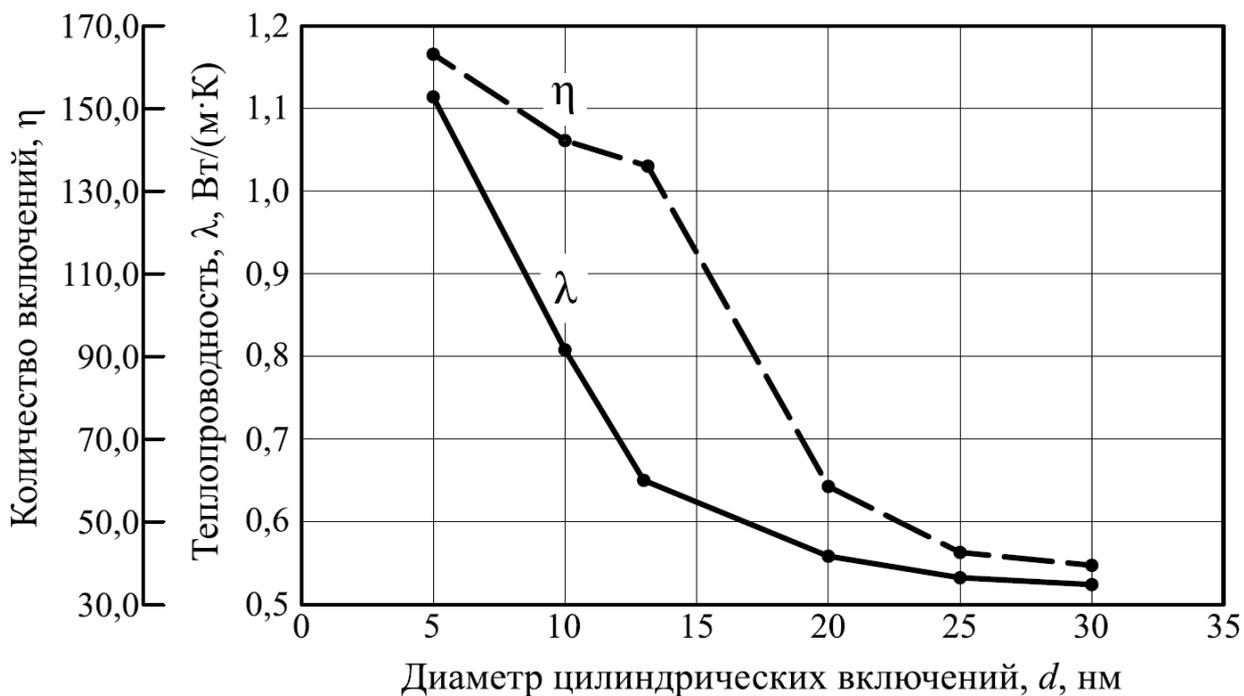
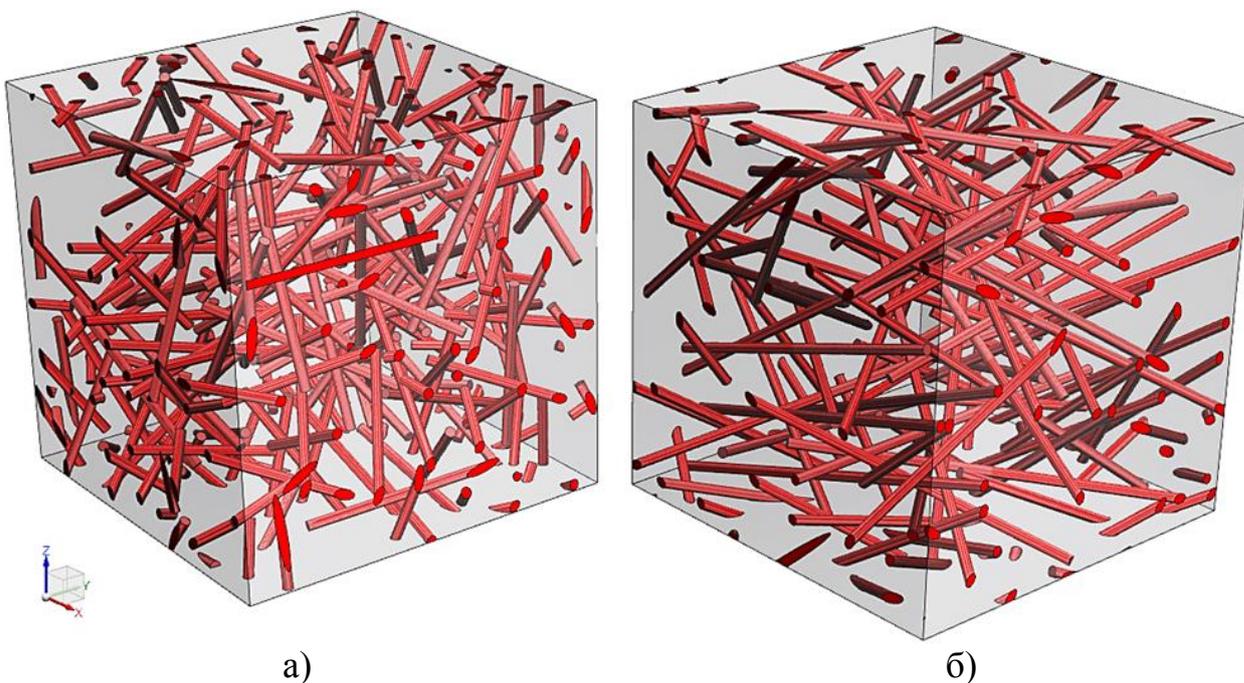


Рисунок 3.6 – Зависимость теплопроводности ( $\lambda$ ) и количества включений ( $\eta$ ) от диаметра включений ( $d$ ) для хаотически армированных элементарных ячеек с массовой долей наполнителя 0,4%



а) – длина цилиндрических включений 250 нм; б) – длина цилиндрических включений 1000 нм;

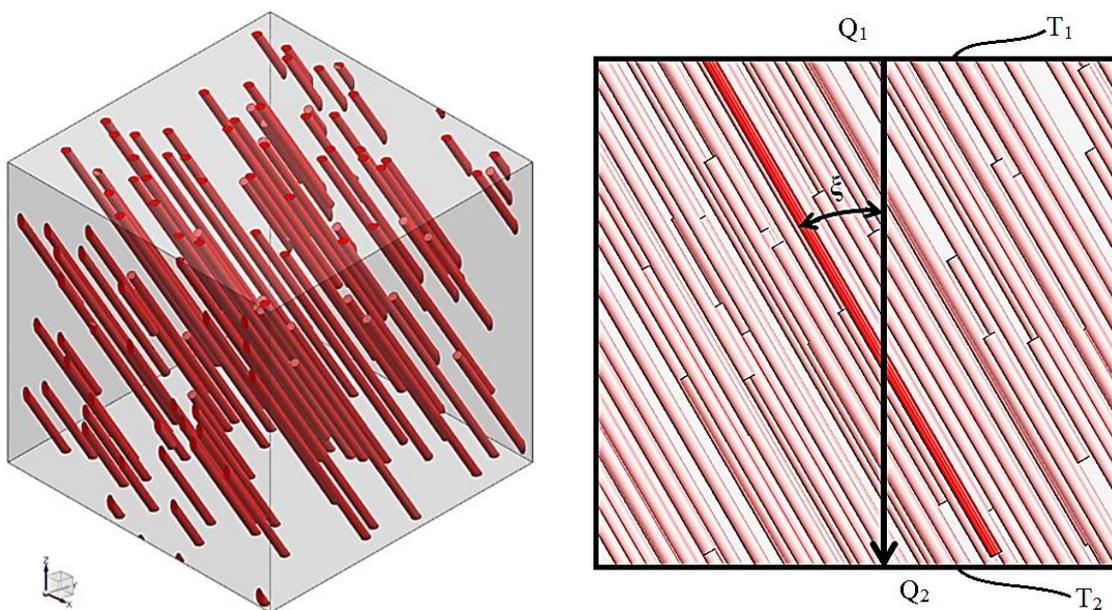
Рисунок 3.7 – Хаотически армированные элементарные ячейки с массовой долей УНТ 0,4%, с различной длиной цилиндрических включений УНТ

Как видно на Рисунке 3.8, изменение характера зависимости теплопроводности от длины цилиндрических включений, для массовой доли наполнителя 0,4% происходит при значениях длины 625 и 1250 нм. Зависимость количества включений от их длины также меняет характер при значениях 625 и 1250 нм. Это можно объяснить тем, что при длине включений менее 625 нм теплопроводность увеличивается за счет того, что большое количество включений небольшой длины образуют связанную между собой структуру «тепловых каналов». «Тепловые каналы» образуются в результате того, что цилиндрические включения при многократном пересечении между собой образуют обширную площадь контакта, которая способствует более эффективному теплопереносу в объеме элементарной ячейки. В случае включений длиной менее 625 нм, их количество в элементарной ячейке увеличивается, но меньшая длина включений не позволяет сформировать систему эффективных тепловых каналов. Кроме того, уменьшается количество возможных контактов включений между собой, что и приводит, в итоге, к уменьшению теплопроводности. При увеличении длины включений в диапазоне от 625 до 1250 нм происходит снижение количества включений на единицу объема в связи с увеличением веса каждого включения. Уменьшение количества включений, соответственно приводит к уменьшению теплопроводности, за счет снижения влияния эффекта «тепловых каналов». Однако, более плавный характер графика обусловлен тем, что при большей длине включения, интенсифицируется кондуктивный перенос тепла по высокотеплопроводному включению большой длины. При длине включений более 1375 нм начинается заметный рост теплопроводности материала. В этом случае перенос тепла происходит, в основном, по длине включений, так как увеличивается количество включений, которые за счет большей длины проходят через всю элементарную ячейку. Кроме того, как видно из Рисунка 3.6 происходит плавный рост количества включений в элементарной ячейке.

Для исследования влияния угла ориентации углеродных нанотрубок на теплопроводность наномодифицированного связующего была рассмотрена модель теплового нагружения, представленная на Рисунке 3.9.



Рисунок 3.8 – Зависимость теплопроводности ( $\lambda$ ) и количества включений ( $\eta$ ) от длины включений ( $l$ ) для хаотически армированных элементарных ячеек с массовой долей наполнителя 0,4%



$T_1, T_2$  – температура стенки;  $Q_1, Q_2$  – тепловой поток с поверхности стенки;  
 $\xi$  – угол между направлением ориентации цилиндрических включений и направлением теплового потока;

Рисунок 3.9 – Модель теплового нагружения элементарных ячеек, армированных плоско ориентированно с массовой долей наполнителя 0,4%

Результаты анализа процесса теплопереноса для различных углов ориентации включений приведены в Таблице 4 Приложения А. Зависимость теплопроводности элементарной ячейки от угла ориентации относительно теплового потока представлена на Рисунке 3.10.

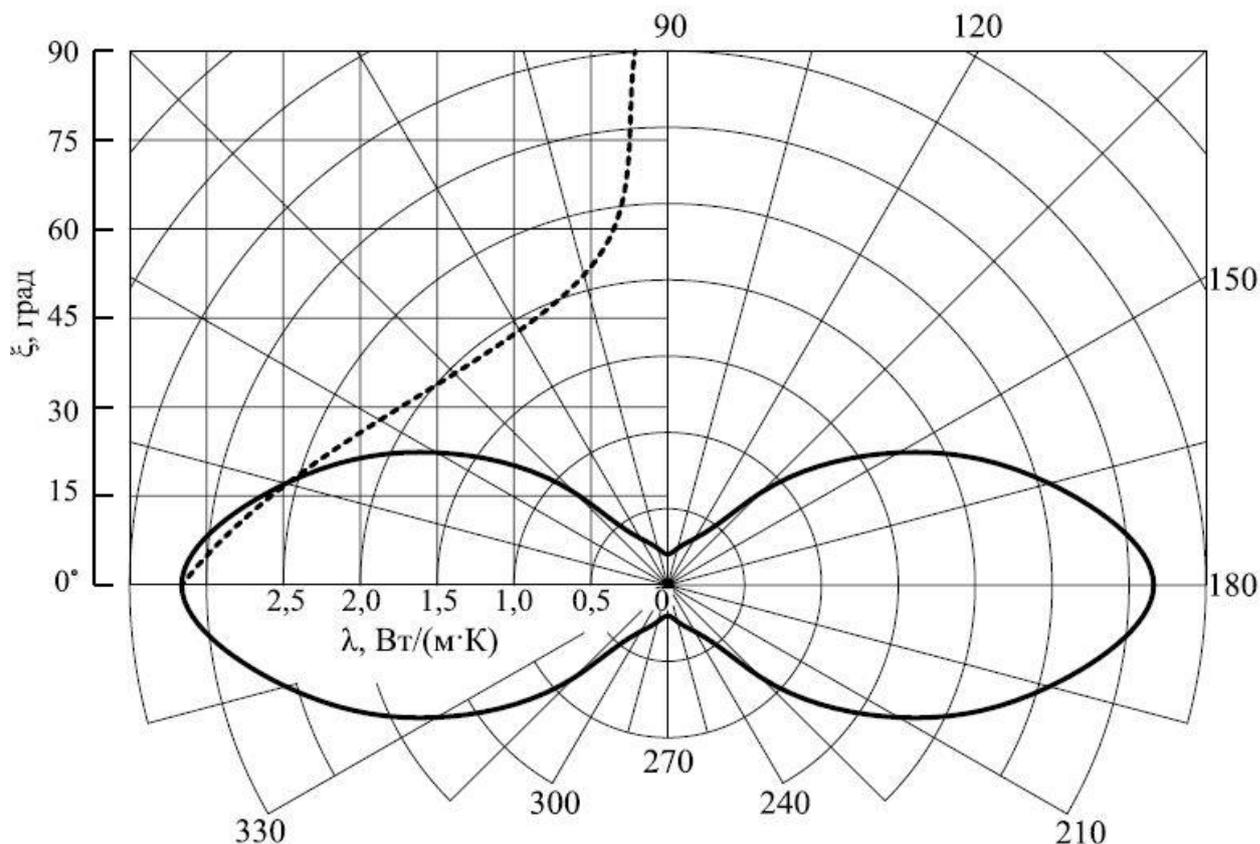


Рисунок 3.10 – Зависимость теплопроводности элементарной ячейки ( $\lambda$ ) от угла ориентации относительно теплового потока ( $\xi$ )

Как видно из Рисунка 3.10, увеличение угла отклонения относительно направления теплового потока приводит к снижению теплопроводности элементарной ячейки. Соответственно, можно сделать вывод о том, что ориентация УНТ по направлению теплового потока способствует увеличению теплопроводности наномодифицированного связующего. При этом значения теплопроводности для элементарных ячеек с частицами, ориентированных вдоль потока отличается от ячеек с частицам, ориентированными поперек на порядок, что является характерным и прогнозируемым результатом.

### 3.3. Построение нейросетевой модели идентификации целевых свойств и технологических параметров переработки

Формирование архитектуры нейросетевой модели состоит в идентификации количества слоев каждого типа и количества нейронов в каждом из этих слоев. Входной слой имеет абсолютно любая нейронная сеть без исключений. Количество нейронов, содержащихся в этом слое полностью и однозначно определяется размерностью входного сигнала. Важно отметить, что входной слой фактически не выполняет никаких вычислительных функций и может считаться слоем разделителей компонент входного сигнала. Выбор числа нейронов для выходного слоя схож подходом для входного слоя. Количество нейронов полностью определяется размерностью выходного сигнала.

В связи с тем, что задачи идентификации технологических параметров переработки и целевых свойств модифицированных композиционных материалов можно отнести к задачам прогнозирования, целесообразно будет рассмотреть построение нейросетевой модели прямого распространения. В этом случае входной сигнал будет распространяться строго от входного слоя к выходному, исключая распространение в обратном направлении.

Выбор параметров сети является ключевым этапом в построении многослойной нейронной сети прямого распространения. Определяющими параметрами сети является количество скрытых слоев и количество нейронов в них. В настоящее время не установлены жесткие критерии выбора количества слоев и количества нейронов, однако ряд эмпирически подтвержденных утверждений [92–96]:

- если функция определена на конечном множестве точек, то трехслойный персептрон способен ее аппроксимировать;
- если функция непрерывна и определена на компактной области, то трехслойный персептрон способен ее аппроксимировать;

– прочие функции, которым могут быть обучены нейронные сети, могут быть аппроксимированы четырехслойным персептроном.

Следовательно, максимально приемлемое количество слоев – четыре (два скрытых слоя). Тем не менее, при решении реальных задач может использоваться большее количество слоев [92–96].

Оптимизация количества нейронов в скрытых слоях является фактором, определяющим качество решения задачи аппроксимации. В том случае, если количество нейронов слишком мало, сеть не сможет обучиться. Слишком большое количество нейронов влечет за собой увеличение времени обучения сети. Кроме того, большое количество нейронов может привести к состоянию переобученной сети (*overfitting*). Как следствие, сеть будет показывать стремящуюся к абсолютной сходимости на обучающей выборке, и неудовлетворительную сходимость тестовых примерах (Рисунок 3.11). Это связано с тем, что при избыточном количестве нейронов, при обучении сети происходит увеличение весов факторов, характерных лишь для обучающей выборки в одинаковом приоритете с факторами, являющимися значительными для данной задачи.

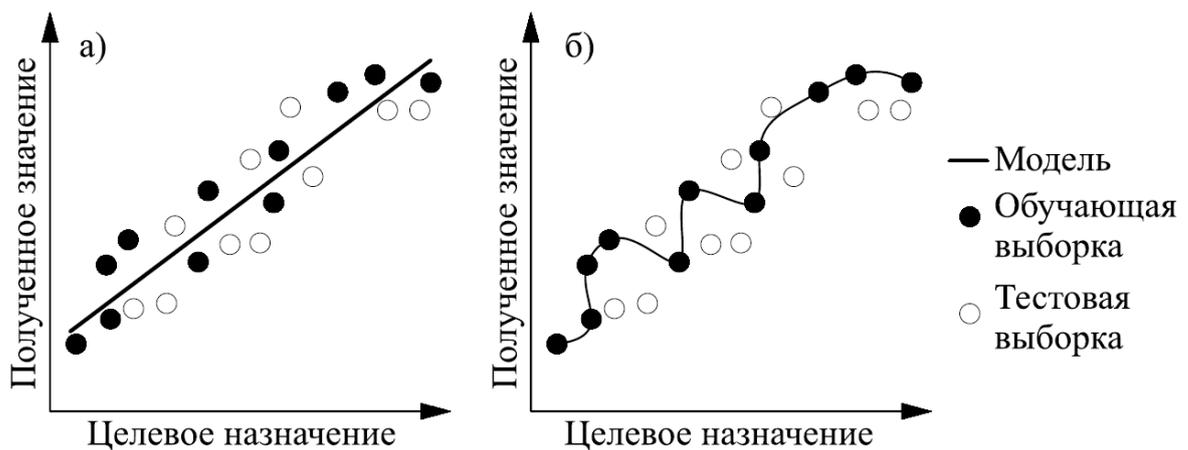


Рисунок 3.11 – Сходимость обученной оптимально (а) и переобученной (б) сети

Существуют эвристические правила выбора количества нейронов в скрытых слоях, одним из которых является правило геометрической пирамиды

(*geometric pyramid rule*) [82], в соответствии с которым, число нейронов скрытого слоя в трёхслойном персептроне в виде:

$$k = \sqrt{n \cdot m},$$

где  $k$  – число нейронов в скрытом слое,  $n$  – число нейронов во входном слое,  $m$  – число нейронов в выходном слое.

Для четырехслойного персептрона число нейронов вычисляется в виде:

$$k_i = m \left( \sqrt[3]{\frac{n}{m}} \right)^{(3-i)}, \quad i=1, \dots, 2,$$

где  $k_i$  – число нейронов в первом и втором скрытом слое.

Сети прямого распространения сигнала, примером которых являются многослойный персептрон и сети радиальных базисных функций, применимы для решения задач аппроксимации. При обучении многослойного персептрона нашел оптимальное применение метод обратного распространения ошибки, используемый для численного определения градиента контрольной функции (суммы квадратов ошибок). Градиент контрольной функции позволяет использовать для обучения сети направленные методы спуска, в частности, метод наискорейшего спуска. Тем не менее, максимальную точность при наибольшей продолжительности вычислений обеспечивает метод последовательных приближений, который заключается в том, что изначально используется сеть с одним скрытым слоем с одним нейроном. Если ее применение обеспечивает достижение необходимого уровня ошибки, то можно считать процесс обучения законченным. В противном случае количество нейронов увеличивается до тех пор, пока ошибка сети не станет приемлемой либо не произойдет улучшение характеристик сети до приемлемого значения.

Задача идентификации целевого свойства теплопроводности модифицированного композиционного материала, в рамках проводимого исследования, заключается в установлении зависимости технологических параметров переработки от конечного значения целевого свойства либо определяющих его характеристик. В соответствии с условиями проведения

экспериментальных исследований и математического моделирования, для формирования архитектуры нейросетевой модели, в качестве нейронов входного слоя были выбраны значения массовой доли наполнителя, уровень вакуума и температура связующего. Выходной слой модели, в свою очередь, содержит один нейрон, определяющий значение целевого свойства теплопроводности. Структура сети представлена на Рисунке 3.12.

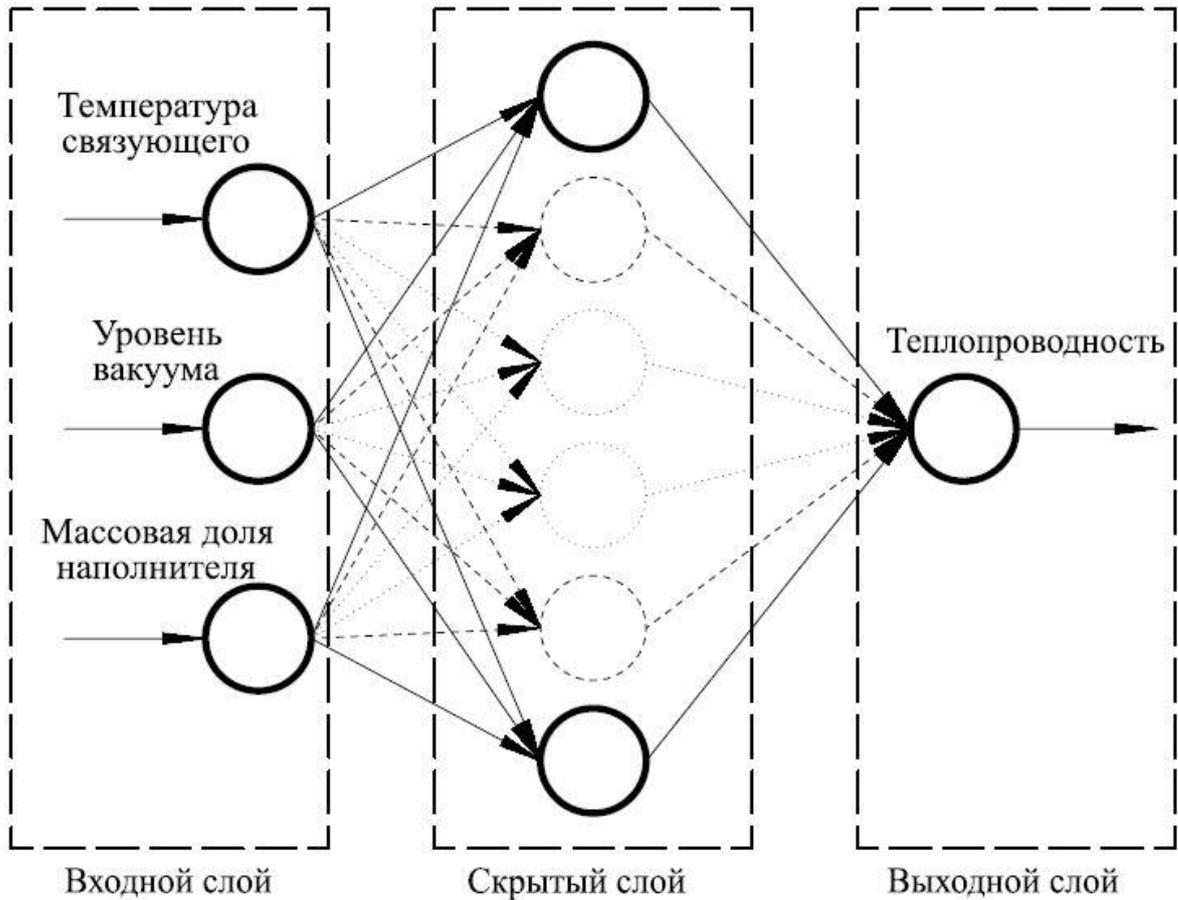


Рисунок 3.12 – Структура сети идентификации целевого свойства теплопроводности

Для решения задачи автоматизации технологического процесса модификации реактопластичных полимеров наноразмерными углеродными структурами была сформулирована задача определения технологических параметров модификации реактопластичного связующего, исходя из требуемых теплофизических характеристик.

Данные для обучения и тренировки нейросети были разделены в следующем соответствии. В качестве входных нейронов были использованы значения теплопроводности модифицированных реактопластичных полимеров, в качестве выходных – значения уровня вакуума, температуры связующего и массовой доли наполнителя. На Рисунке 3.13 приведена структура сети.

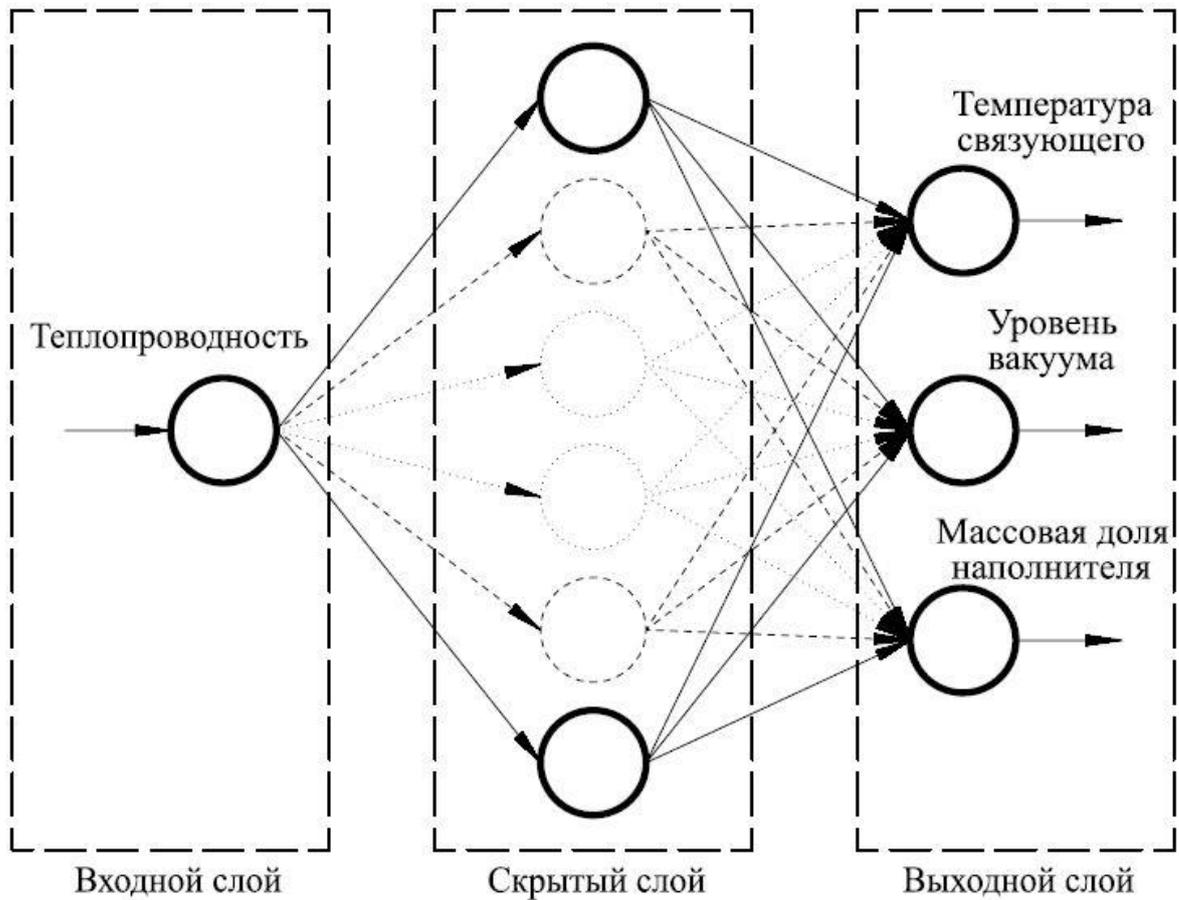


Рисунок 3.13 – Структура сети идентификации технологических параметров переработки

Для персептронов с последовательными связями, к которым можно отнести рассматриваемые нейронные сети прямого распространения, справедлива теорема о необходимых, но недостаточных условиях существования решения, сформулированная Ф. Розенблатом [4], которую можно сформулировать применительно к рассматриваемой задаче, в следующем виде: не должно существовать никакой последовательности нейронов входного слоя, содержащей

по меньшей мере по одному нейрону каждого класса, которая приводила бы к одинаковому коэффициенту смещения для каждого элемента скрытого слоя в множестве скрытых слоев, реагирующих на эту последовательность. Кроме того, в работах [84, 85] показано, что конфигурация сети, содержащая единичный нейрон во входном слое при большем количестве нейронов выходного слоя, приводит к неудовлетворительной сходимости и плохой достоверности результатов. При меньшем количестве нейронов выходного слоя, задача идентификации не имеет смысла. Таким образом, можно говорить о несостоятельности предложенной модели.

Решением сформулированной проблемы является представление целевого свойства теплопроводности в виде произведения целевых характеристик теплопроводности, плотности и теплоемкости (Рисунок 3.14).

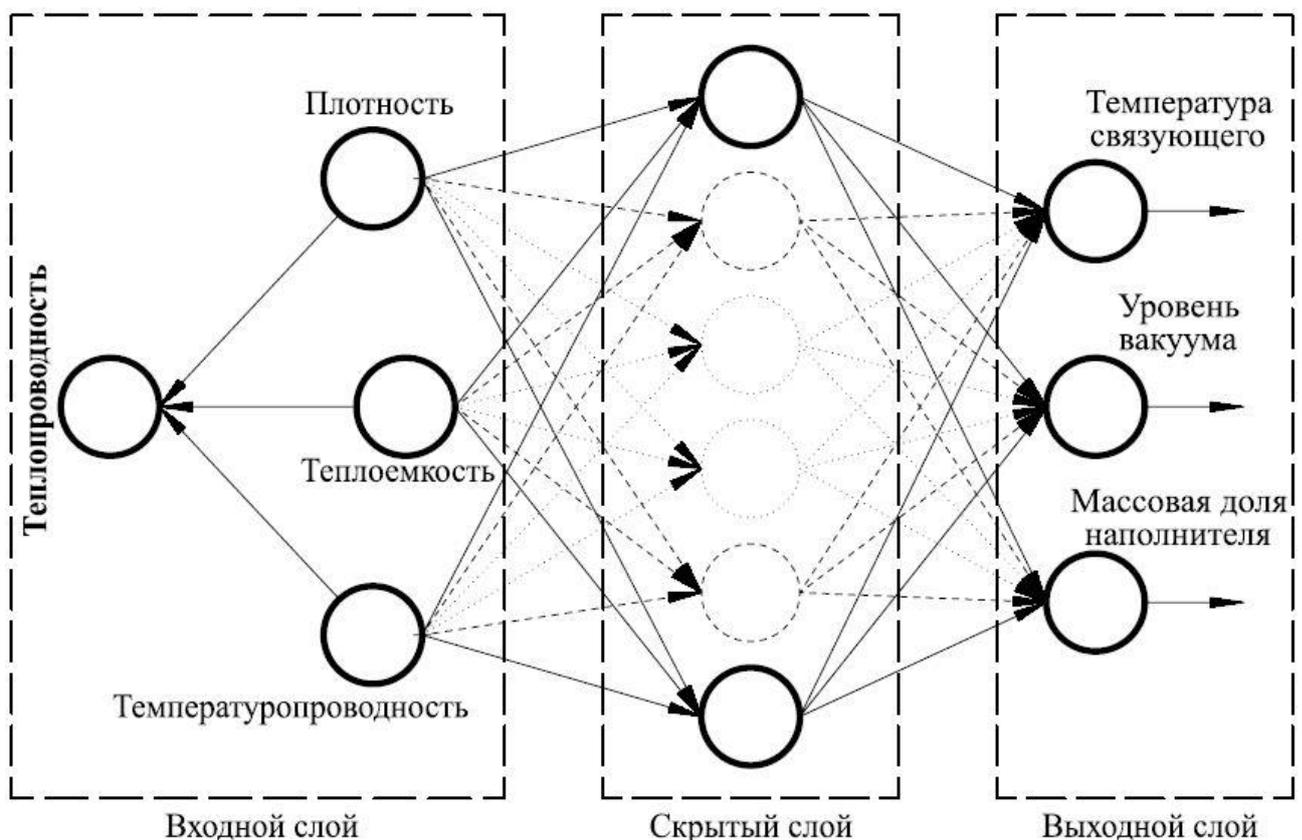
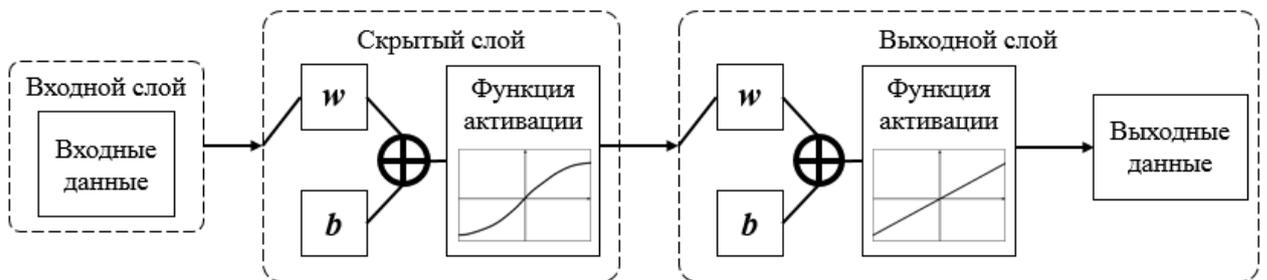


Рисунок 3.14 – Структура сети идентификации технологических параметров переработки

Проектирование и работа с сетью реализовано в программной среде Matlab [52] с помощью приложения Neural Network Toolbox [53], включающем в себя четыре типа контролируемых сетей: с прямым распространением, радиально-базисные, динамические и LVQ.

Сети прямого распространения имеют односторонние соединения от входных до выходных слоев. Они чаще всего используются для прогнозирования, распознавания образов и аппроксимации нелинейных функций. Поддерживаемые сети прямого распространения включают алгоритмы обратного распространения ошибки, каскадного распространения, прямой связи с входной задержкой встречного распространения, линейные сети и сети типа персептрон. Двухслойная сеть с прямой связью, скрытым слоем нейронов сигмоидального типа и линейными выходными нейронами. Этот тип сети подходит для многомерных задач отображения, при задании согласованных данных и достаточном количестве нейронов в скрытом слое. На Рисунке 3.15 представлена Архитектура сети в Neural Network Toolbox.



$w$  – вес синапса,  $b$  – смещение

Рисунок 3.15 – Архитектура сети в Neural Network Toolbox [53]

Для обучения сети был использован алгоритм смежных градиентов (Левенберга-Маквардта). Его можно использовать при соблюдении условий довольно большого объема памяти, равного квадрату числа весов в сети и применения только среднеквадратичной функции ошибок. Основной целью метода является поиск того значения вектора весов  $w$ , которые представляли бы минимум функции ошибки

$$E = \sum_{n=1}^N (y_n - f(w, x_n))^2.$$

Формула частично предполагает, что функция, моделирующая сеть, линейна. Ближе к точке минимума эта гипотеза выполняется более точно, вдалеке же это предположение может быть неверным. Компромиссом считается совершение шага лишь в том случае, если он уменьшает ошибку и в том месте, где это необходимо. Для этого применяется градиентный спуск с достаточно малым шагом. На первом этапе сеть инициализируется весовыми коэффициентами случайным образом. Далее на вход подается обучающая выборка и вектор контрольных значений – вектора  $x$  и  $y$ . На каждом шаге итерации происходит наращивание весов, и приращение  $\Delta w$  оценивается как

$$f(w + \Delta w, x) \approx f(w, x) + J \Delta w,$$

где  $J$  – якобиан  $f(w, x_n)$  в точке  $w$ , который можно показать в следующем виде (при размере  $N \cdot R$ )

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(w, x_1)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w, x_1)}{\partial w_R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(w, x_N)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w, x_N)}{\partial w_R} \end{bmatrix}.$$

Вектор значений весов  $w = [w_1, \dots, w_R]^T$ . Приращение  $\Delta w$  в точке, где функция ошибки минимальна, равняется нулю. Следовательно, для поиска значения приращения на следующем шаге берется частная производная  $E$  по  $w$  и приравнивается нулю.

$$\frac{\partial E}{\partial w} = (J^T J)^{-1} \Delta w - J^T (y - f(w)) = 0.$$

В результате для того чтобы найти значение  $\Delta w$ , необходимо решить уравнение вида

$$\Delta w = (J^T J)^{-1} J^T (y - f(w)).$$

В том случае, когда на очередном шаге итерации приращение меньше заданного или вектор весов доставляет такую функцию ошибки, меньшую заданного значения, алгоритм прекращает свою работу. Последние значения весов считаются искомыми. Данный метод чувствителен к начальным весам, но тем не менее он предоставляет наилучшее качество обучения среди других алгоритмов.

Достижение адекватности работы нейросетевых моделей идентификации целевых свойств и технологических параметров переработки требует качественного обучения сети для обеспечения удовлетворительных показателей сходимости результатов моделирования. Обучение сети может обеспечить требуемую результативность только в случае наличия достаточного количества результатов экспериментальных исследований целевых характеристик образцов, полученных с вариацией технологических параметров переработки.

### **3.4. Метод экспериментальных исследований теплофизических характеристик модифицированных композиционных материалов**

Задача экспериментального исследования теплофизических характеристик модифицированных материалов заключается в идентификации значений теплопроводности. С точки зрения экспериментального исследования, теплопроводность можно представить в виде

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho,$$

где  $a$  – температуропроводность,  $C_p$  – теплоемкость,  $\rho$  – плотность.

Экспериментальное исследование температуропроводности может быть осуществлено путем облучения образца коротким (порядка 0,001 с) импульсом лучистой энергии. Энергия импульса поглощается в тонком слое фронтальной поверхности образца и в дальнейшем распространяется по толщине образца. В процессе эксперимента регистрируется значение температуры на тыльной

поверхности образца. Температуропроводность материала определяется временем достижения температуры тыльной поверхности образца половины своего максимального значения (Рисунок 3.16). Для определения температурной зависимости температуропроводности, экспериментальные исследования выполняются при различной температуре образца.

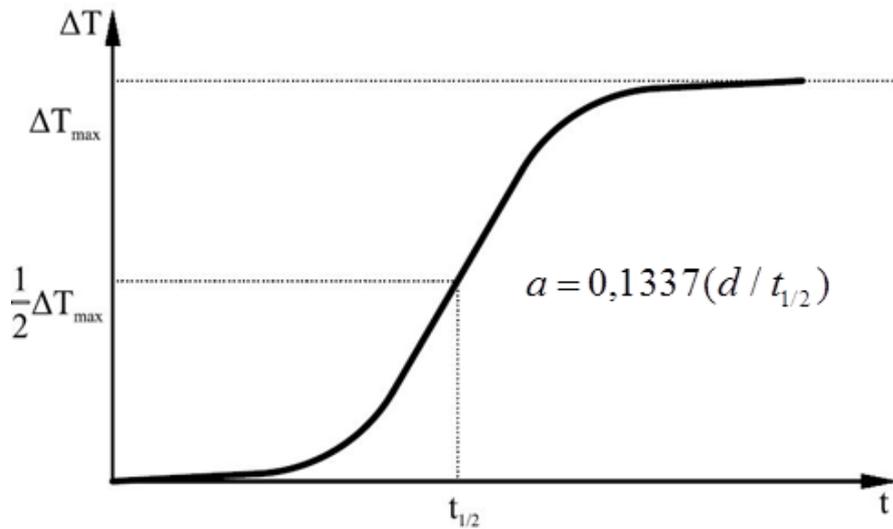


Рисунок 3.16 – Изменение температуры на тыльной поверхности исследуемого образца

Из теории для идеального случая физическая модель импульсного метода основана на тепловом поведении адиабатически изолированной (теплоизолированной) пластины материала, первоначально имеющей постоянную температуру, одна сторона которой была подвергнута воздействию короткого импульса тепловой энергии в виде излучения.

Модель предполагает следующие допущения:

- одномерный перенос тепла;
- отсутствие потерь тепла от поверхностей пластины;
- равномерное поглощение импульса на фронтальной поверхности;
- бесконечно короткий по длительности тепловой импульс;
- поглощения энергии импульса в очень тонком слое;
- однородность и изотропность материала пластины.

Из уравнения распределения температуры в термически изолированной твердой пластине равномерной толщины  $L$  выводится математическое выражение, из которого рассчитывается температуропроводность:

$$a = \frac{1,38 \cdot L^2}{\pi^2 \cdot \tau_{\frac{1}{2}}}$$

или

$$a = 0,1388 \frac{L^2}{\tau_{\frac{1}{2}}}, \quad (3.2)$$

где  $\tau_{\frac{1}{2}}$  – время достижения температуры на задней поверхности образца половины своего максимального значения.

Точность результатов измерений зависит от соответствия между математической и экспериментальной моделями. Эффект конечной длительности импульса, например, проявляется сильнее, когда применяют тонкие образцы с высокой теплопроводностью. Отношение  $\tau/\tau_{\frac{1}{2}}$  должно быть 0,02 или меньше ( $\tau$  – время продолжительности импульса, Рисунок 3.16). В то время как тепловые потери излучением становятся доминирующими при высоких температурах при испытании толстых образцов.

Согласно требованиям к приборному оснащению, при проведении измерений источник лазерного импульса (или ксеноновая лампа–вспышка) должен генерировать короткий по длительности импульс энергии (Рисунок 3.17) [79]. Энергия импульса должна быть равномерной интенсивности по поверхности образца. Использование оптического волокна между лазером и образцом существенно улучшает равномерность энергии в пятне излучения.

Образцы, используемые при измерении теплопроводности изготавливают с площадью поверхности меньшей, чем площадь пятна излучения энергии импульса. Оптимальная толщина образца зависит от величины оценки теплопроводности, и должна быть выбрана так, чтобы время для достижения максимальной температуры находилось в пределах от 40 до 200 мс. Кроме того, толщина образцов должна быть согласована с тем, чтобы при более высоких температурах минимизировать потери тепла излучением и теплопроводностью через контакт с держателем.

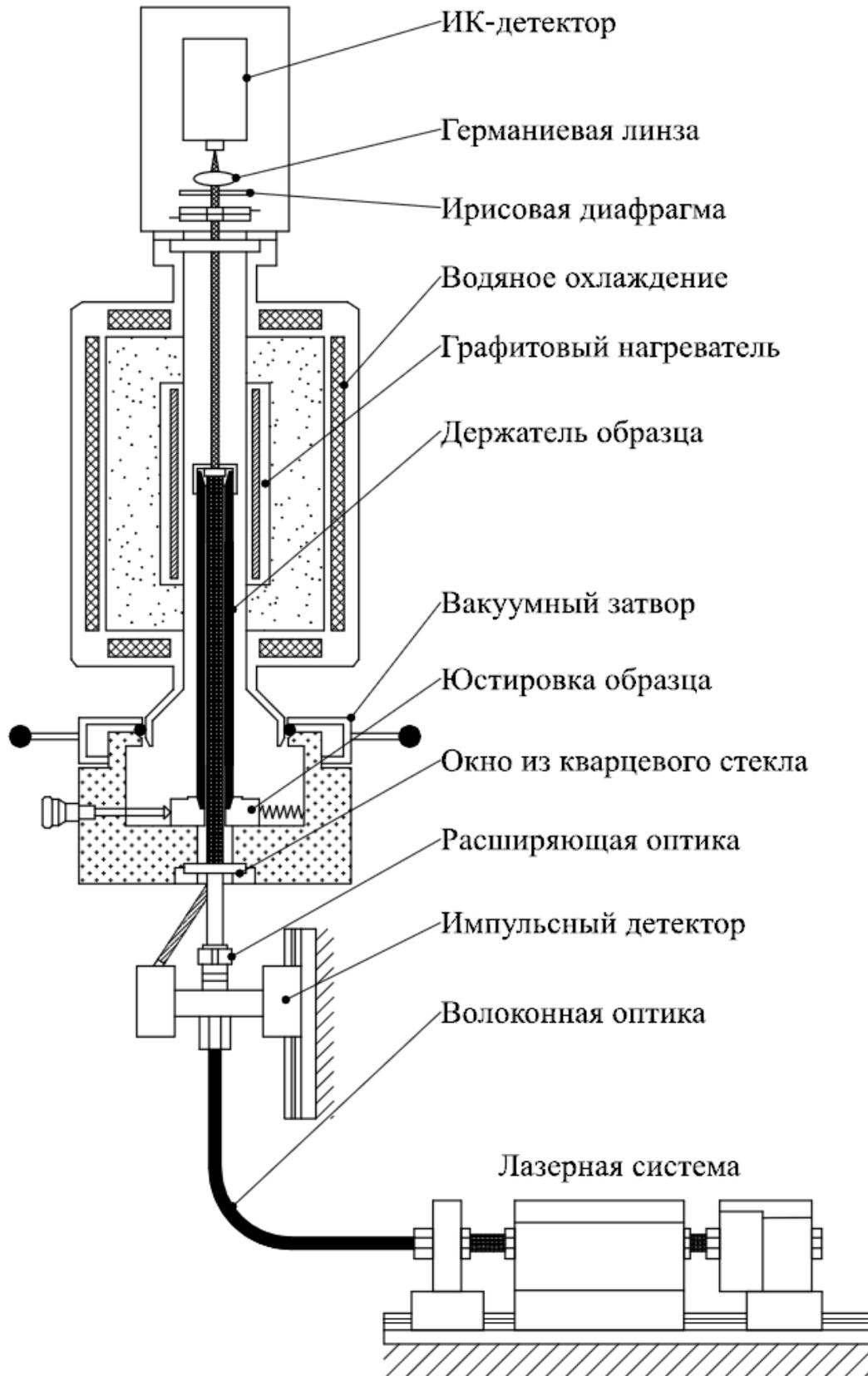


Рисунок 3.17 – Схема измерительного оборудования метода импульсного нагрева лазерной вспышкой

Температуропроводность пропорциональна квадрату толщины, и поэтому желательно использовать образцы различной толщины в различных температурных диапазонах измерений. Неправильно выбранная толщина образца может быть основным источником погрешности в измерениях. Образцы должны быть изготовлены плоскими, с параллельными сторонами, в пределах 0,5 % от их толщины, без неоднородностей поверхности (кратеры, царапины, маркировка), так как это может серьезно повлиять на результаты измерений.

Подготовка образцов к исследованию состояла в покрытии его слоем графита толщиной 5 мкм. Затем образцы сушились при комнатной температуре в течение 2 ч. Нанесенный слой позволяет поглотить энергию импульса поверхностью образца и не исказить термограмму. Отсутствие покрытия вызовет чрезмерно ослабленное поглощение тепла, и возможное исчезновение значимых сигналов на датчике температуры. Измерение толщины образца должно быть проведено поверенным микрометром, с соблюдением условия не превышения относительной погрешности 0,2 %.

Так как метод «лазерной вспышки» – абсолютный метод, он не требует калибровки. Однако, фактическое выполнение измерений подвержено случайным и систематическим ошибкам. Поэтому важно проверить надежность устройства, установить степень влияния этих ошибок на полученные результаты. Это может быть достигнуто тестированием одного или нескольких материалов, температуропроводность которых хорошо известна. Для этих целей были использованы образцы из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T.

Одной из важных проверок достоверности результатов измерений является изменение толщины образца. Из выражения (3.2) следует, что уменьшая толщину образца в два раза время  $\tau_{1/2}$  должно уменьшиться в четыре раза от первоначального значения при неизменной температуропроводности материала. Таким образом, если получатся те же значения температуропроводности с образцами из того же материала другой толщины, результаты можно считать действительными. Следует обратить внимание на выбор материала покрытия, чтобы при воздействии высоких

температур покрытие не отслоилось и не треснуло из-за чрезмерно различных коэффициентов теплового расширения.

Наиболее рациональным и достоверным способом экспериментального определения теплоемкости на сегодняшний день является метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Сущность метода заключается в регистрации разности температур между тиглем с исследуемым образцом и тиглем сравнения, возникающей вследствие различия их теплофизических свойств. В процессе измерения тигель с исследуемым образцом и тигель сравнения помещается в одинаковые тепловые условия и подвергается нагреву по заданной температурной программе в заданной газовой атмосфере. Разность температуры (дифференциальный сигнал) пропорциональна разности тепловых потоков, поглощаемых (выделяемых) исследуемым образцом и тиглем сравнения, которую после соответствующих настроек прибора регистрируют в виде зависимости удельной мощности тепловыделения (поглощения) от времени или температуры.

Измерительная ячейка дифференциального сканирующего калориметра (ДСК) теплового потока состоит из системы нагрева и встроенного датчика с фиксированным местом для исследуемого и эталонного образца (Рисунок 3.18). Сенсор может быть соединен с термопарой, а может быть частью термопары. Это позволяет регистрировать и разницу температур между исследуемым и эталонным образцом (ДСК сигнал), и абсолютную температуру образца или эталона [79].

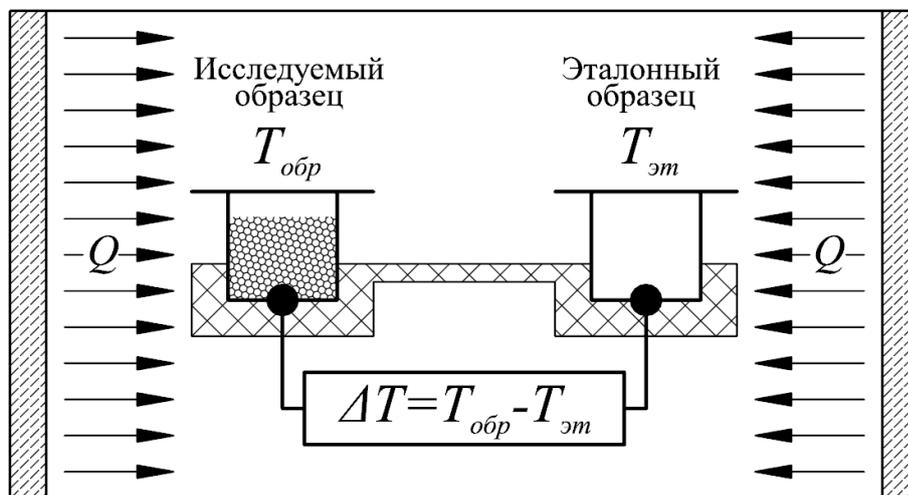


Рисунок 3.18 – Схема измерительной ячейки ДСК теплового потока

Во время нагрева измерительной ячейки ДСК из-за разницы в теплоемкости исследуемого образца и эталонного (как правило, пустой тигель) температура эталона ( $T_{эм}$ ) растет быстрее, чем температура исследуемого образца ( $T_{обр}$ ). При постоянной скорости нагрева две кривые изменяются параллельно до тех пор, пока не произойдет реакция в образце. На Рисунке 3.19 изображен график, где образец начинает плавиться в момент  $t_1$ . Температура образца во время плавления остается неизменной, в то время как температура эталона продолжает линейно увеличиваться. Когда плавление окончено, температура образца начинает линейно расти с момента  $t_2$ .

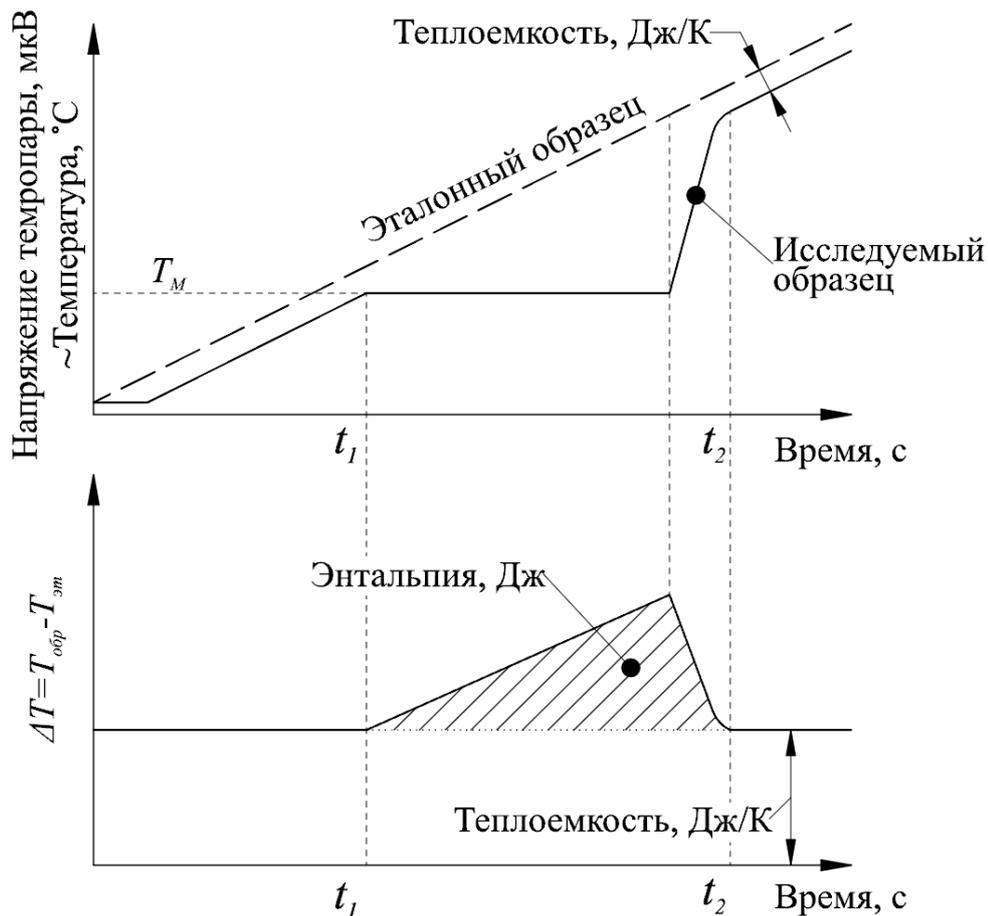


Рисунок 3.19 – Динамика плавления образца

В нижней части Рисунка 3.19 представлен дифференциальный сигнал ( $\Delta T$ ) кривых изменения температуры эталона и исследуемого образца. Вычисленная разница образует пик, представляющий собой эндотермический

процесс плавления. В зависимости от того, вычиталась или прибавлялась исходная температура к температуре образца, пик будет направлен вверх или вниз [61]. Пик коррелируется с теплосодержанием перехода – энтальпия процесса. Температура фазового перехода может быть определена из анализа зависимости удельной мощности тепловыделения (поглощения) от времени или температуры, в случае определения удельной теплоемкости – температурной зависимости удельной теплоемкости. Данный метод измерений применяется для термостойких твердых веществ. При этом диапазон температур и измеряемых значений теплоемкости может быть расширен в зависимости от применяемого оборудования.

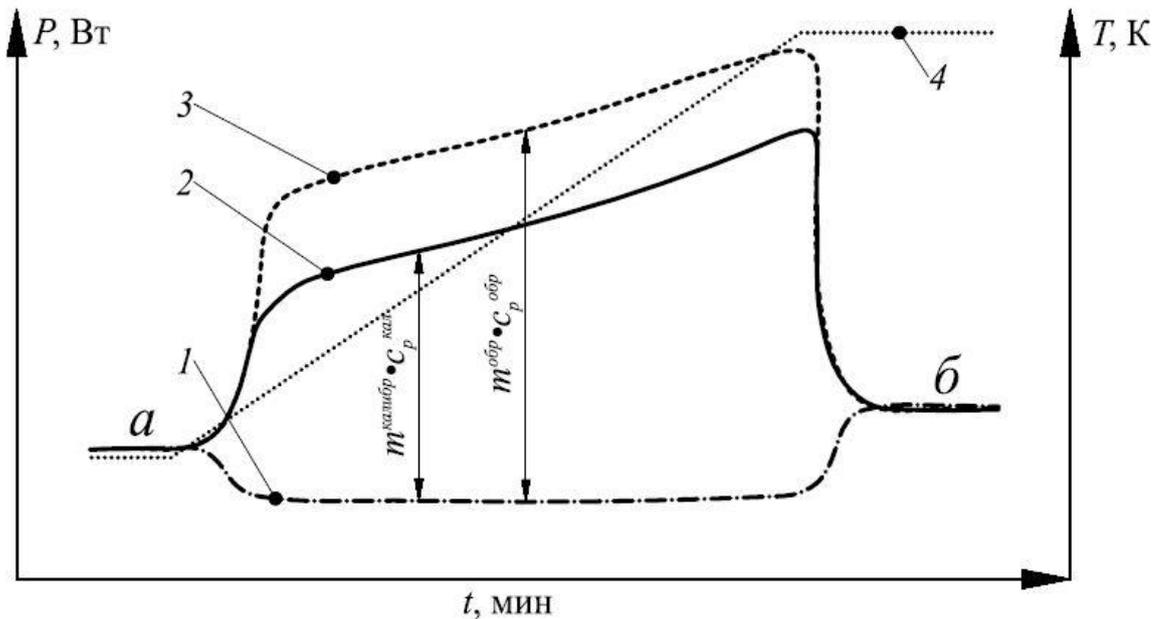
Для определения и расчета удельной теплоемкости было проведено два измерения в заданном диапазоне температур в одинаковых условиях. Удельная теплоемкость была определена из условия равенства тепловых потоков, поступающих к эталонному и исследуемому образцу, и изменяющих их температуру пропорционально их удельной теплоемкости. Для вычисления удельной теплоемкости был применен метод отношений (Рисунок 3.20):

$$C_p^{обр} = C_p^{калибр} \cdot \frac{m^{калибр} (P_{обр} - P_{коррекция})}{m^{обр} (P_{эт} - P_{коррекция})},$$

где  $P_{обр}$  – мощность тепловыделения (поглощения) исследуемого образца при заданной температуре, Вт;  $P_{коррекция}$  – мощность тепловыделения (поглощения) двух пустых тиглей при заданной температуре, Вт;  $P_{эт}$  – мощность тепловыделения (поглощения) эталонного образца при заданной температуре, Вт;  $C_p^{обр}$  – удельная теплоемкость исследуемого образца при заданной температуре, Дж/(г·К);  $C_p^{калибр}$  – удельная теплоемкость эталонного образца при заданной температуре, Дж/(г·К);  $m^{калибр}$  – масса эталонного образца, г;  $m^{обр}$  – масса исследуемого образца, г.

Определение плотности образцов модифицированного материала реализуется методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 15139-69 «Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)» при помощи аналитических весов с комплектом для определения плотности. Для выполнения измерений был применен способ гидростатического взвешивания твёрдых [81], включающий в себя определение массы тела, погружение тела в

емкость с рабочей жидкостью, уравнивание тела до достижения гидростатического состояния, определение выталкивающей силы и последующий расчет плотности тела по отношению его массы к объему, рассчитанному исходя из значений выталкивающей силы и плотности рабочей жидкости (Рисунок 3.21). Для повышения технологичности и точности измерений проводится взвешивание тела, подвешенного на гибкой подвеске и обнуление показаний электронных весов перед его погружением в емкость с жидкостью. Значение выталкивающей силы определяется по показаниям весов, после погружения тела, подвешенного на гибкой подвеске, в емкость с жидкостью.



- 1 – измерение базовой линии прибора; 2 – измерение исследуемого материала;  
 3 – измерение эталонного образца, 4 – температурная программа;  
 а, б – изотермический сегмент;

Рисунок 3.20 – Изменение мощности тепловыделения в зависимости от времени и температуры

Для проведения экспериментального исследования необходимо изготовить серии образцов различного вида типоразмеров, соответствующих каждому из направлений исследований. Типоразмеры образцов, используемые в настоящей работе представлены на Рисунке 3.22.

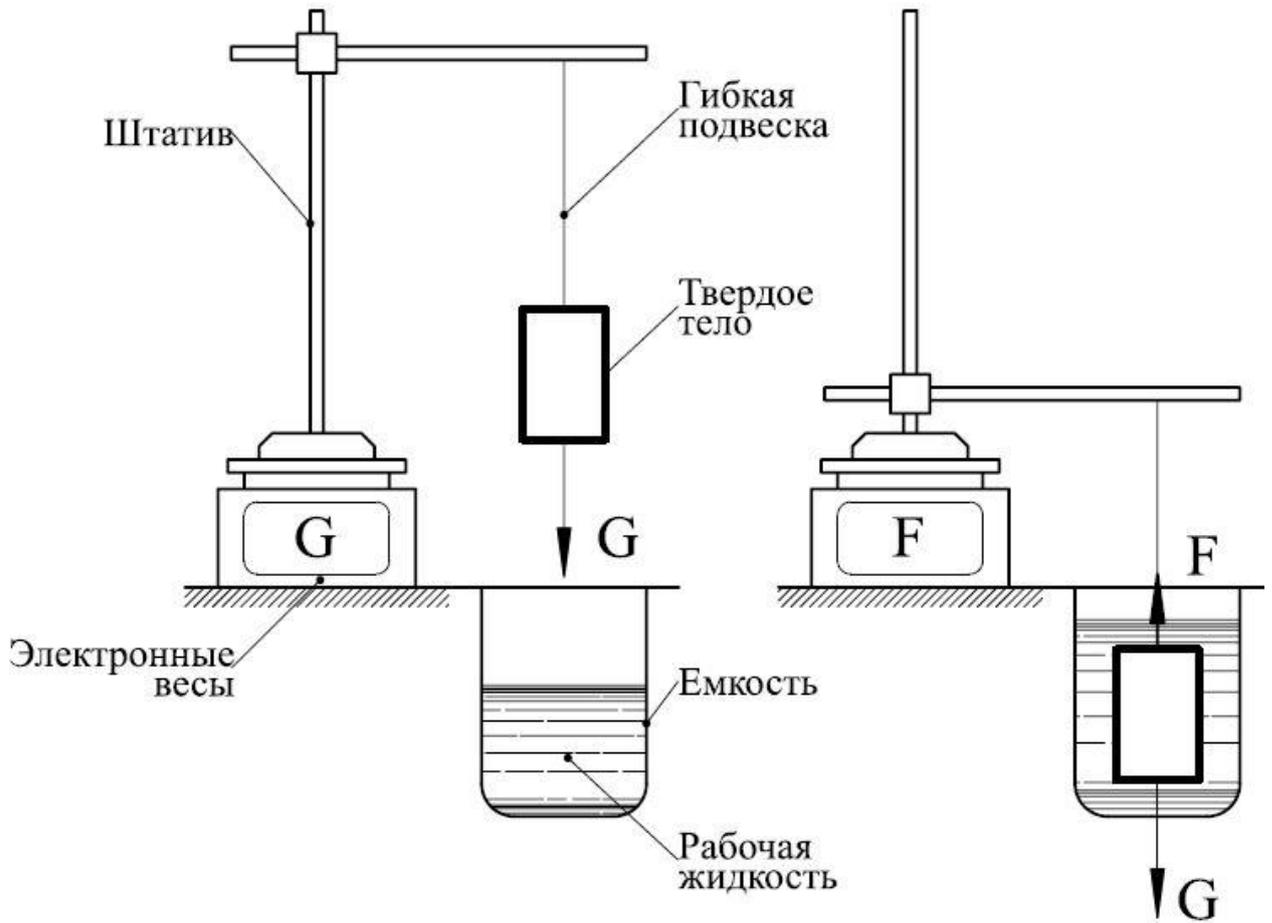
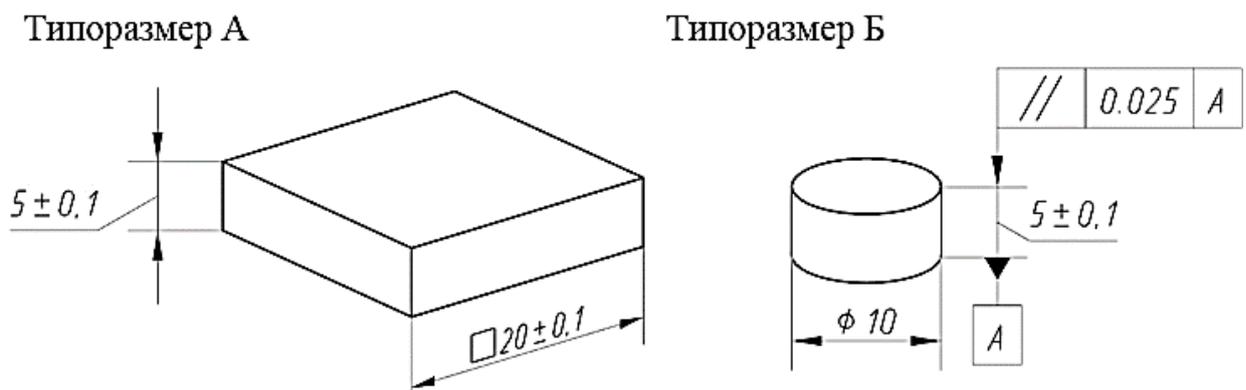


Рисунок 3.21 – Схема гидростатического взвешивания



Типоразмер А – образцы для определения плотности; Типоразмер Б – образцы для определения теплопроводности и теплоемкости

Рисунок 3.22 – Типоразмеры образцов, используемые для проведения экспериментальных исследований

### **3.5. Технологические средства и методы изготовления экспериментальных образцов модифицированных материалов**

Изготовление экспериментальных образцов модифицированных полимерных КМ требует решения задачи обеспечения технологического процесса введения наноразмерных структур в объем реактопластичного связующего. Критическим фактором, определяющим технологичность метода модификации, является способность равномерного распределения наноразмерных структур в объеме связующего. Отсутствие однородности при введении модификатора приводит к образованию локальных уплотнений, размерность которых может на порядки превышать характеристический размер модификатора. Следствием этого может стать образование участков повышенной концентрации, которые являются концентраторами напряжений, снижающими физико-механические характеристики материала, а также, приводящими к хаотической неоднородности распределения теплового потока. Совокупность факторов, обуславливающих нетехнологичность процесса модификации приводит к нецелесообразности использования материала при производстве конечных изделий.

Наиболее эффективным методом обеспечения равномерности распределения наноструктур в объеме полимерного связующего является ультразвуковая гомогенизация. Гомогенизация осуществляется путем диспергирования суспензий за счет воздействия ультразвука на связанные агломераты частиц модификатора

Принцип работы ультразвукового диспергатора заключается в преобразовании электрической энергии промышленной частоты в энергию ультразвуковой частоты. Далее колебательная система преобразует энергию в механическую и передает в обрабатываемую среду через волновод. Механическая энергия, распространяющаяся в жидкой среде, вызывает кавитационный процесс, сопровождающийся образованием кавитационных пузырей, а также интенсивных потоков жидкости, что в свою очередь обеспечивает эффективность процесса гомогенизации [60].

Аппаратная реализация принципа действия ультразвукового диспергатора обеспечивается путем взаимодействия следующих компонентов: ультразвуковой электрический генератор, ультразвуковой магнестрикционный преобразователь, корпус проточного ультразвукового смесителя, ультразвуковой волновод. Структурная схема работы проточного ультразвукового диспергатора представлена на Рисунке 3.23.

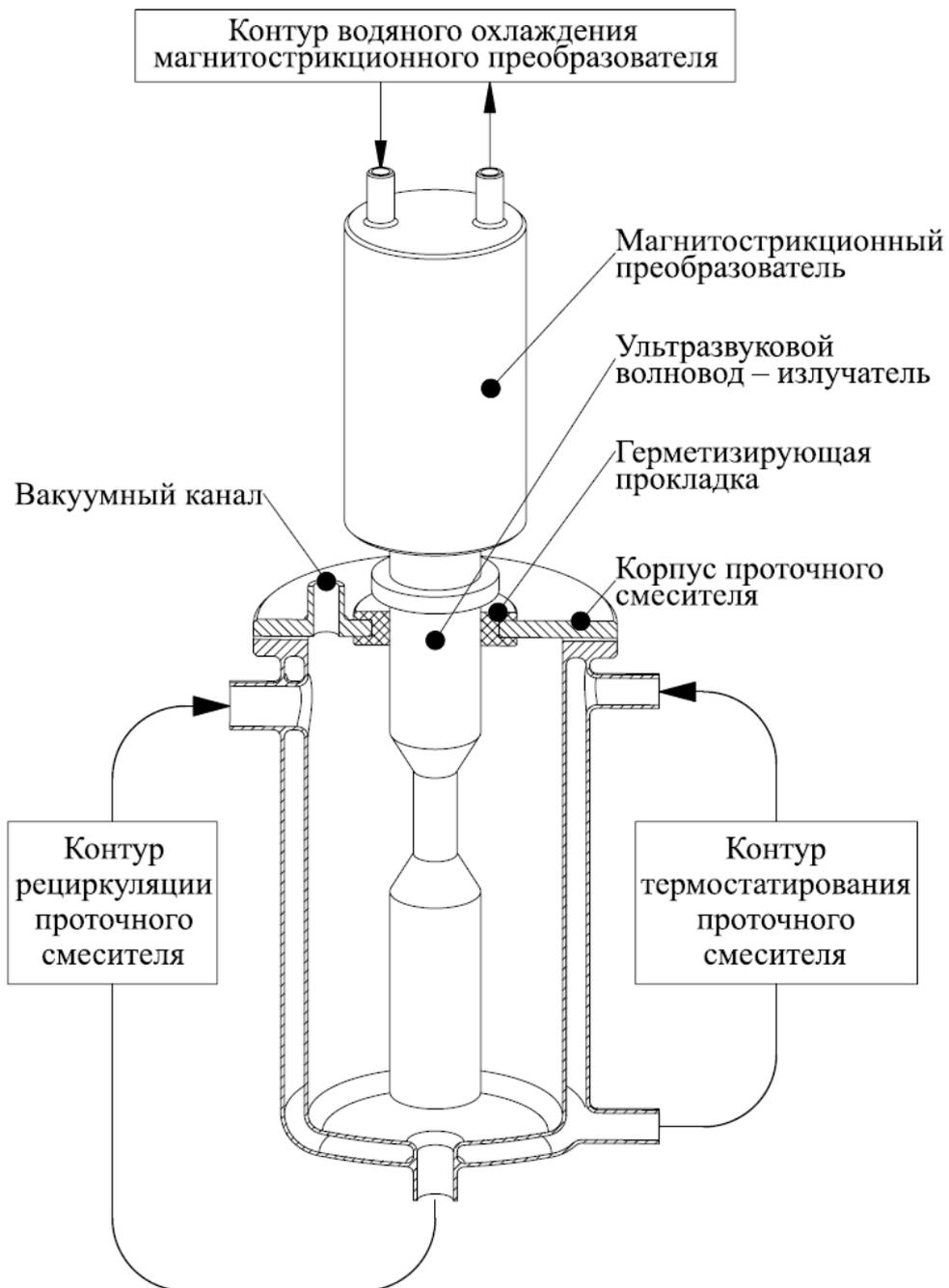


Рисунок 3.23 – Структурная схема ультразвукового диспергатора

В работах [27 – 28, 89 – 91] показано, что оптимальным является воздействие на смесь наночастиц с жидкой смолой несколькими короткими импульсами ультразвуковых колебаний, общей длительностью не превышающей 100 секунд. При этом обязательным условием является обеспечение температуры смеси в диапазоне, не приводящем к деградации свойств и термической деструкции.

Обеспечение оптимальных показателей гомогенизации требует выполнения процедур, оптимизирующих технологические параметры переработки компонентов процесса модификации. Многие конструкционные реактопластичные полимеры обладают вязкостью, слишком высокой для непосредственного введения наноразмерных модификаторов. В связи с этим используется специальная жидкость-растворитель, в которой возможно реализовать предварительную гомогенизацию, после чего осуществить модификацию более вязкой среды [69, 77].

Технологическая подготовка процесса модификации реализуется следующим образом. Рассчитанное количество модификатора в диапазоне концентраций от 0,001 до 30 % массовой доли обезвоживают и вводят в матрицу (растворитель), имеющую рекомендуемую вязкость не более 150 сП. Полученную суспензию заливают в емкость для ультразвуковой обработки, после чего начинают процесс ультразвукового диспергирования. Параметры ультразвукового воздействия подбирают в зависимости от количества модификатора в основе, объема этой основы и т.п. Так как в процессе диспергирования происходит разогревание смеси, его проводят при непрерывном охлаждении на водяной бане с поддержанием постоянной комнатной температуры. Время диспергирования варьируется от 5 минут до 12 часов в зависимости от количества и типа вводимого модификатора. Время диспергирования каждый раз определяется экспериментально, а именно окончание реакции, например, отслеживают методом оптической микроскопии высокого разрешения. Фиксируют наличие частиц размером больше микрона, и когда они перестают обнаруживаться, диспергирование считается законченным [77].

Предложенное технологическое решение по модификации реактопластичного связующего защищено Патентом на изобретение № 2522884

«Способ получения наномодифицированного связующего», зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21.05.2014г. [77].

Процесс ультразвукового диспергирования неразрывно связан с формированием включений газа в объеме обрабатываемой среды. Этот процесс обусловлен комплексом технологических факторов, возникающих в процессе обработки, таких как кавитация, выпаривание растворителей, циркуляция в проточном контуре и т.д. Поровое пространство является фактором, приводящим к снижению теплофизических и физико-механических свойств материала, в связи с чем следующим обязательным этапом является дегазация связующего.

Кроме того, существенным фактором, определяющим технологичность процесса ультразвуковой переработки вязких пластичных сред является возможность обеспечения оптимальных режимов термостатирования. Температура диспергируемой среды отвечает за два принципиально значимых фактора: динамическая вязкость и время гелеобразования связующего. Взаимосвязь динамической вязкости, температуры среды и времени гелеобразования носит нетривиальный характер и зависит от многих производственных факторов, оптимальный учет влияния которых делает обоснованным применение методов нейросетевого моделирования.

Таким образом, условием оптимального технологического обеспечения модификации реактопластичных полимеров является возможность термостатирования и вакуумирования зоны диспергации. Это может быть обеспечено конструктивным исполнением корпуса проточного смесителя и применение дополнительных единиц оборудования – термостатов и вакуумных насосов. Альтернативным способом обеспечения условий переработки в лабораторных условиях является последовательное выполнение технологических операций на отдельных участках. Данный способ применим для изготовления малых объемов модифицированных материалов, необходимых для проведения лабораторных исследований.

После формирования структуры модифицированного материала стоит вопрос его формообразования. Формообразование анизотропных структур требует

минимизации операций по механической обработке с целью сохранения целостности армирующей структуры. В связи с этим становится актуальным применение методов и средств, альтернативных традиционным, заключающимся в формировании заготовки с последующей механической обработкой.

Обеспечение изготовления образцов модифицированного материала может быть реализовано за счет применения Устройства для изготовления образцов из литевых отверждающихся смол (Патент на изобретение № 2508176, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27.02.2014г.) [78].

Конструктивно, Устройство для изготовления образцов из литевых отверждающихся смол представляет собой разъемный полый корпус, в котором посредством проставок образован литниковый канал, предназначенный для формования образцов (Рисунок 3.24). Корпус образован разъемными боковыми стенками, верхней и нижней крышками, прикрепленными к боковым стенкам. Проставки в корпусе установлены с возможностью съема. Сверху и снизу относительно каждой проставки установлен ограничитель, имеющий возможность возвратно-поступательного перемещения относительно проставки, при этом в верхней крышке предусмотрены элементы, один из которых предназначен для соединения литникового канала с емкостью для материала образцов, а другой – для соединения литникового канала с вакуумным насосом. [78]

Метод применения устройства заключается в заполнении замкнутого контура литниковой формы устройства связующим, за счет создания отрицательной разности давлений. При этом, технологические особенности применения устройства позволяют проводить предварительное вакуумирование технологических каналов литевой формы, что в свою очередь обеспечивает снижение вероятности возникновения дефектов за счет формирования воздушных включений. Схема изготовления образцов с использованием устройства показана на Рисунке 3.25.

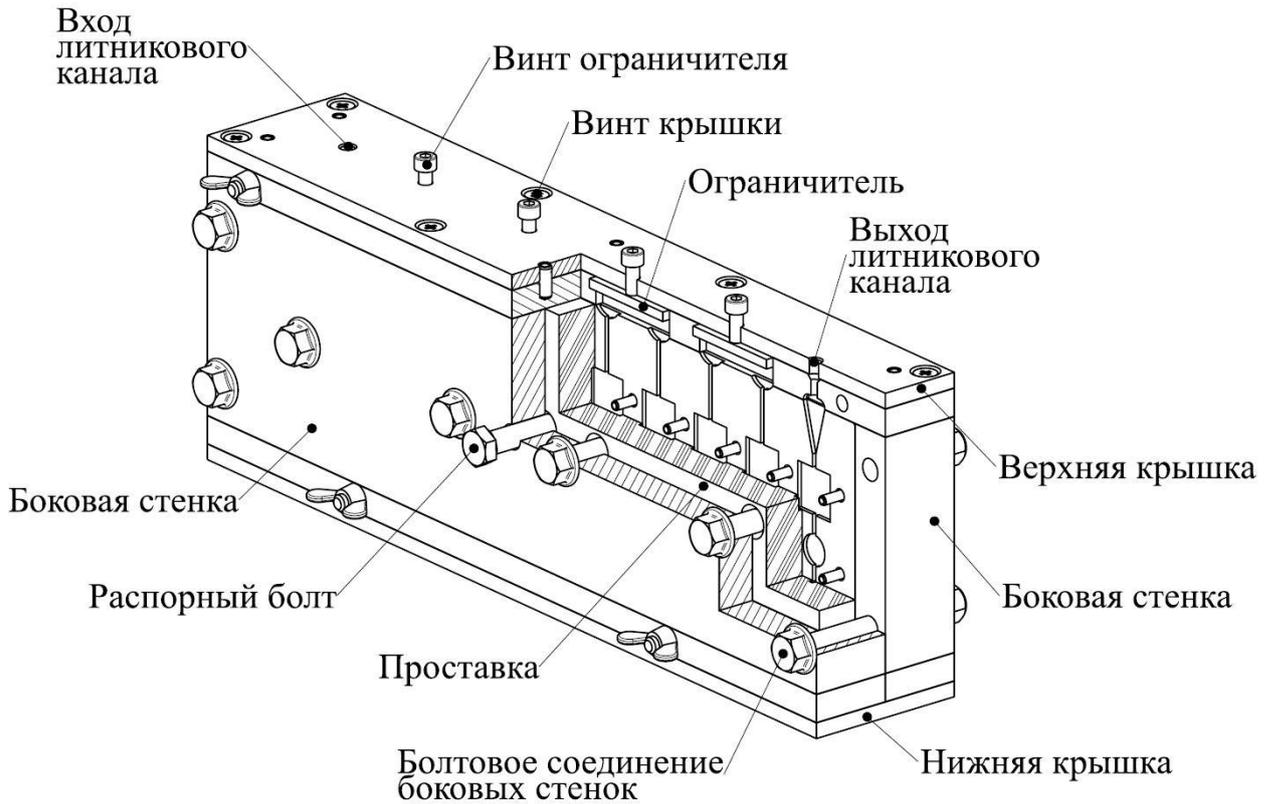


Рисунок 3.24 – Конструкция Устройства для изготовления образцов из литевых отверждающихся смол

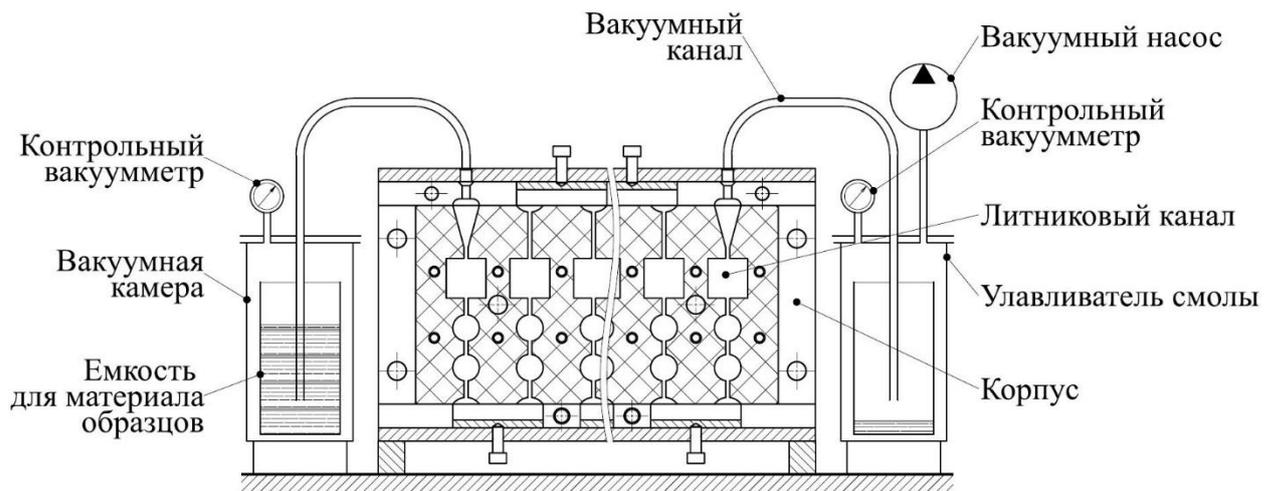


Рисунок 3.25 – схема применения Устройства для изготовления образцов из литевых отверждающихся смол

Заключительными этапами изготовления образцов являются технологические операции по отверждению, извлечению полимеризованных образцов из литевой формы, кондиционированию и механической обработке. Особенности их проведения индивидуальны и формируются исходя из физико-химических свойств и технологических особенностей применяемых материалов.

### 3.6. Выводы и заключения

В результате выполненной работы достигнуты следующие основные результаты:

1) Сформулирована задача идентификации теплофизических характеристик модифицированного композиционного материала.

2) Проведено математическое моделирование теплофизических характеристик модифицированных композиционных материалов. Определены и обоснованы геометрические параметры элементарной ячейки, используемой в процессе моделирования. Проведен анализ влияния геометрических параметров включений их ориентации и концентрации на теплопроводность элементарных ячеек;

3) Сформирована нейросетевая модель идентификации целевых свойств и технологических параметров переработки композиционных материалов. Проведена оптимизация ключевых элементов и структуры модели;

4) Определен инструментарий и сформирована метод экспериментальных исследований теплофизических характеристик экспериментальных образцов;

5) Разработаны технологические средства и методы изготовления экспериментальных образцов модифицированных материалов.

Отдельные результаты выполненных работ представлены в виде следующих результатов интеллектуальной деятельности:

1) Патент на изобретение № 2508176 «Устройство для изготовления

образцов из литевых отверждающихся смол», зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27.02.2014г.;

2) Патент на изобретение № 2522884 «Способ получения наномодифицированного связующего», зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21.05.2014г.

## **Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АПРОБАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

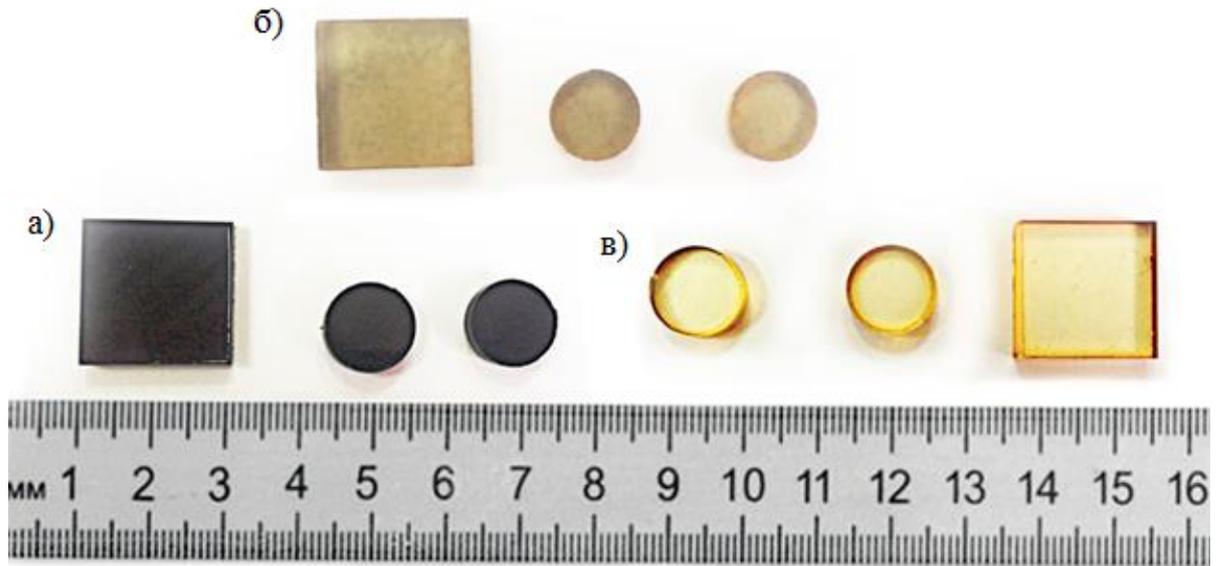
### **4.1. Формирование базы данных экспериментальных исследований целевых характеристик с вариацией технологических параметров переработки**

Для моделирования теплофизических характеристик с помощью искусственных нейронных сетей были изготовлены и исследованы серии экспериментальных образцов реактопластичных полимеров, модифицированных наноразмерными углеродными структурами. Достоверность получаемых статистических выводов возрастает при увеличении объема исследуемой выборки. В том случае, когда наблюдаемые величины распределены по нормальному закону, либо несильно отличается от нормального, то методы расчета статистических характеристик по выборочным данным, согласно ГОСТ Р 50779.21, остаются применимыми для большинства практических приложений при объеме выборок не менее 10 единиц. Таким образом, экспериментальные образцы изготавливались в количестве 10 комплектов каждой серии. Измеренное значение определялось как среднее арифметическое, при вариации значений определяемой величины в диапазоне, не превышающем 10%. Образцы с различным содержанием массовой доли модификатора представлены на Рисунке 4.1.

Экспериментальные исследования тепло- и температуропроводности осуществлялись методом лазерной вспышки в широком интервале температур с использованием анализатора температуропроводности и теплопроводности LFA 427, производитель NETZSCH-Gerätebau GmbH, Германия, внесен в Государственный реестр средств измерений РФ под № 41647-09.

Экспериментальные исследования теплоемкости производились на Универсальном дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204 F1 Phoenix, производитель NETZSCH-Gerätebau GmbH, Германия, внесен в

Государственный реестр средств измерений РФ под № 54912-13. Определение плотности экспериментальных образцов путем гидростатического взвешивания было выполнено с применением аналитических весов AD-1653 с комплектом для определения плотности AND GH-252 методом гидростатического взвешивания, производитель «A&D Company Limited», Япония, внесены в Государственный реестр средств измерений РФ под № 28101-04.



а) УНТ 0,5% массовой доли; б) УНТ 0,1% массовой доли; в) без модификатора;  
Рисунок 4.1 – Образцы для проведения экспериментальных исследований

В результате экспериментальных исследований были получены значения теплопроводности модифицированных реактопластичных полимеров с диапазоном вариации массовой доли модификатора составил от 0 до 0,8%, с шагом в 0,1%. При этом, была обеспечена вариация уровня вакуума в процессе диспергации, в диапазоне от 0 (нормальные условия) до 80 (-1)·кПа (Рисунок 4.2). Температура связующего в процессе диспергации является технологическим параметром, изменение которого оказывает влияние на конечное значение теплопроводности. Изменение температуры оказывает влияние на вязкость среды и длительность фазовых переходов. Для исследования влияния температуры связующего при модификации на теплопроводность, была обеспечена вариация температуры связующего в диапазоне от 23 °С (нормальные условия) до 70 °С (Рисунок 4.3).

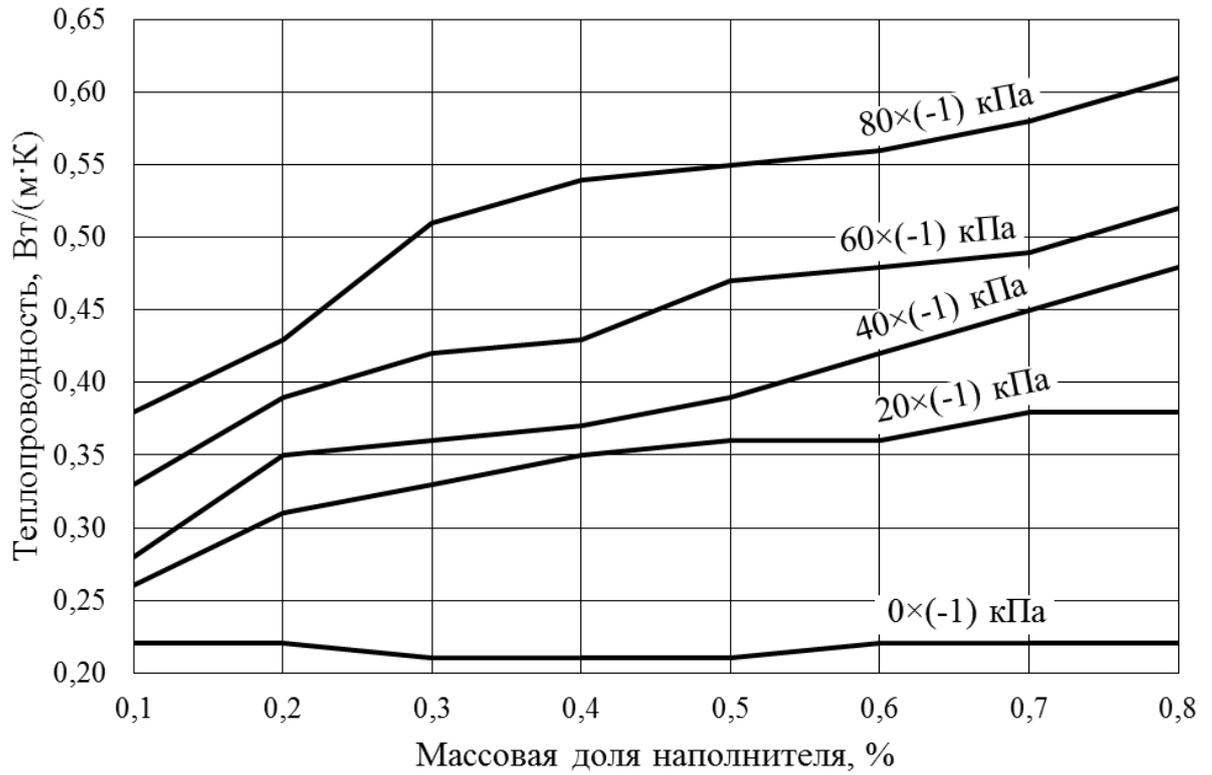


Рисунок 4.2 – Зависимость теплопроводности образцов наномодифицированного связующего от массовой доли УНТ

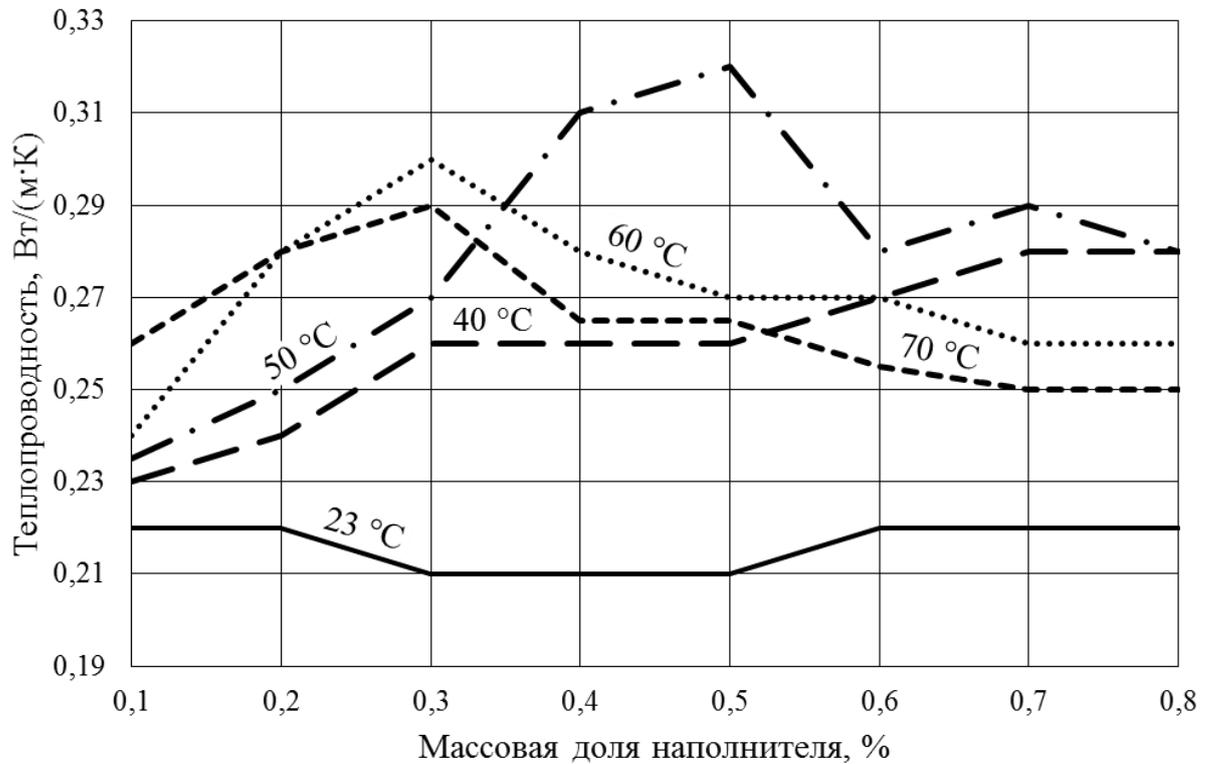


Рисунок 4.3 – Зависимость теплопроводности образцов наномодифицированного связующего от массовой доли УНТ

Обеспечивая одновременную вариацию массовой доли наполнителя, в диапазоне от 0 до 0,8 %, температуры связующего в процессе модификации в диапазоне от 23 °С (нормальные условия) до 70 °С, а также уровня вакуума в процессе диспергации в диапазоне от 0 (нормальные условия) до 80 (-)кПа, были получены экспериментальные значения теплопроводности реактопластичных полимеров, модифицированных наноразмерными углеродными структурами, в зависимости от совокупной вариации трех технологических параметров. Графическое изображение полученных результатов представлено на Рисунке 4.4. Экспериментальные значения представлены в Таблице 4.1.

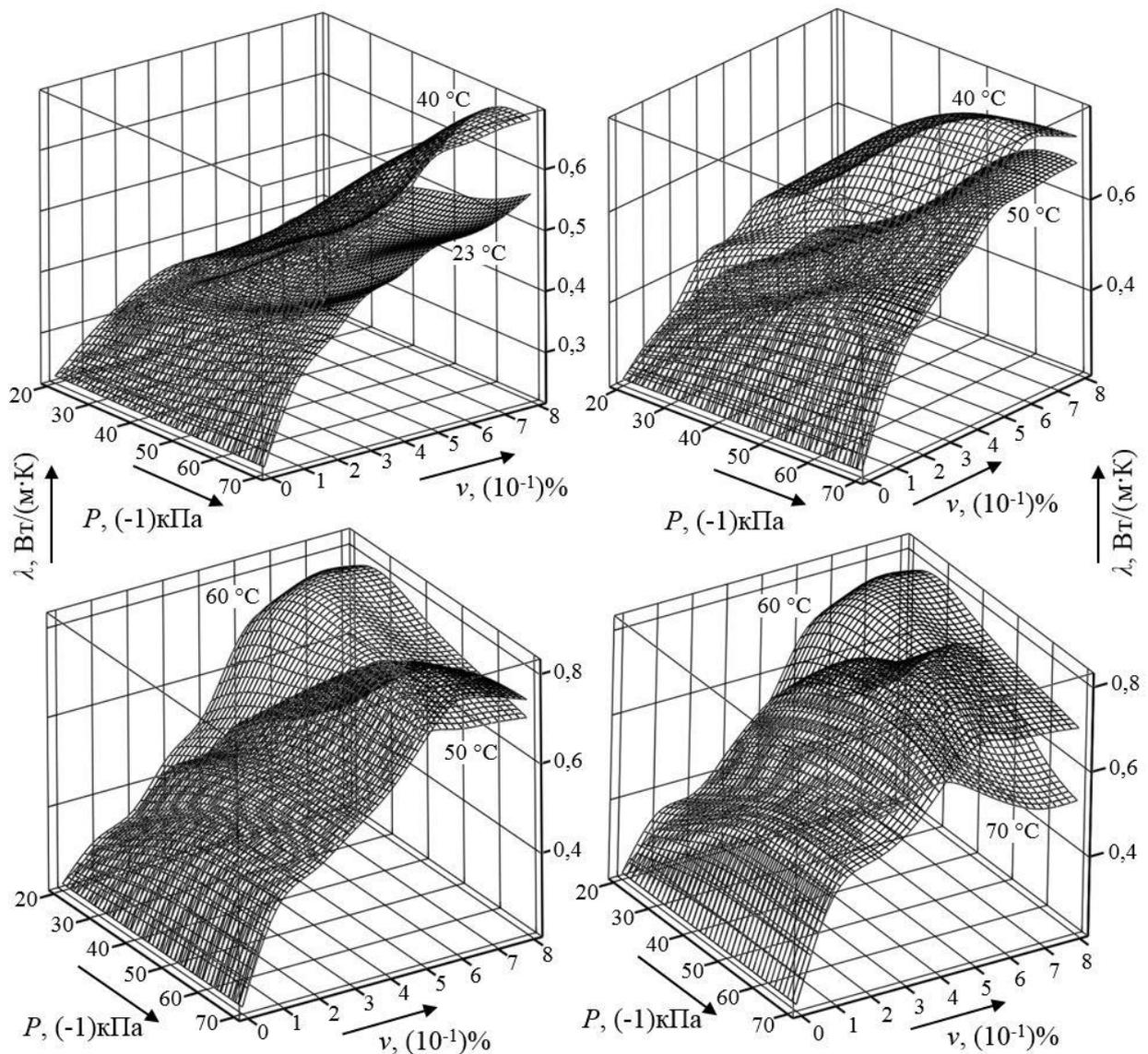


Рисунок 4.4 – Зависимость теплопроводности образцов наномодифицированного связующего от массовой доли модификатора

Результаты исследования теплопроводности образцов наномодифицированного связующего

Массовая доля наполни- теля, %	Температура связующего в процессе модификации, °С																								
	23 °С					40 °С					50 °С					60 °С					70 °С				
	Уровень вакуума, (-1)·кПа																								
	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80
	Теплопроводность, Вт/(м·К)																								
0,0	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
0,1	0,22	0,26	0,28	0,33	0,38	0,23	0,28	0,34	0,37	0,42	0,24	0,29	0,38	0,42	0,44	0,24	0,31	0,42	0,45	0,47	0,26	0,35	0,44	0,47	0,48
0,2	0,22	0,31	0,35	0,39	0,43	0,24	0,32	0,41	0,49	0,48	0,25	0,34	0,45	0,48	0,50	0,28	0,35	0,46	0,51	0,52	0,28	0,37	0,49	0,58	0,62
0,3	0,21	0,33	0,36	0,42	0,51	0,26	0,35	0,42	0,53	0,57	0,27	0,42	0,51	0,54	0,55	0,30	0,45	0,53	0,55	0,56	0,29	0,45	0,58	0,62	0,64
0,4	0,21	0,35	0,37	0,43	0,54	0,26	0,36	0,46	0,57	0,61	0,31	0,43	0,55	0,59	0,63	0,28	0,52	0,64	0,67	0,59	0,27	0,53	0,65	0,69	0,61
0,5	0,21	0,36	0,39	0,47	0,55	0,26	0,35	0,48	0,62	0,68	0,32	0,48	0,64	0,68	0,72	0,27	0,67	0,75	0,78	0,63	0,27	0,56	0,73	0,67	0,58
0,6	0,22	0,36	0,42	0,48	0,56	0,27	0,34	0,47	0,64	0,67	0,28	0,46	0,68	0,78	0,76	0,27	0,73	0,81	0,76	0,67	0,26	0,51	0,71	0,62	0,53
0,7	0,22	0,38	0,45	0,49	0,58	0,28	0,35	0,46	0,66	0,65	0,29	0,45	0,66	0,77	0,75	0,26	0,76	0,78	0,74	0,67	0,25	0,50	0,70	0,58	0,51
0,8	0,22	0,38	0,48	0,52	0,61	0,28	0,34	0,48	0,67	0,65	0,28	0,45	0,64	0,73	0,74	0,26	0,75	0,77	0,72	0,68	0,25	0,51	0,70	0,57	0,52

#### 4.2. Оценка адекватности математической модели теплопереноса в модифицированном композиционном материале

Для определения адекватности предложенной нейросетевой модели было проведено математическое моделирование теплопроводности элементарных ячеек в диапазоне массовой доли наполнителя от 0 до 0,8 % (Рисунок 4.5). Результаты математического моделирования позволяют однозначно говорить о том, что увеличение массовой доли УНТ должно способствовать росту значения теплопроводности. Тем не менее, сопоставление результатов экспериментальных исследований теплопроводности модифицированных композиций с результатами моделирования выявляют принципиальные противоречия в характере зависимости и абсолютных значениях исследуемой зависимости. Отклонение теоретических значений теплопроводности от экспериментальных говорит о радикальном несоответствии фактического состояния образцов гипотезам и упрощениям, заложенным в основу математической модели.

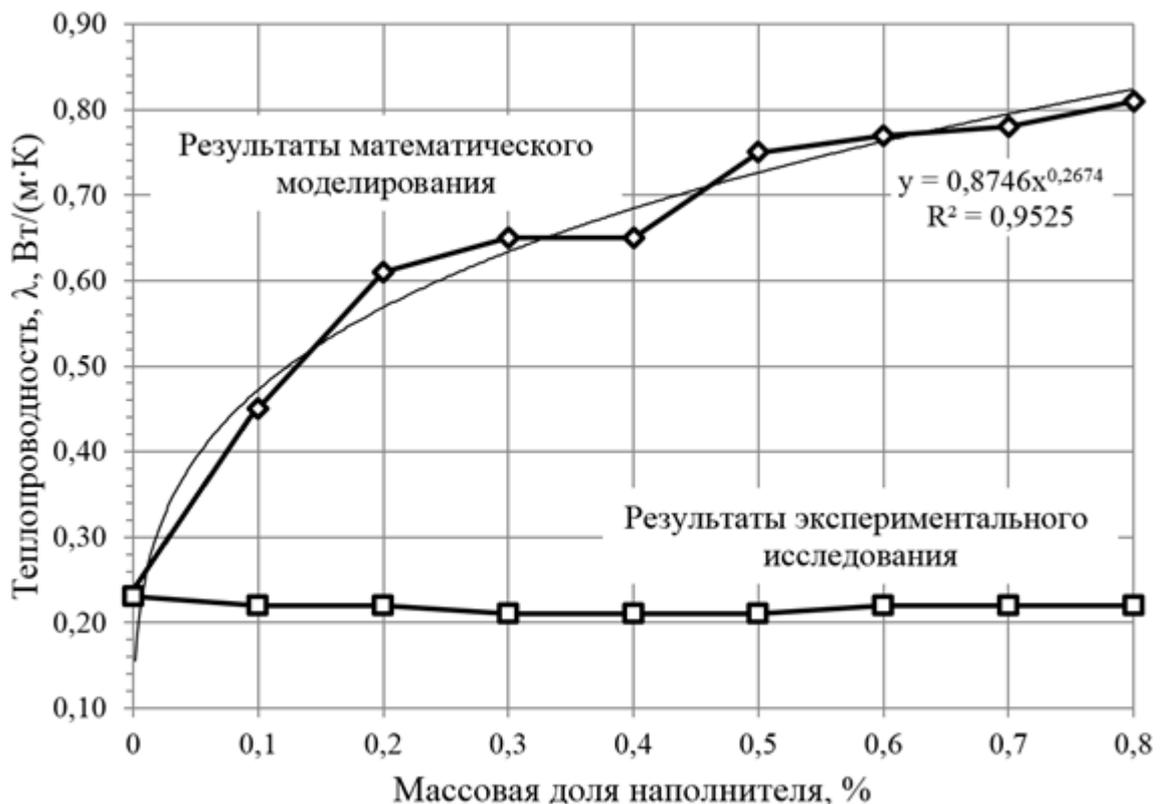


Рисунок 4.5 – Зависимость теплопроводности от массовой доли наполнителя

Структурный анализ наноразмерных модификаторов, используемых в рамках исследования, проведенный ранее в работах [58, 97] с использованием методов растровой электронной микроскопии показал, что фактический диаметр нанотрубок превышает величину, указанную в паспортных данных и используемую при моделировании структуры модифицированного материала, в несколько раз (Рисунок 4.5).

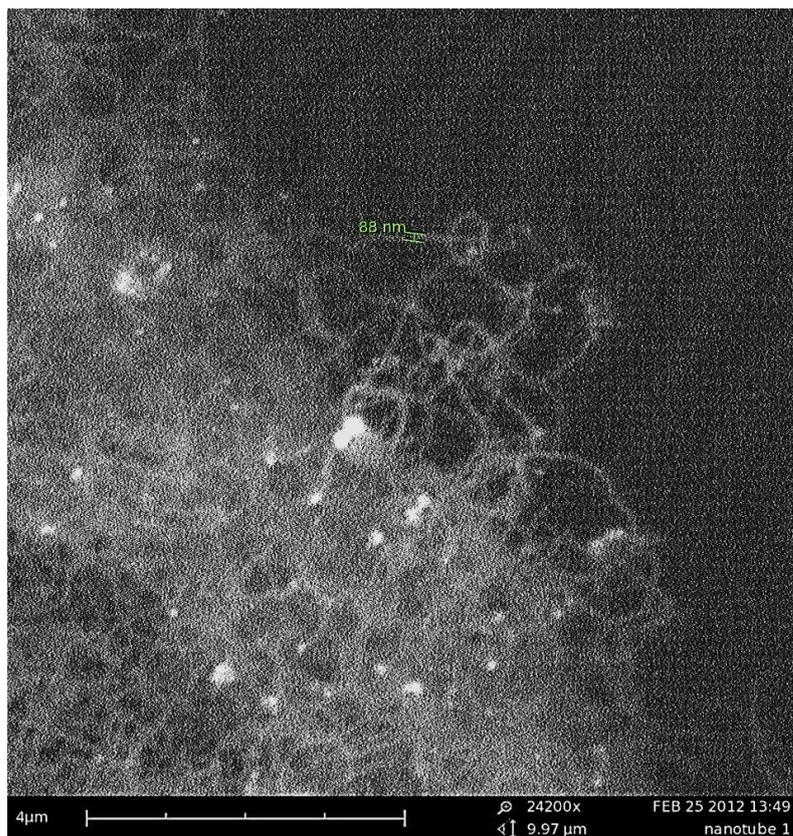
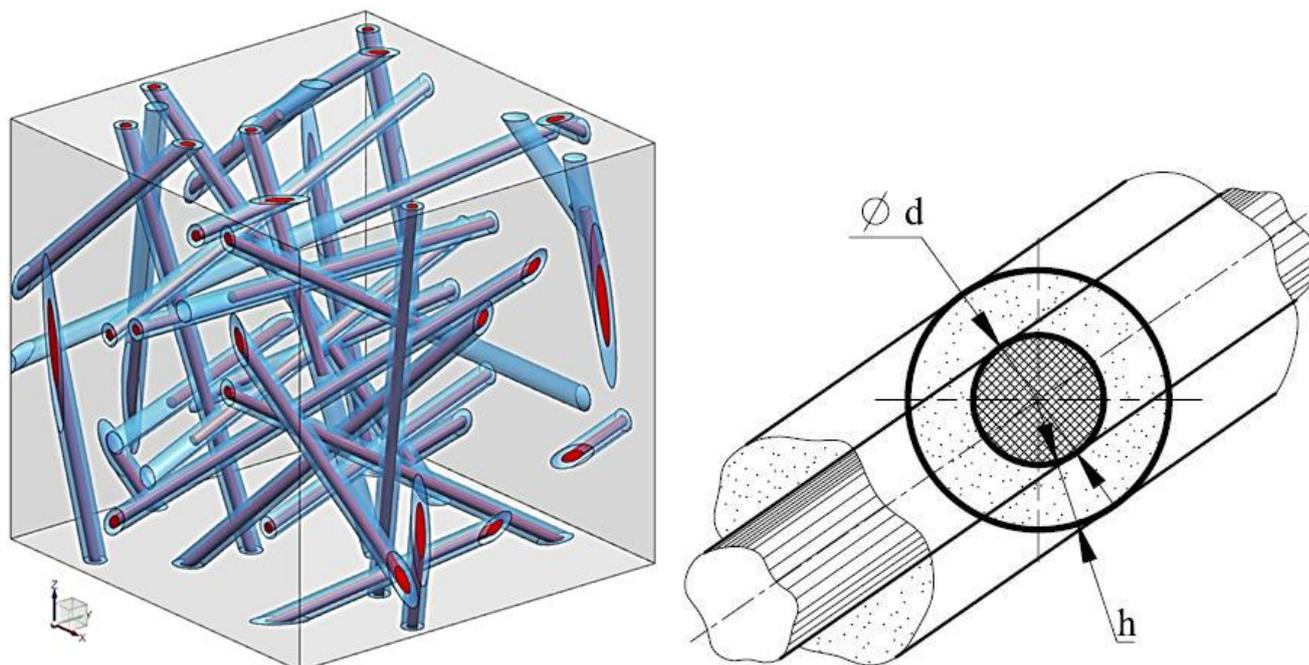


Рисунок 4.5 – Изображение УНТ Baytubes C 150 P, полученное на растровом электронном микроскопе [97]

Увеличенный диаметр нанотрубок может быть обусловлен наличием витиеватой структуры, образованной на поверхности трубок на атомарном уровне в процессе изготовления. Справедливо предположить, что наличие подобного рода структуры не позволяет связующему взаимодействовать со всей площадью поверхности нанотрубки. Таким образом, интерес для дальнейшего исследования представляет оценка влияния воздушных включений на теплофизические характеристики наномодифицированного материала.

Для оценки влияния воздушных включений на теплофизические характеристики материала, модифицированного углеродными наноразмерными структурами, были построены твердотельные модели элементарных ячеек с воздушной оболочкой вокруг цилиндрических включений УНТ (Рисунок 4.6). Физические характеристики, используемые при определении параметров воздушных включений, приведены в Таблице 4.2.



$d$  – диаметр цилиндрических включений УНТ,  $h$  – толщина воздушных включений (оболочки);

Рисунок 4.6 – Твердотельная модель элементарной ячейки с воздушной оболочкой вокруг цилиндрических включений УНТ

Таблица 4.2

Параметры воздушных оболочек цилиндрических включений, используемые при построении моделей хаотически армированных элементарных ячеек

№	Наименование параметра	Единица изменения	Значение
1.	Плотность сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении (101323 Па) и температуре 20 °С	кг/м <sup>3</sup>	1,2047
2.	Коэффициент теплопроводности воздуха при нормальном атмосферном давлении (101323 Па) и температуре 20 °С	Вт/(м·К)	0,0249

Воздушные оболочки были построены для рассматриваемых ранее хаотически армированных моделей элементарных ячеек, с массовой долей включений от 0,1 до 0,8% с шагом 0,1%. Для определения влияния воздушных включений на характер теплопроводности, была проведена вариация толщины оболочки в диапазоне от 10 до 50% диаметра нанотрубки. Зависимость теплопроводности от концентрации нанотрубок, для различной толщины воздушных оболочек включений, представлена на Рисунке 4.7.

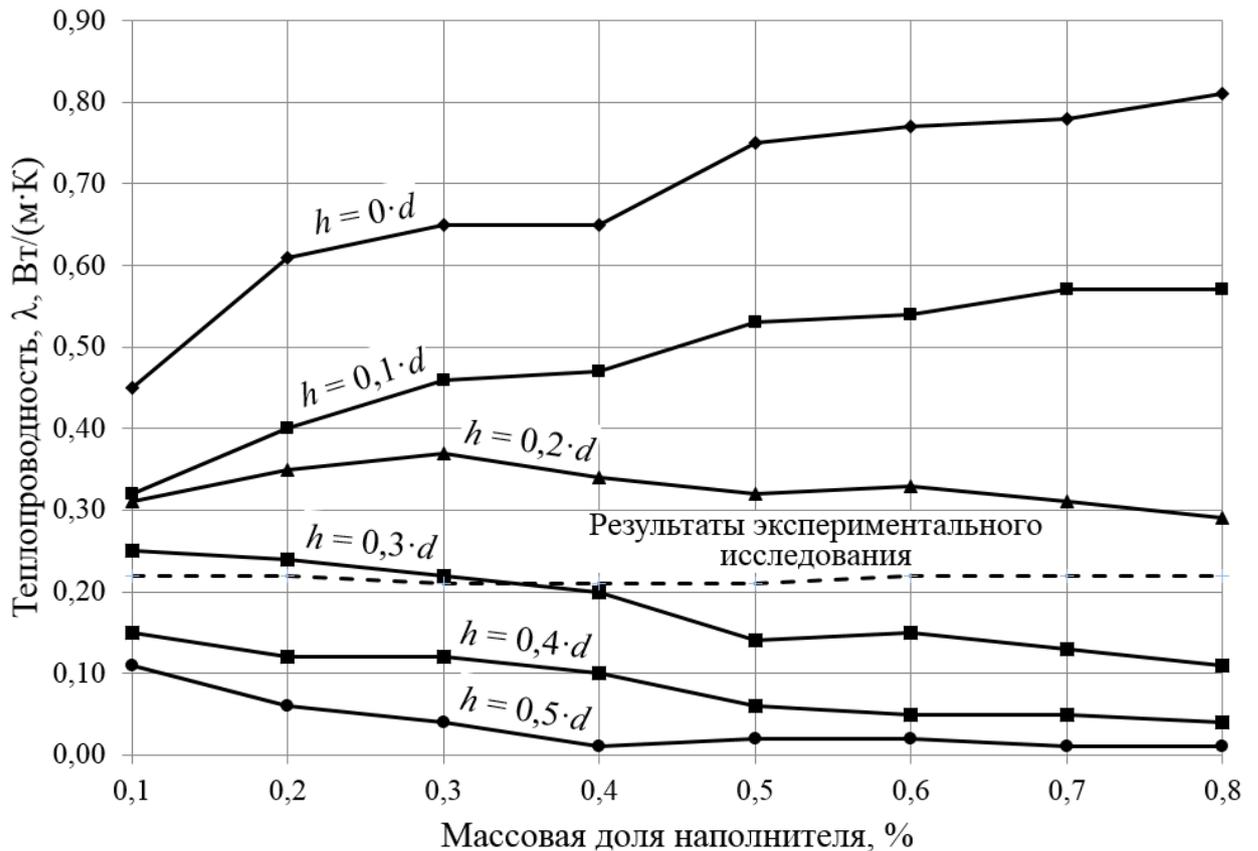


Рисунок 4.7 – Зависимость теплопроводности от массовой доли УНТ для наномодифицированного эпоксидного связующего

Как видно из рисунка 4.7, наиболее приближена к экспериментальным значениям теплопроводности модель элементарной ячейки связующего с толщиной воздушных включений, равной 30% от диаметра нанотрубки. Разность полученных и целевых значений теплопроводности, полученной по результатам математического моделирования и результатов экспериментального исследования представлена на Рисунке 4.8.

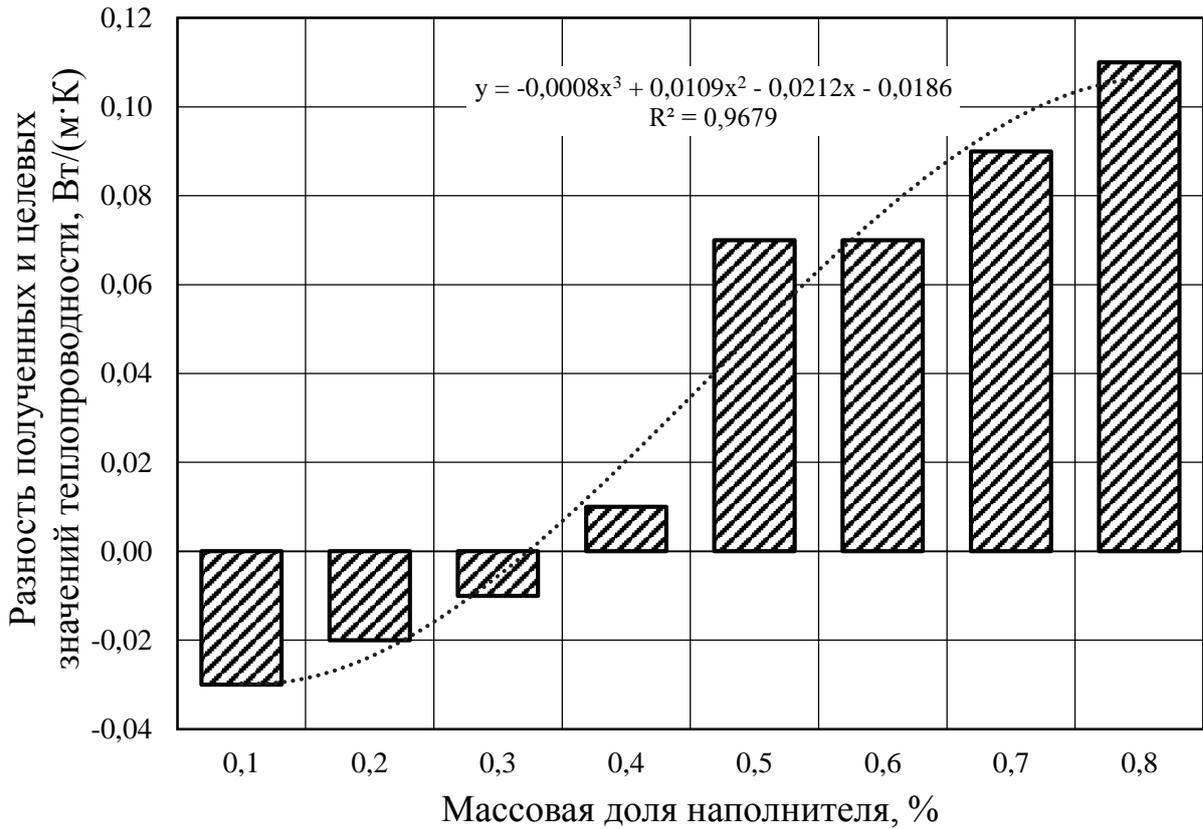


Рисунок 4.8 – Разность значений теплопроводности, полученных в результате математического моделирования и экспериментальных исследований

Для оценки точности конечно-элементного моделирования для выбранной модели элементарной ячейки связующего с толщиной воздушных включений, равной 30 % от диаметра нанотрубки, далее был проведен статистический анализ распределения абсолютных невязок  $\delta_A$  между результатами моделирования и данными эксперимента. Было установлено, что плотность вероятности абсолютных невязок  $\delta_A$  распределена нормально (Рисунок 3.27) и описывается зависимостью

$$p(\delta_A) = \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_A - \mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right),$$

где математическое ожидание  $\mu_A = -3,22 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), а среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma_A = 5,26 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К).

Для оценки адекватности конечно-элементного моделирования необходимо было перейти от абсолютных погрешностей  $\delta_A$  к погрешностям относительным  $\delta_R$ , для чего значения абсолютных невязок  $\delta_A$  были нормированы относительно

соответствующих экспериментальных значений теплопроводности и проанализированы с позиции параметрической статистики. Результаты анализа представлены графически на рисунке 4.9.

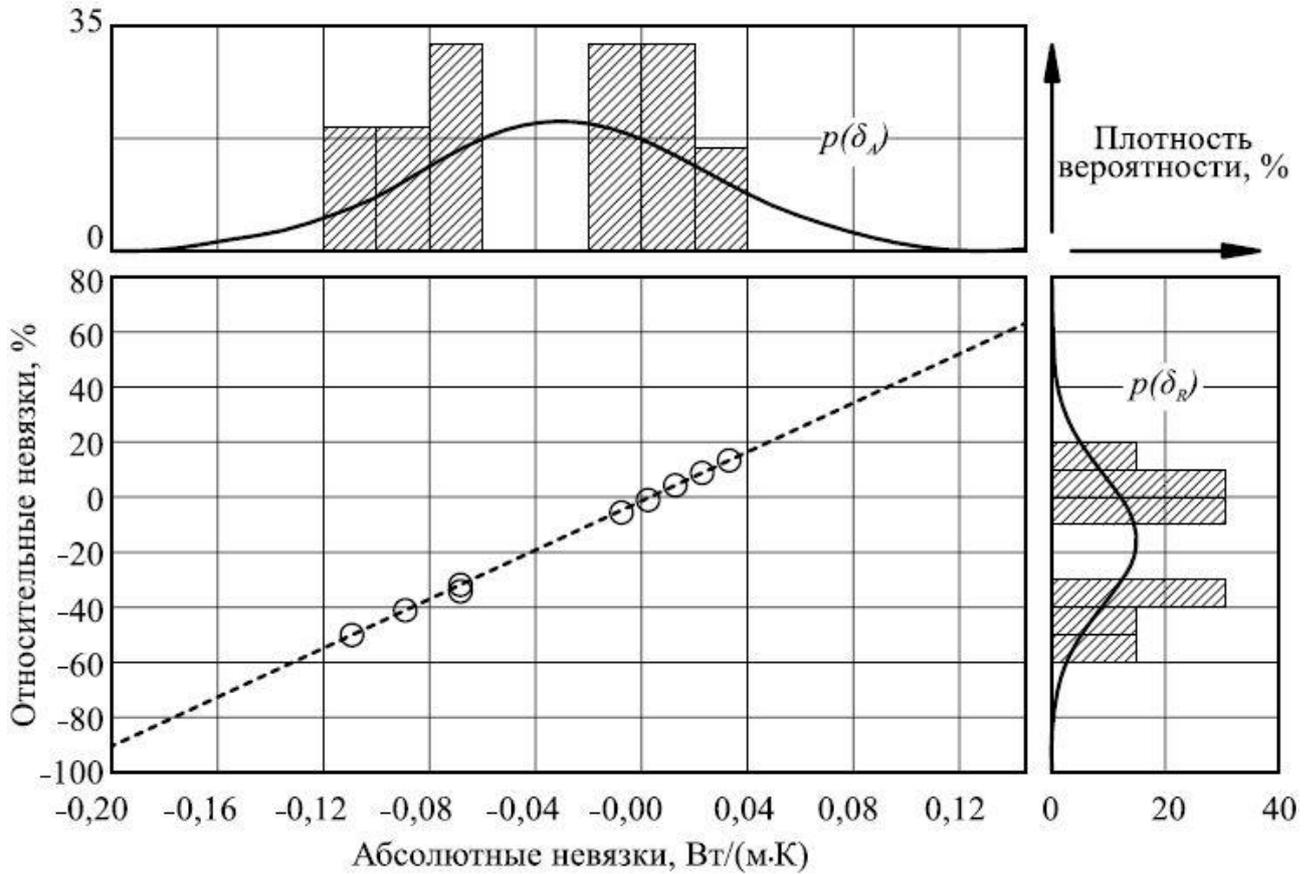


Рисунок 4.9 – Распределение абсолютных  $p(\delta_A)$  и относительных  $p(\delta_R)$  невязок между данными эксперимента и результатами конечно-элементного моделирования. Корреляция функций распределения абсолютных и относительных невязок конечно-элементного моделирования

В результате проведенного анализа установлено, что плотность вероятности относительных невязок  $p(\delta_R)$  также, как и плотность вероятности невязок абсолютных  $p(\delta_A)$ , распределена нормально и может быть описана зависимостью

$$p_R(\delta_R) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_R - \mu_R)^2}{2\sigma_R^2}\right),$$

в которой математическое ожидание  $\mu_R = -14,82\%$ , а СКО  $\sigma_R = 24,07\%$ .

Так как распределения абсолютных и относительных погрешностей конечно-элементного моделирования распределены нормально, то представляется

возможным оценить их взаимную корреляцию. В результате такой оценки установлено, что функции распределений не являются независимыми и с коэффициентом корреляции  $r = 0,99$  могут быть описаны соотношением  $\delta_R = 457,324 \cdot \delta_A - 7,88 \cdot 10^{-2}$ . Графически, корреляция распределений абсолютных и относительных погрешностей конечно-элементного моделирования проиллюстрирована рисунком 3.29.

Таким образом, в изученном диапазоне параметров относительная погрешность  $|\delta_R|$  результатов конечно-элементного моделирования составляет 14,82 %, что позволяет считать выбранные параметры модели элементарной ячейки связующего с толщиной воздушных включений, равной 30 % от диаметра нанотрубки, адекватно описывающими эксперимент.

Точность разработанной модели может быть увеличена путем понижения величины шага вариации толщины воздушной оболочки цилиндрического включения, при последовательном поиске методом наилучшего приближения. Тем не менее, найденное более точное решение не будет обладать практической значимостью ввиду невозможности его реализации в качестве универсального методологического средства моделирования целевых характеристик в виду возникающей необходимости внесения корректировок по результатам выходного контроля каждого единичного продукта, производимого при серийном производстве изделий из модифицированного материала в реальных технологических процессах.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о необходимости внесения корректировок по результатам экспериментальных исследований в математические модели, определяющие целевые свойства КМ, модифицированных наноразмерными структурами. В зависимости от конкретной задачи, обусловленной необходимостью применения анизотропных материалов, процесс их производства требует проведения соответствующих работ по оптимизации технологических параметров. Можно говорить о том, что аналитические методы в данном случае не являются универсальными и экономически эффективными.

### 4.3. Апробация и анализ нейросетевой модели идентификации целевых свойств

Для комплексной оценки предлагаемого метода идентификации целевых свойств и характеристик модифицируемого материала в зависимости от технологических параметров его переработки, был проведен комплекс работ по апробации и исследованию результатов, полученных с использованием разработанной нейросетевой модели.

Наличие экспериментально установленных значений теплопроводности, полученных для модифицированных образцов реактопластичного связующего с вариацией технологических параметров переработки, позволило обеспечить формирование выборок, используемых для обучения, валидации и тестирования нейросетевой модели. Выборка технологических параметров содержала характеристики уровня вакуума, массовой доли наполнителя и температуры связующего в процессе переработки. При этом каждому набору технологических параметров соответствовало значение теплопроводности, в соответствии с результатами, приведёнными в Таблице 4.1.

В процессе обучения, валидации и тестирования нейросетевой модели, значения теплопроводности, полученные в результате моделирования сопоставлялись с значениями теплопроводности, полученными в результате экспериментальных исследований, при этом значения теплопроводности для величины температуры связующего и уровня вакуума  $\{40^{\circ}\text{C}, 20 \cdot (-1) \text{ кПа}\}$ ,  $\{50^{\circ}\text{C}, 40 \cdot (-1) \text{ кПа}\}$ ,  $\{60^{\circ}\text{C}, 60 \cdot (-1) \text{ кПа}\}$  не участвовали в обучении сети и использовались как контрольные. Для визуализации результатов анализа качества сформированной нейросетевой модели, на Рисунке 4.10 представлена постобработка результатов, включающая среднеквадратичную ошибку на валидационном наборе данных для последовательных этапов обучения. Гистограмма распределения ошибок по типам данных и график регрессии выходных данных относительно начальных во время обучения приведены на Рисунках 4.11, 4.12.

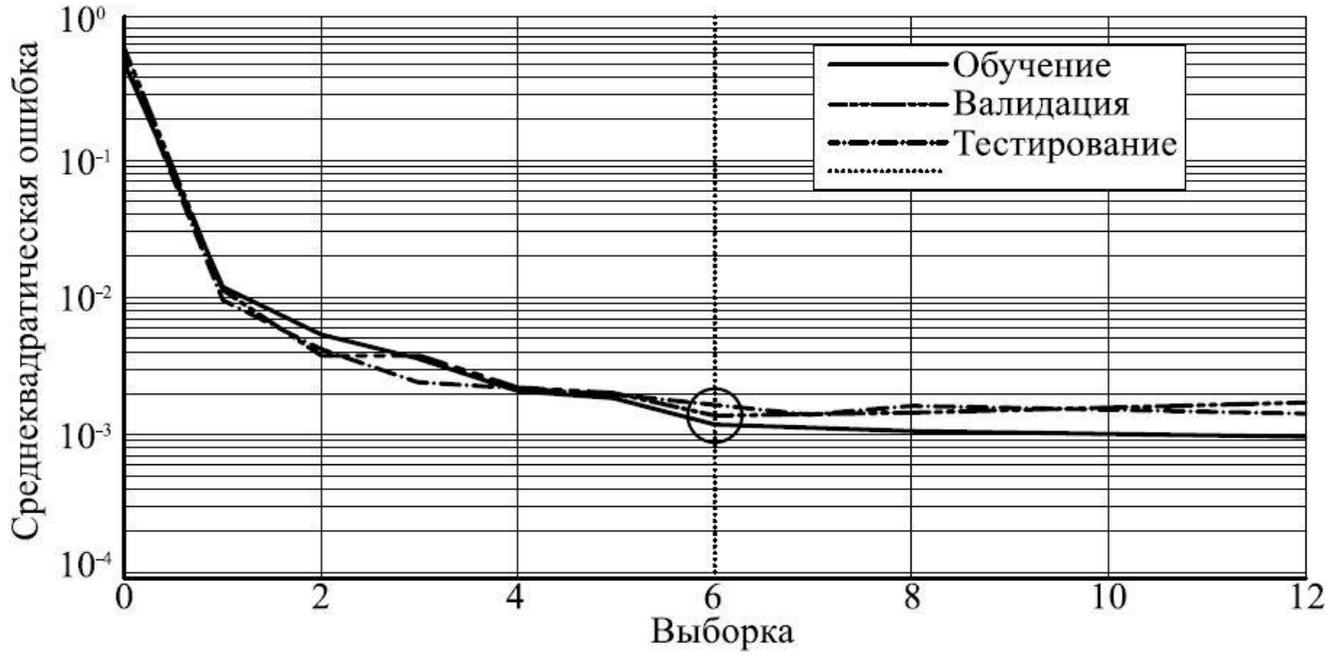


Рисунок 4.10 – Среднеквадратическая ошибка обучения



Рисунок 4.11 – Гистограмма распределения ошибок

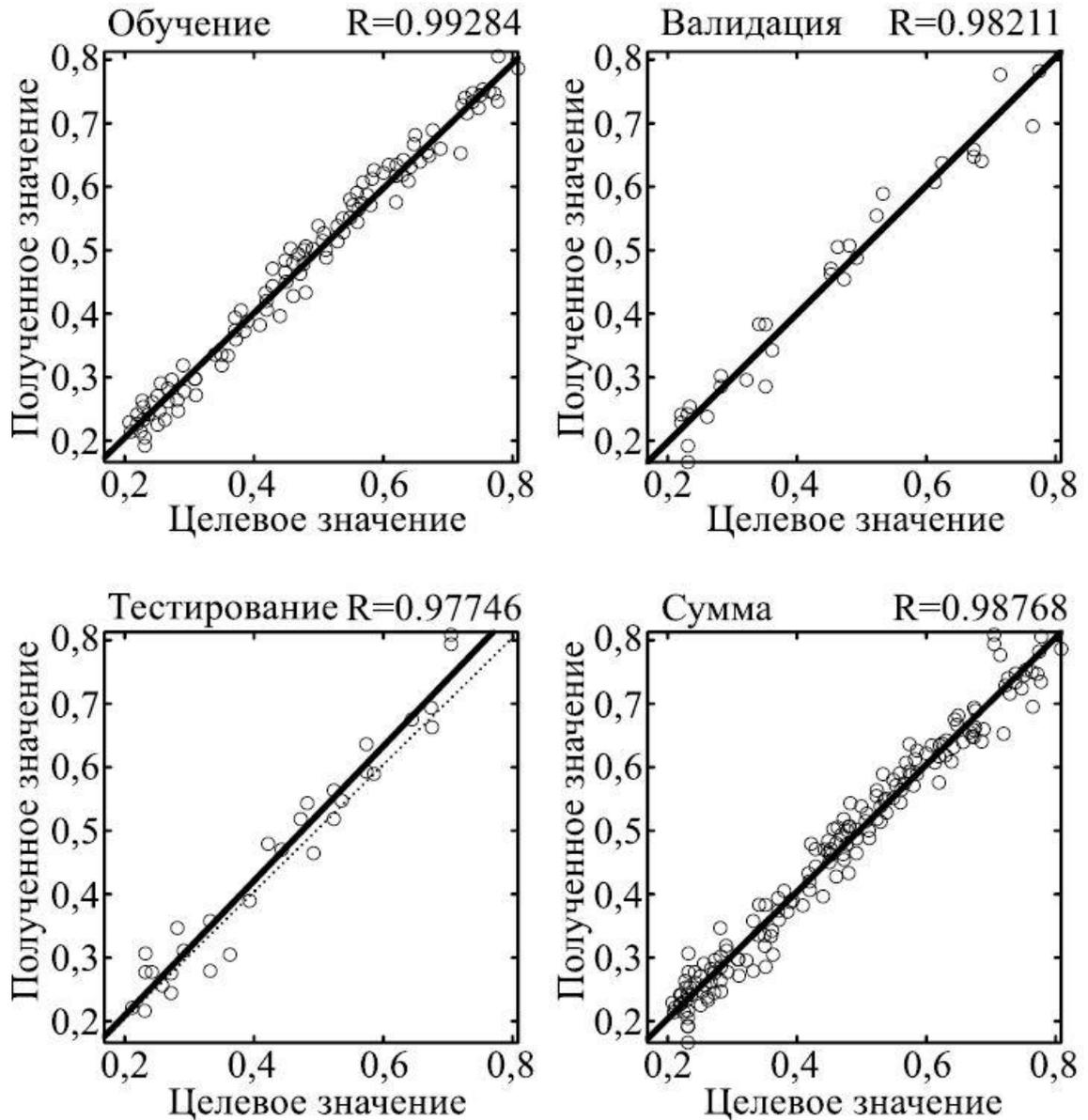


Рисунок 4.12 – Регрессия результатов обучения, валидации и тестирования нейросетевой модели

Как видно из Рисунка 4.12, суммарная сходимость полученных значений по выборкам обучения, валидации и тестирования составляет 98,77%.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на Рисунке 4.13. Для визуального сопоставления с результатами экспериментальных исследований на рисунке отображены контрольные значения (КЗ) в соответствии с данными, приведенными в Таблице 4.1. Результаты, полученные с использованием нейросетевой модели обозначены как ПЗ.

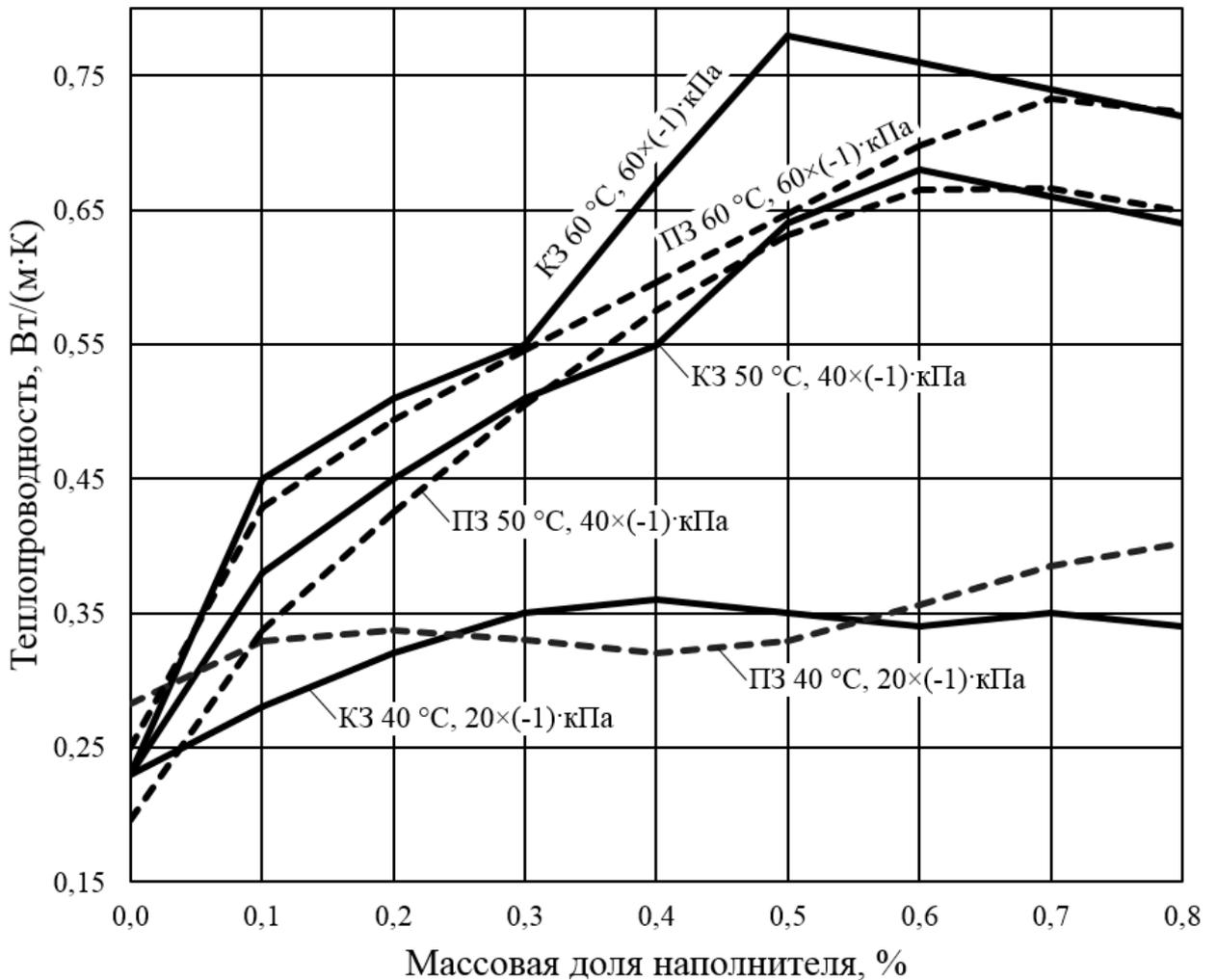
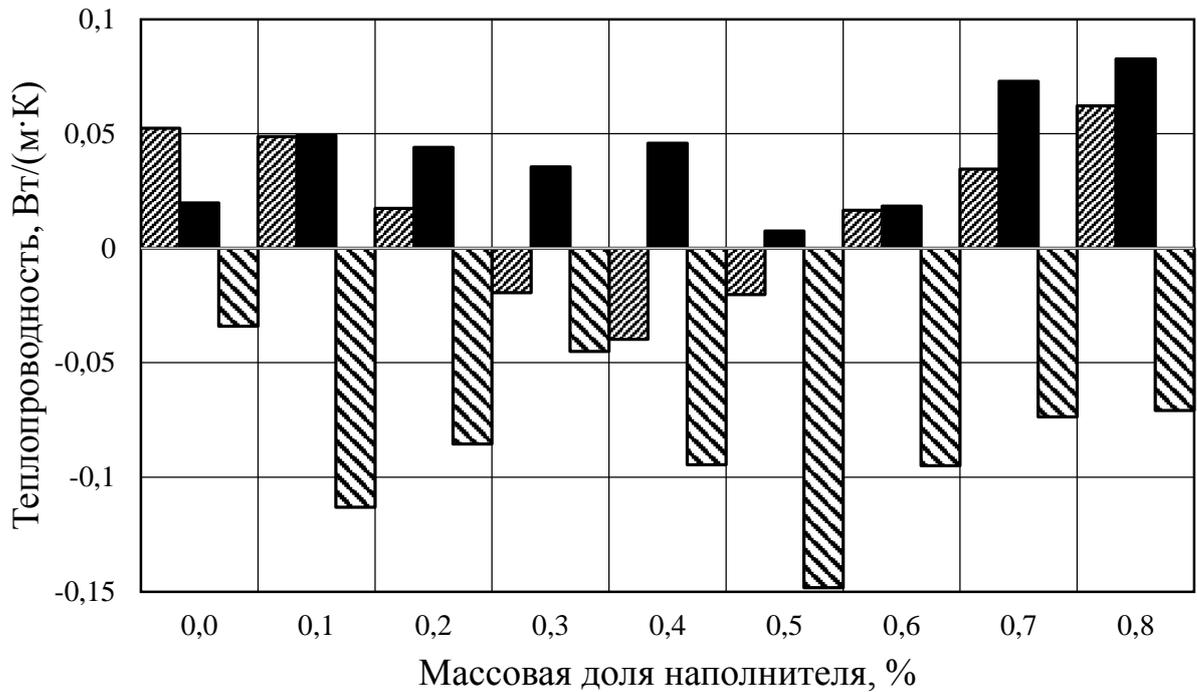


Рисунок 4.13 – Контрольные значения теплопроводности (КЗ) и значения, полученные с использованием нейросетевой модели (ПЗ)

Для проверки корректности результатов, выдаваемых обученной нейросетью, была подготовлена тестовая выборка с парами начальных значений и полученными величинами теплопроводности. На Рисунке 4.14 представлена разность между полученными значениями теплопроводности и контрольными.



- ▨ Температура в процессе модификации 40 °С, уровень вакуума 20 (-1)·кПа
- Температура в процессе модификации 50 °С, уровень вакуума 40 (-1)·кПа
- ▣ Температура в процессе модификации 60 °С, уровень вакуума 60 (-1)·кПа

Рисунок 4.14 – Разность полученных и контрольных значений теплопроводности

Для оценки точности нейросетевой модели были рассчитаны значения абсолютных невязок  $\delta_A$  между экспериментальными данными и результатами моделирования. Исследование выборок показало, что абсолютная невязка  $\delta_A$  составляет от -0,04 до 0,06 Вт/(м·К) для материала при температуре 40 °С; от -0,03 до 0,04 Вт/(м·К) для материала при температуре 50 °С, а для материала при температуре 60 °С она равна от -0,02 до 0,13 Вт/(м·К). Так как различные выборки данных были получены с использованием единой структуры нейросетевой модели и характеризуют один и тот же технологический процесс переработки для одинаковых исходных компонентов, но при различных режимах, возможно предположить, что все значения абсолютных невязок являются элементами одной генеральной совокупности. Сформулированное предположение позволяет совместно проанализировать выборки данных методами параметрической статистики. Результат такого анализа представлен графически на рисунке 4.10.

В результате проведенного анализа установлено, что в изученном диапазоне параметров абсолютная погрешность результатов нейросетевого моделирования равна  $3,68 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), а плотность распределения вероятности абсолютных невязок  $\delta_A$  при этом распределена нормально и описывается зависимостью:

$$p(\delta_A) = \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_A - \mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right),$$

где математическое ожидание  $\mu_A = 3,68 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), а среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma_A = 1,99 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К).

Для оценки адекватности нейросетевой модели необходимо перейти от абсолютных погрешностей  $\delta_A$  к погрешностям относительным  $\delta_R$ , для чего значения абсолютных невязок  $\delta_A$  в каждой из выборок были нормированы относительно соответствующих теплопроводностей, после чего все выборки относительных погрешностей были проанализированы совместно (Рисунок 4.10). В результате было установлено, что в изученном диапазоне параметров относительная погрешность  $\delta_R$  результатов нейросетевого моделирования составляет 6,83 %, что говорит об адекватности разработанной нейросетевой модели. Следует отметить, что плотность распределения вероятности относительных невязок  $\delta_R$  при этом также распределена нормально и описывается зависимостью

$$p_R(\delta_R) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_R - \mu_R)^2}{2\sigma_R^2}\right),$$

где математическое ожидание  $\mu_R = 6,83$  %, а СКО  $\sigma_R = 15,09$  %, а.

Так как распределения абсолютных и относительных погрешностей нейросетевого моделирования распределены нормально, то представляется возможным оценить их взаимную корреляцию. В результате было установлено, что функции распределений не являются независимыми и с коэффициентом корреляции  $r = 0,78$  могут быть описаны зависимостью  $\delta_R = 0,493 + 318,86 \cdot \delta_A$ . Графическая интерпретация взаимной корреляции распределений абсолютных и

относительных погрешностей нейросетевого моделирования проиллюстрирована Рисунком 4.15.

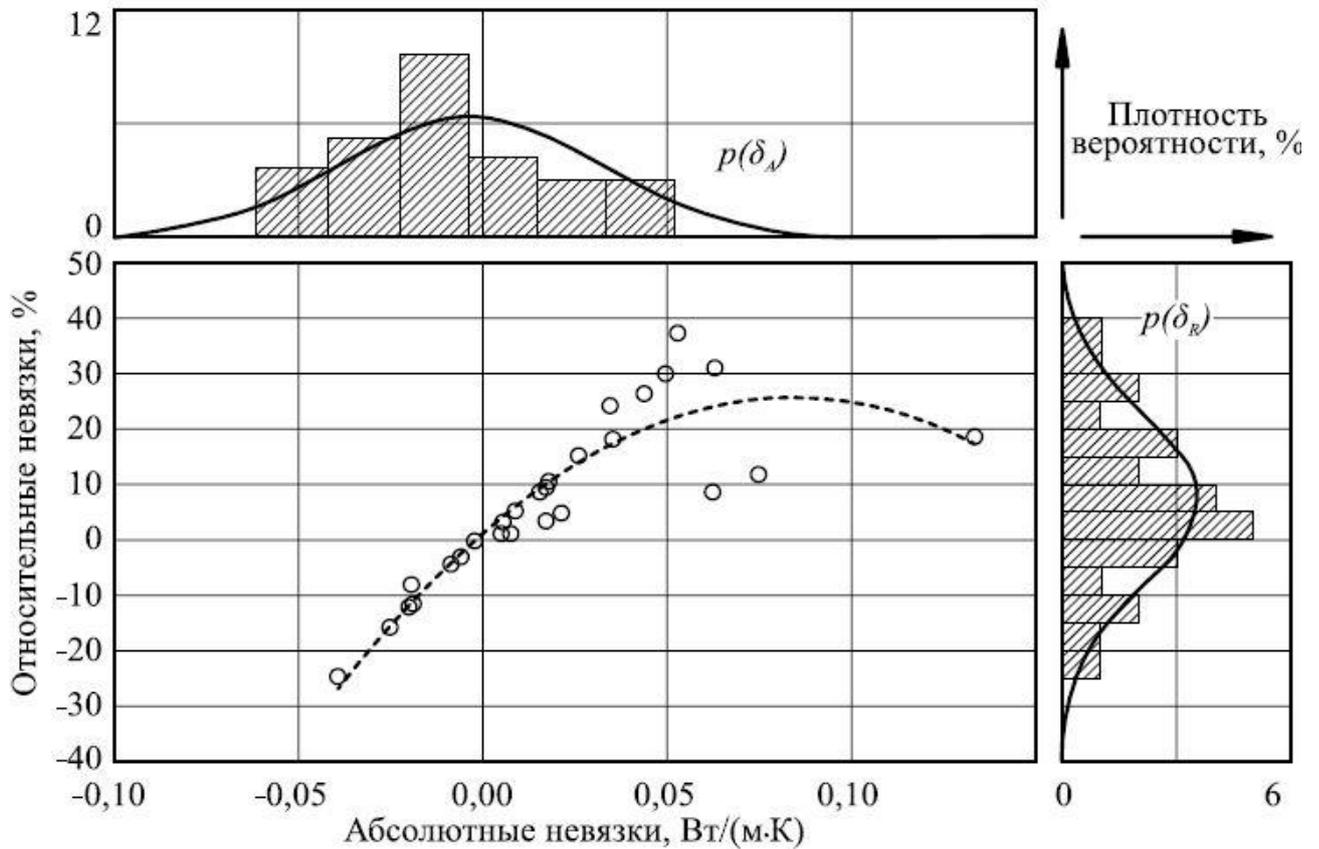


Рисунок 4.15 – Плотность вероятности абсолютных  $p(\delta_A)$  и относительных  $p(\delta_R)$  невязок. Корреляция функций распределения абсолютных и относительных погрешностей нейросетевого моделирования

Таким образом, в изученном диапазоне параметров относительная погрешность  $|\delta_R|$  результатов нейросетевого моделирования составляет 6,83 %, что позволяет считать предложенную архитектуру нейросетевой модели идентификации теплофизических характеристик реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными структурами работоспособной, а результаты моделирования адекватно соответствующими результатам экспериментальных исследований. Кроме того, на основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности практического применения разработанных принципов построения нейросетевых моделей идентификации целевых свойств модифицированных КМ.

### **4.3. Апробация и анализ нейросетевой модели идентификации технологических параметров переработки**

Постановка задачи идентификации технологических параметров переработки, по сравнению с задачей определения целевых свойств модифицированных материалов, является более нетривиальной. Отсутствие методов поверочного контроля, за исключением результатов экспериментальных исследований в совокупности с процессом изготовления объектов исследований, реализованного с обеспечением возможности контроля и вариации технологических параметров производства, обуславливает необходимость выполнения апробации разработанной нейросетевой модели в соответствии с методологией, сформулированной ранее.

Оценка предлагаемого метода идентификации технологических параметров переработки заключается в анализе адекватности разработанной нейросетевой модели по результатам ее апробации по аналогии с прямой задачей идентификации целевых свойств и характеристик модифицируемого материала в зависимости от технологических параметров его переработки.

Соответственно, обучение, валидация и тестирование разработанной модели осуществлялось на экспериментально установленных значениях теплопроводности, полученных для модифицированных образцов реактопластичного связующего с вариацией технологических параметров переработки, представленных в Таблице 4.1, с сохранением контрольных значений теплопроводности для температуры связующего и уровня вакуума  $\{40^{\circ}\text{C}, 20 \cdot (-1) \text{ кПа}\}$ ,  $\{50^{\circ}\text{C}, 40 \cdot (-1) \text{ кПа}\}$ ,  $\{60^{\circ}\text{C}, 60 \cdot (-1) \text{ кПа}\}$ .

Визуализации результатов анализа качества сформированной нейросетевой модели представлена в виде изменения среднеквадратической ошибки в зависимости от выборки, и гистограммы распределения ошибок по типам данных (Рисунок 4.16, 4.17). Графики регрессии выходных данных относительно начальных во время обучения приведены на Рисунке 4.18.

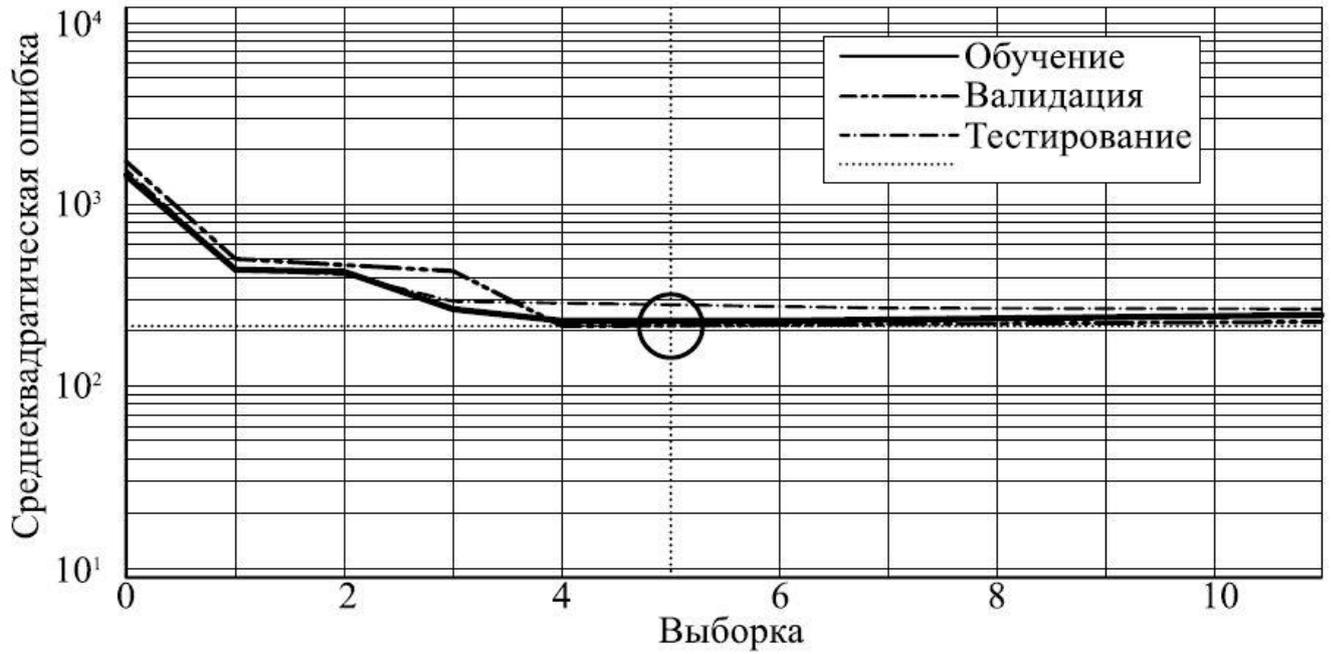


Рисунок 4.16 – Среднеквадратическая ошибка обучения

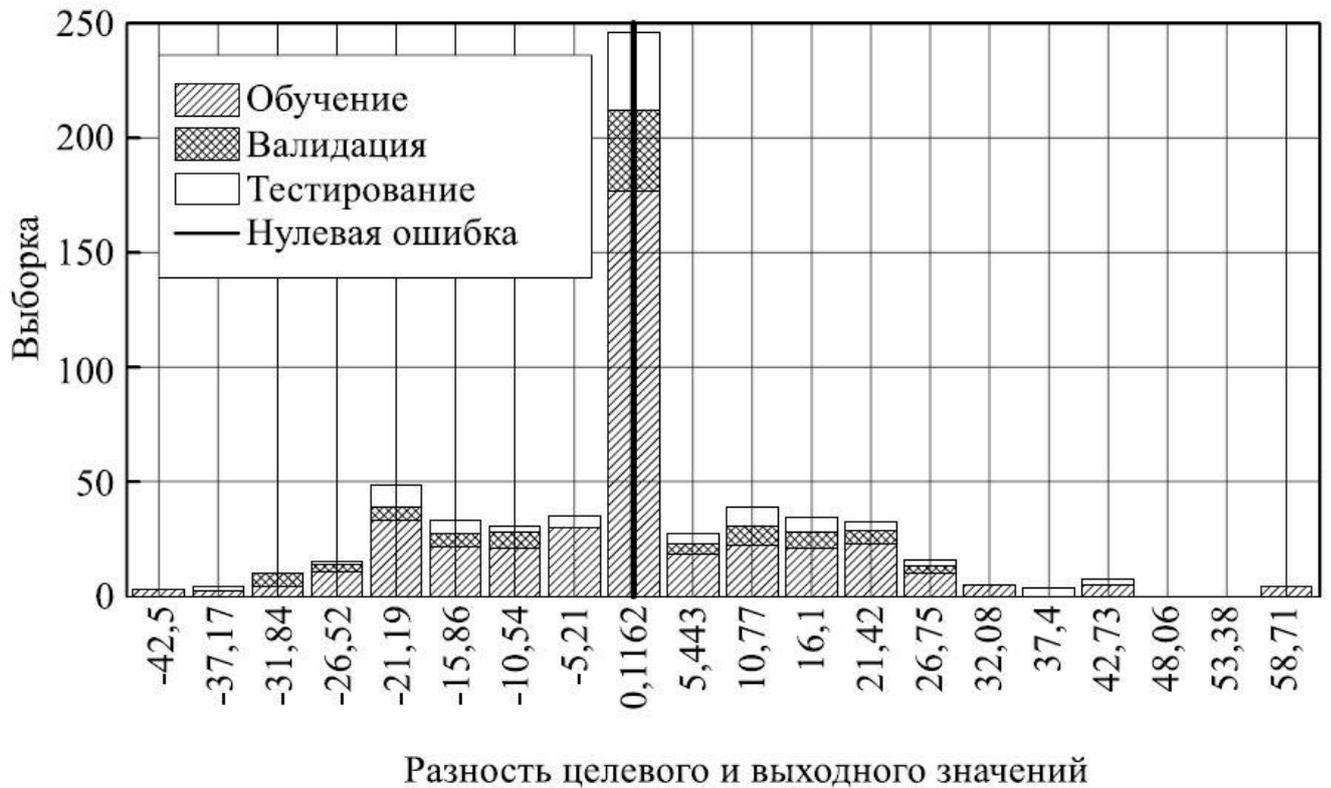


Рисунок 4.17 – Гистограмма распределения ошибок

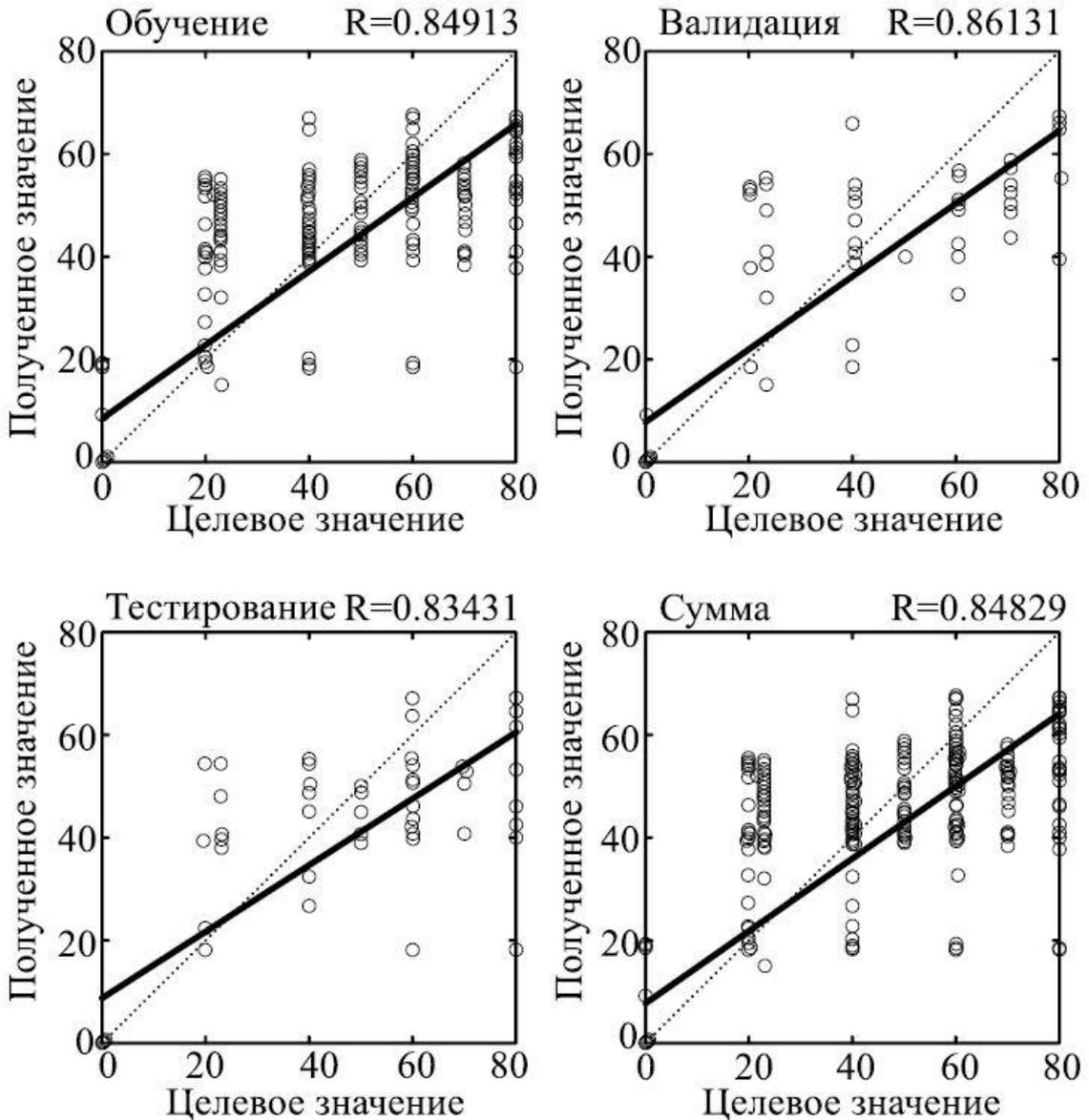


Рисунок 4.18 – Регрессия результатов обучения, валидации и тестирования нейросетевой модели

Как видно из Рисунка 4.18, суммарная сходимость полученных значений по выборкам обучения, валидации и тестирования составляет 84,83%.

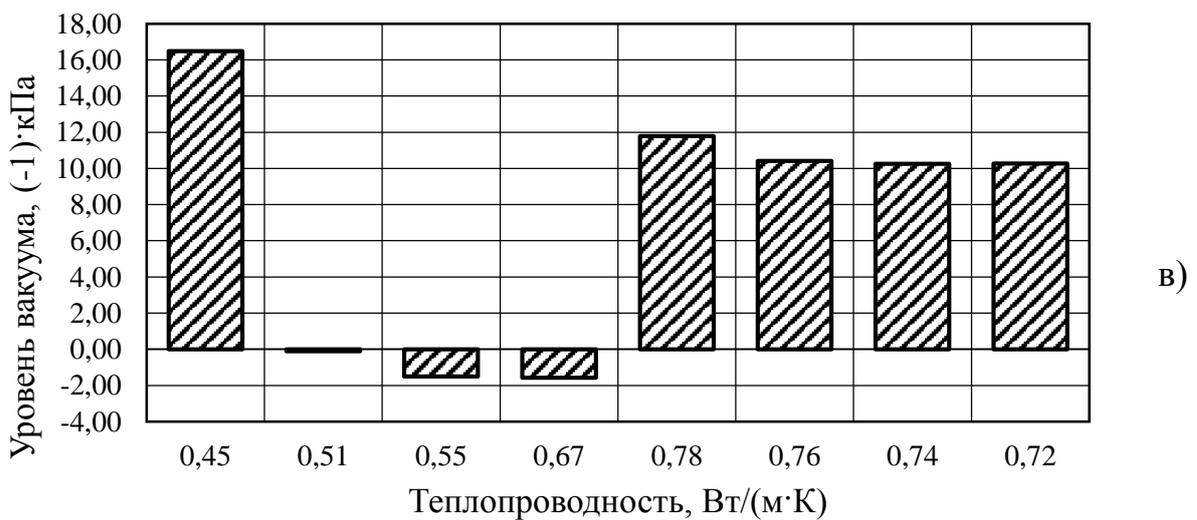
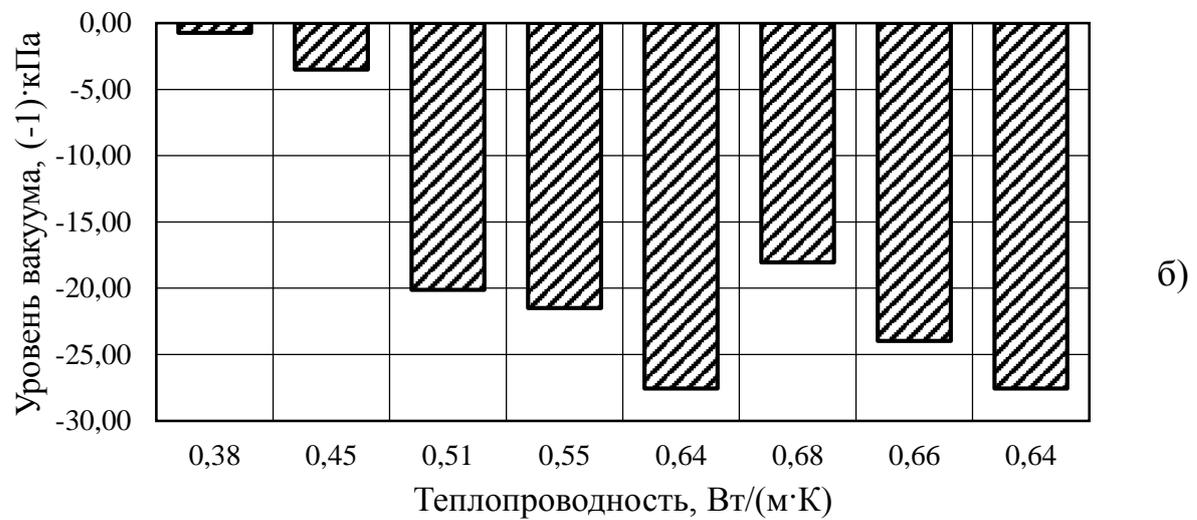
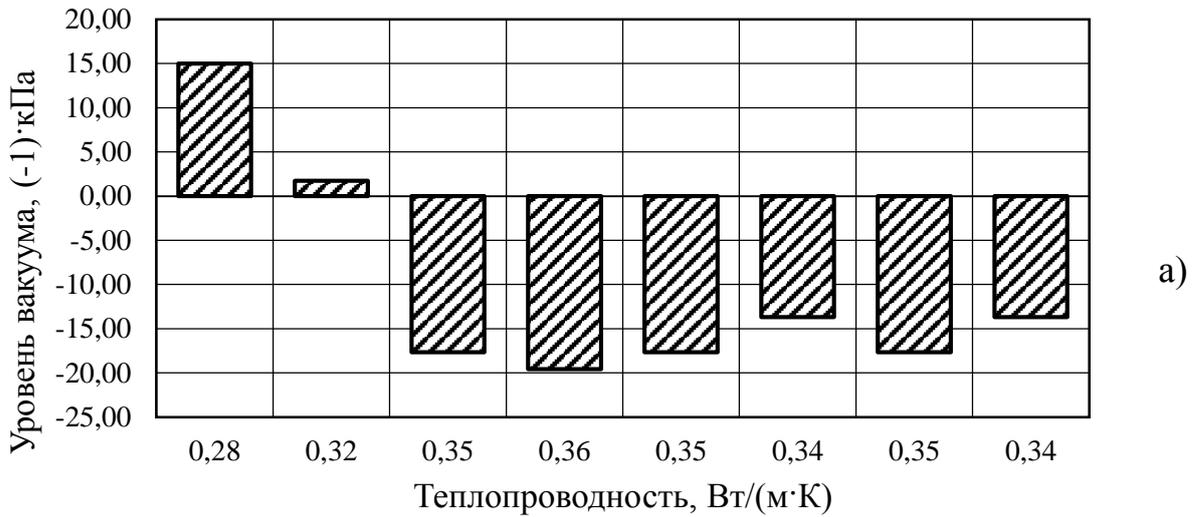
Сопоставление контрольных и полученных с использованием нейросетевой модели значений технологических параметров представлено в Таблице 4.3. Для проверки адекватности результатов, полученных в результате нейросетевого моделирования была подготовлена тестовая выборка с парами начальных значений

и полученными величинами теплопроводности. На Рисунках 4.19 – 4.21 представлена разность между полученными значениями массовой доли наполнителя, уровня вакуума, температуры связующего в процессе модификации, и контрольными.

Таблица 4.3

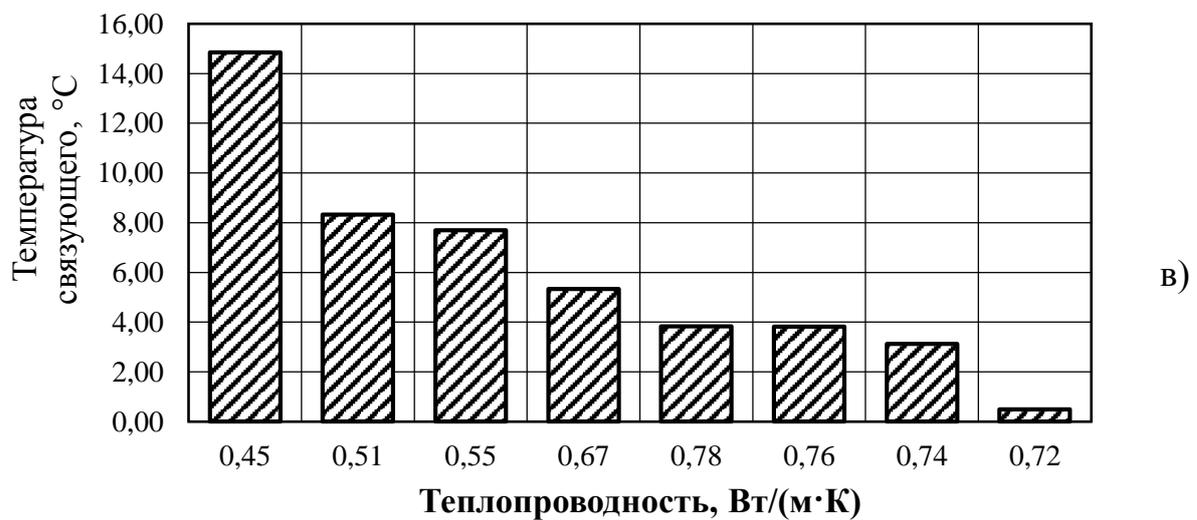
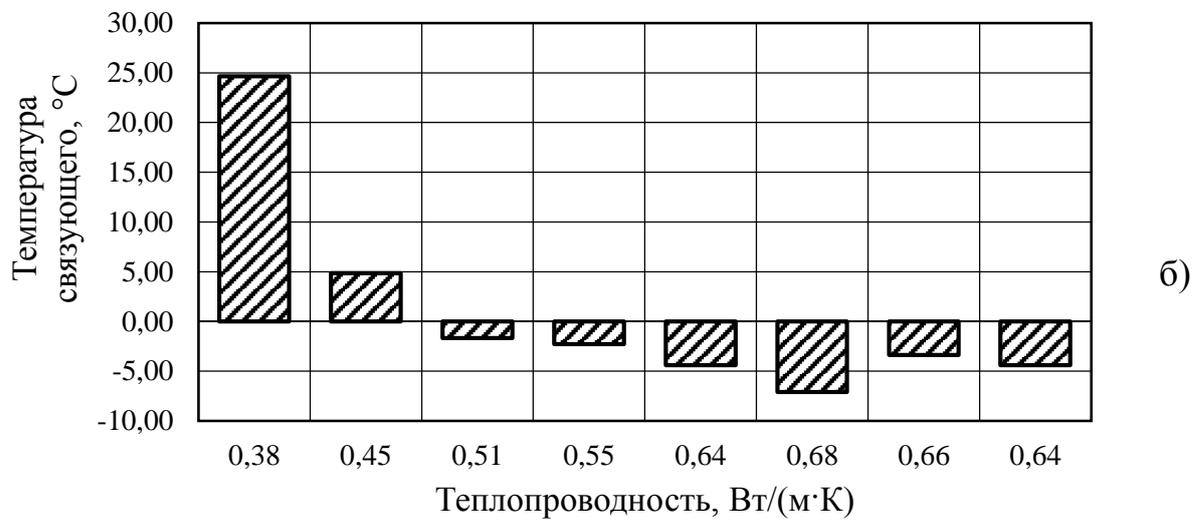
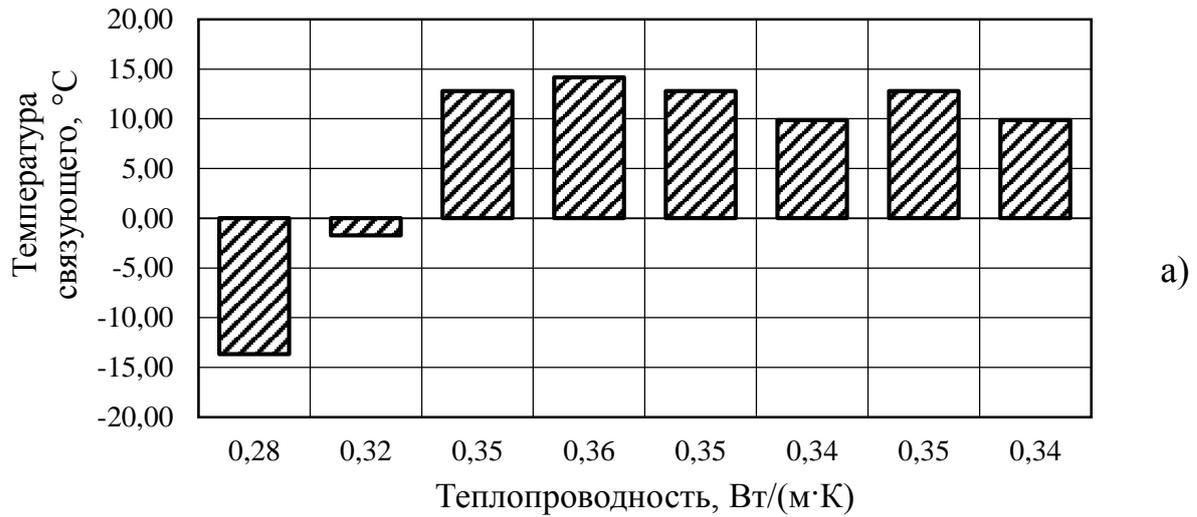
Технологические параметры контрольные и полученные с использованием нейросетевой модели

Тепло-проводность, Вт/(м·К)	Температура связующего в процессе модификации, °С		Массовая доля наполнителя, %		Уровень вакуума, (-1)·кПа	
	Целевое значение	Полученное значение	Целевое значение	Полученное значение	Целевое значение	Полученное значение
Целевая выборка при температуре модификации 40 °С и уровне вакуума 20 (-1)·кПа						
0,28	40	53,68	0,1	0,39	20	5,01
0,32		41,71	0,2	0,43		18,25
0,35		27,20	0,3	0,47		37,66
0,36		25,84	0,4	0,47		39,56
0,35		27,20	0,5	0,47		37,66
0,34		30,15	0,6	0,46		33,70
0,35		27,20	0,7	0,47		37,66
0,34		30,15	0,8	0,46		33,70
Целевая выборка при температуре модификации 50 °С и уровне вакуума 40 (-1)·кПа						
0,38	50	25,35	0,1	0,47	40	40,74
0,45		45,15	0,2	0,13		43,52
0,51		51,67	0,3	0,40		60,12
0,55		52,30	0,4	0,43		61,51
0,64		54,40	0,5	0,62		67,55
0,68		57,10	0,6	0,67		58,06
0,66		53,37	0,7	0,62		63,98
0,64		54,40	0,8	0,62		67,55
Целевая выборка при температуре модификации 60 °С и уровне вакуума 60 (-1)·кПа						
0,45	60	45,15	0,1	0,13	60	43,52
0,51		51,67	0,2	0,40		60,12
0,55		52,30	0,3	0,43		61,51
0,67		54,66	0,4	0,64		61,57
0,78		56,16	0,5	1,04		48,21
0,76		56,18	0,6	1,04		49,58
0,74		56,88	0,7	1,02		49,75
0,72		59,51	0,8	0,91		49,73



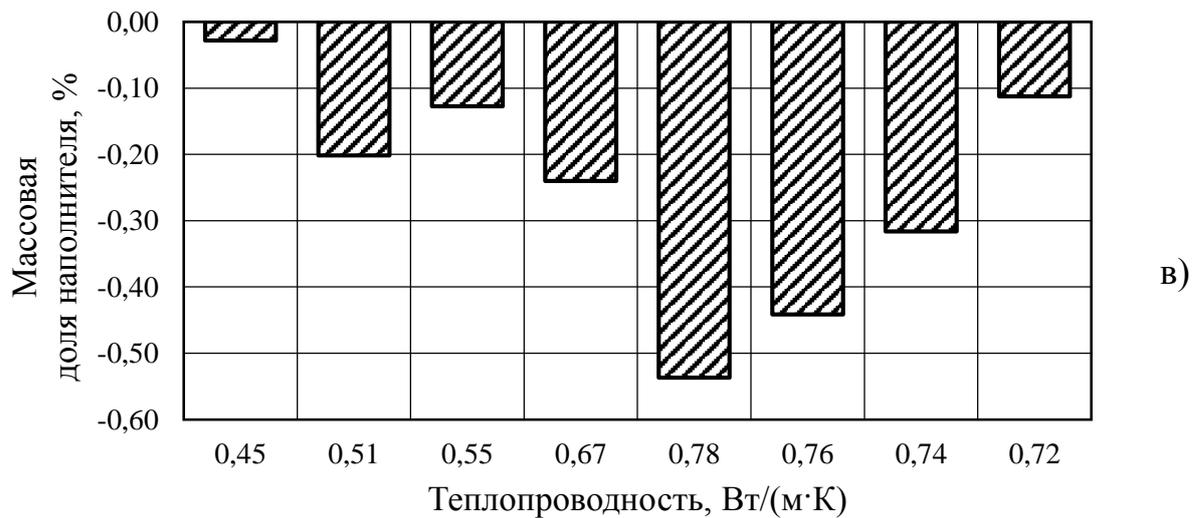
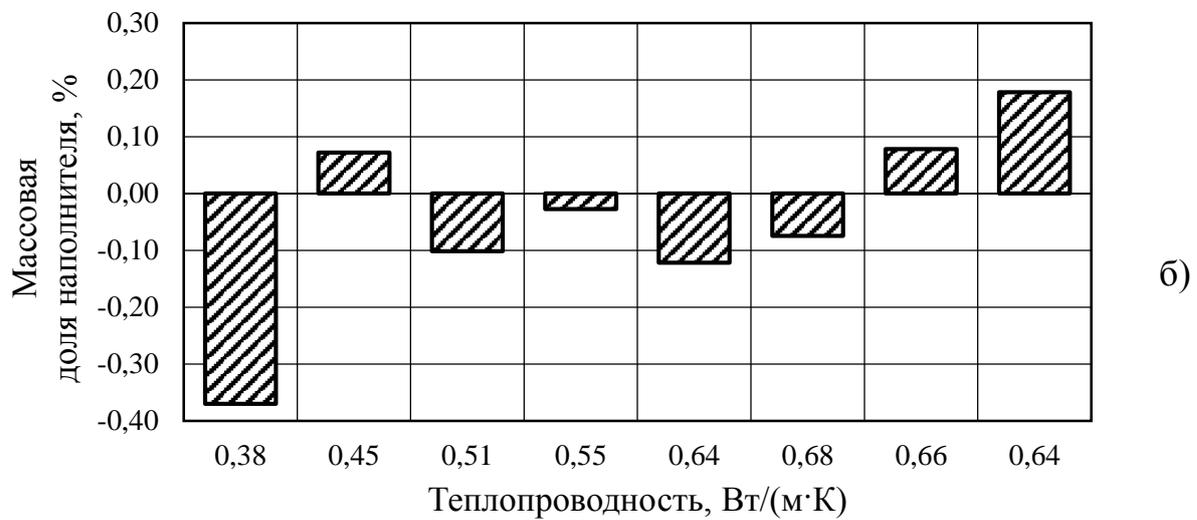
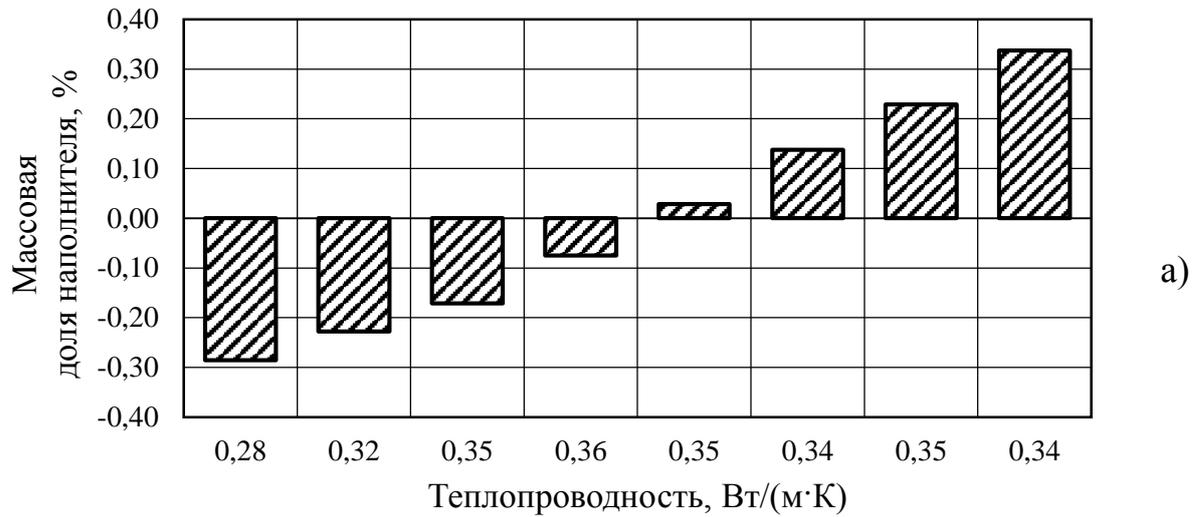
Выборки при температуре модификации и уровне вакуума  
 а) {40 °С, 20 (-1)·кПа}; б) {50 °С, 40(-1)·кПа}; в) {60 °С, 60 (-1)·кПа}

Рисунок 4.19 – Разность полученных и контрольных значений уровня вакуума



Выборки при температуре модификации и уровне вакуума  
 а) {40 °С, 20 (-1)·кПа}; б) {50 °С, 40(-1)·кПа}; в) {60 °С, 60 (-1)·кПа}

Рисунок 4.20 – Разность полученных и контрольных значений температуры связующего



Выборки при температуре модификации и уровне вакуума  
 а) {40 °С, 20 (-1)·кПа}; б) {50 °С, 40(-1)·кПа}; в) {60 °С, 60 (-1)·кПа}

Рисунок 4.21 – Разность полученных и контрольных значений массовой доли наполнителя

Оценка адекватности результатов нейросетевой идентификации технологических параметров переработки модифицируемого материала также была проведена при помощи методов параметрической статистики. Для этого был проведен расчет невязок между значениями контрольных технологических параметров и параметров, идентифицированных с использованием нейросетевой модели.

В результате статистического анализа абсолютных невязок  $\delta_A$  значений температур было установлено, что их плотность вероятности распределена нормально (Рисунок 4.22) и описывается зависимостью

$$p(\delta_A) = \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_A - \mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right),$$

где математическое ожидание  $\mu_A = 4,61$  °С; СКО  $\sigma_A = 8,65$  °С.

Для оценки адекватности идентифицированных значений температур необходимо было перейти от абсолютных погрешностей  $\delta_A$  к погрешностям относительным  $\delta_R$ , для чего значения абсолютных невязок  $\delta_A$  (Рисунок 4.22) были нормированы относительно контрольных температур (Таблица 4.1). В результате статистического анализа относительных невязок  $\delta_R$  было установлено, что плотность вероятности относительных невязок  $p(\delta_R)$ , также как и плотность вероятности невязок абсолютных  $p(\delta_A)$ , распределена нормально (Рисунок 4.22) и описывается зависимостью

$$p_R(\delta_R) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_R - \mu_R)^2}{2\sigma_R^2}\right),$$

в которой математическое ожидание  $\mu_R = 9,74$  %, а СКО  $\sigma_R = 19,29$  %.

Так как распределения абсолютных и относительных погрешностей результатов идентификации температуры распределены нормально, то представляется возможным оценить их взаимную корреляцию. В результате было установлено, что функции распределений не являются независимыми и с коэффициентом корреляции  $r = 0,986$  могут быть описаны следующим соотношением:  $\delta_R = 2,1979 \cdot \delta_A - 0,3867$ , что проиллюстрирована Рисунок 4.17.

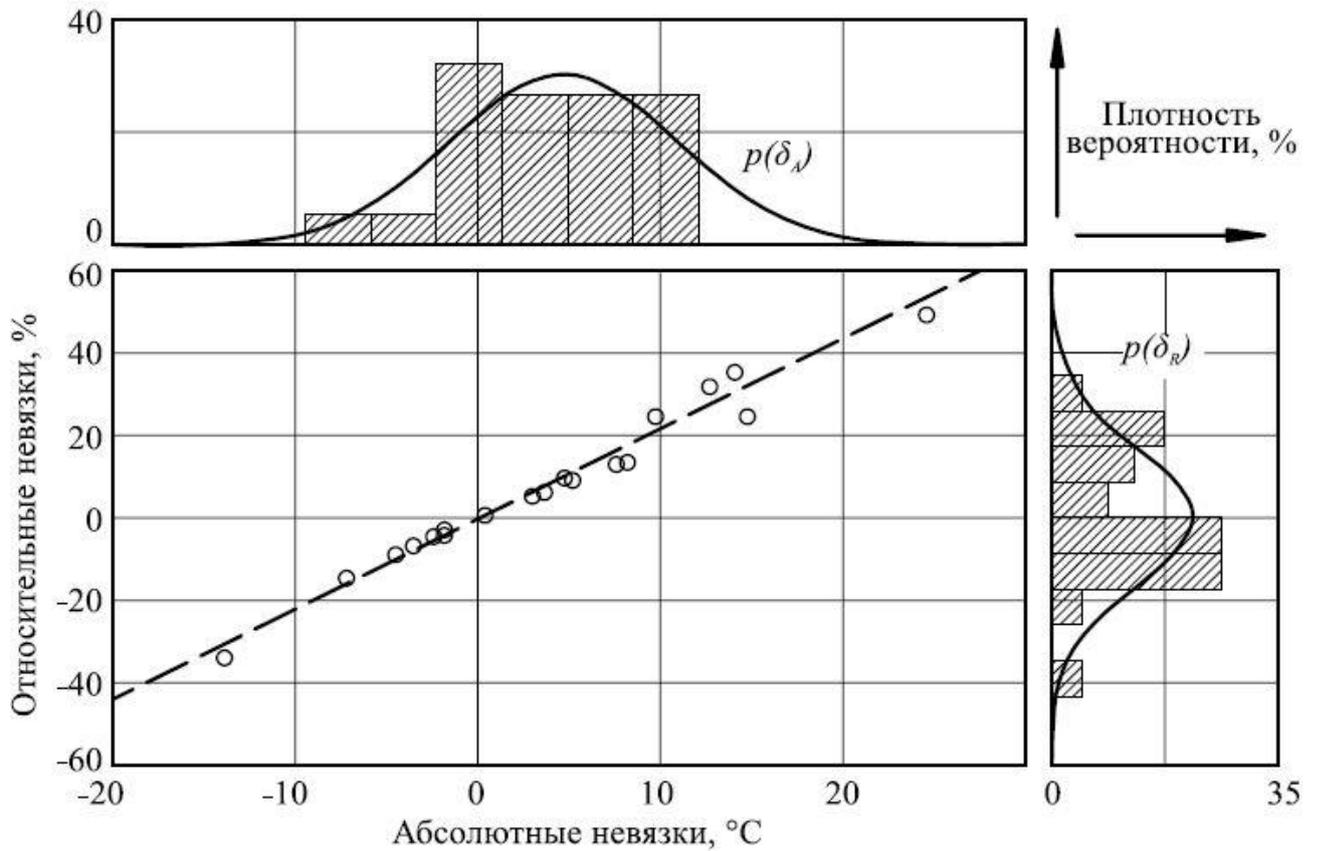


Рисунок 4.22 – Корреляция функций распределения абсолютных и относительных невязок между значениями идентифицированных и контрольных температур

Анализируя абсолютные невязки  $\delta_A$  значений уровня вакуума, было установлено, что их плотность вероятности  $p(\delta_A)$  распределена нормально (Рисунок 4.18) и описывается уравнением

$$p(\delta_A) = \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_A - \mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right),$$

где математическое ожидание –  $\mu_A = -7,1$  (-1) кПа; СКО –  $\sigma_A = 14,4$  (-1) кПа.

Для оценки адекватности идентифицированных значений уровня вакуума необходимо было перейти от абсолютных погрешностей  $\delta_A$  к погрешностям относительным  $\delta_R$ , для чего значения абсолютных невязок  $\delta_A$  (Рисунок 4.18) были нормированы относительно контрольных значений уровня вакуума (Таблица 4.1). В результате статистического анализа относительных невязок  $\delta_R$  было установлено, что плотность вероятности относительных невязок  $p(\delta_R)$ , как и

плотность вероятности невязок абсолютных  $p(\delta_A)$ , распределена нормально (Рисунок 4.23) и описывается зависимостью

$$p_R(\delta_R) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_R - \mu_R)^2}{2\sigma_R^2}\right),$$

где математическое ожидание –  $\mu_R = 28,47\%$ ; СКО –  $\sigma_R = 47,28\%$ .

При этом, функции распределений абсолютных и относительных погрешностей результатов идентификации значений уровня вакуума при модификации связующего не являются независимыми и с коэффициентом корреляции  $r = 0,912$  могут быть описаны соотношением  $\delta_R = 3,0024 \cdot \delta_A - 7,047$ , что проиллюстрировано на Рисунке 4.23.

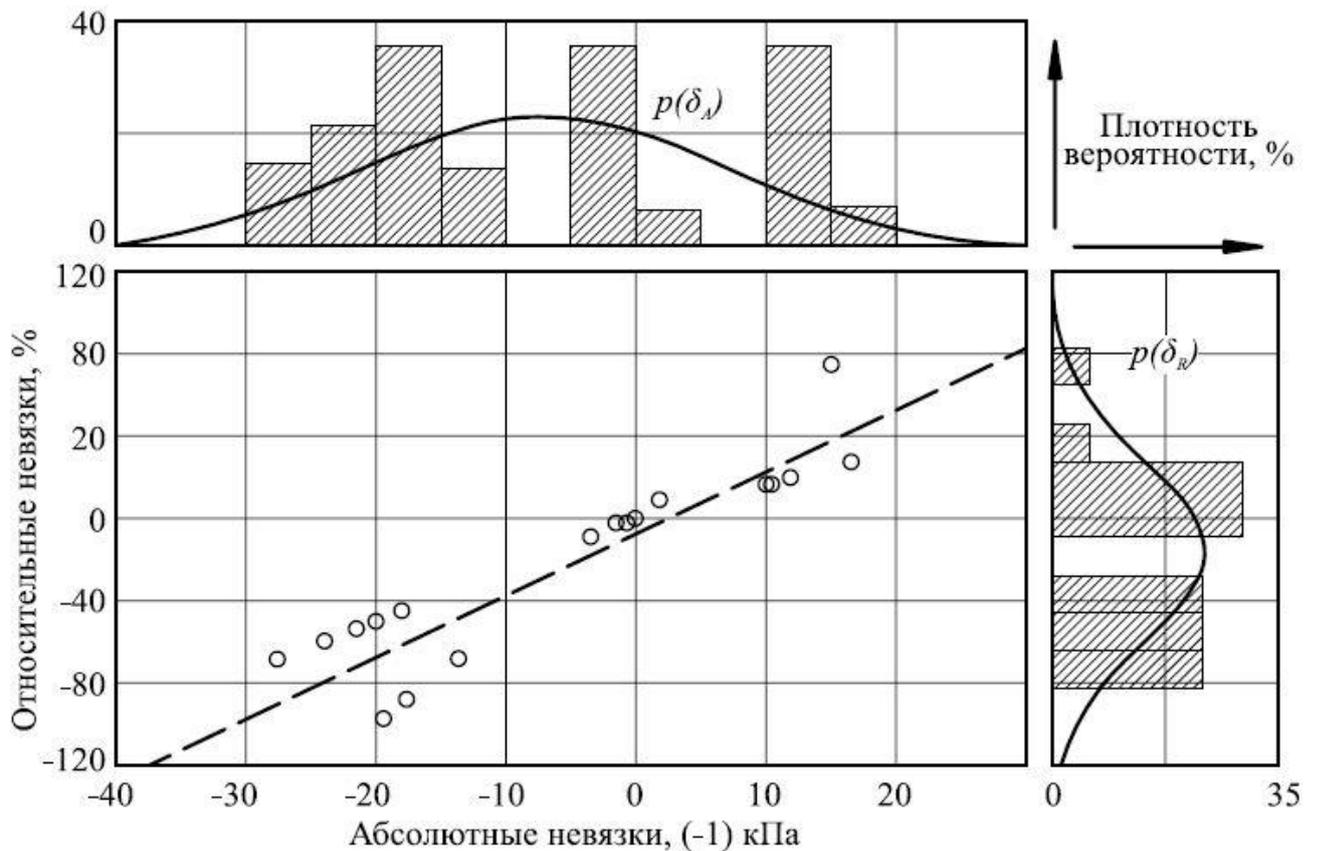


Рисунок 4.23 – Корреляция функций распределения абсолютных и относительных невязок между идентифицированными и контрольными значениями уровня вакуума

Аналогично был проведен анализ точности результатов нейросетевой идентификации значений массовой доли дисперсного модификатора. В результате статистического анализа абсолютных невязок  $\delta_A$  значений содержания модификатора было установлено, что их плотность вероятности  $p(\delta_A)$  распределена нормально (Рисунок 4.24) и описывается уравнением

$$p(\delta_A) = \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_A - \mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right),$$

где математическое ожидание –  $\mu_A = -0,10$  %; СКО –  $\sigma_A = 0,21$  %.

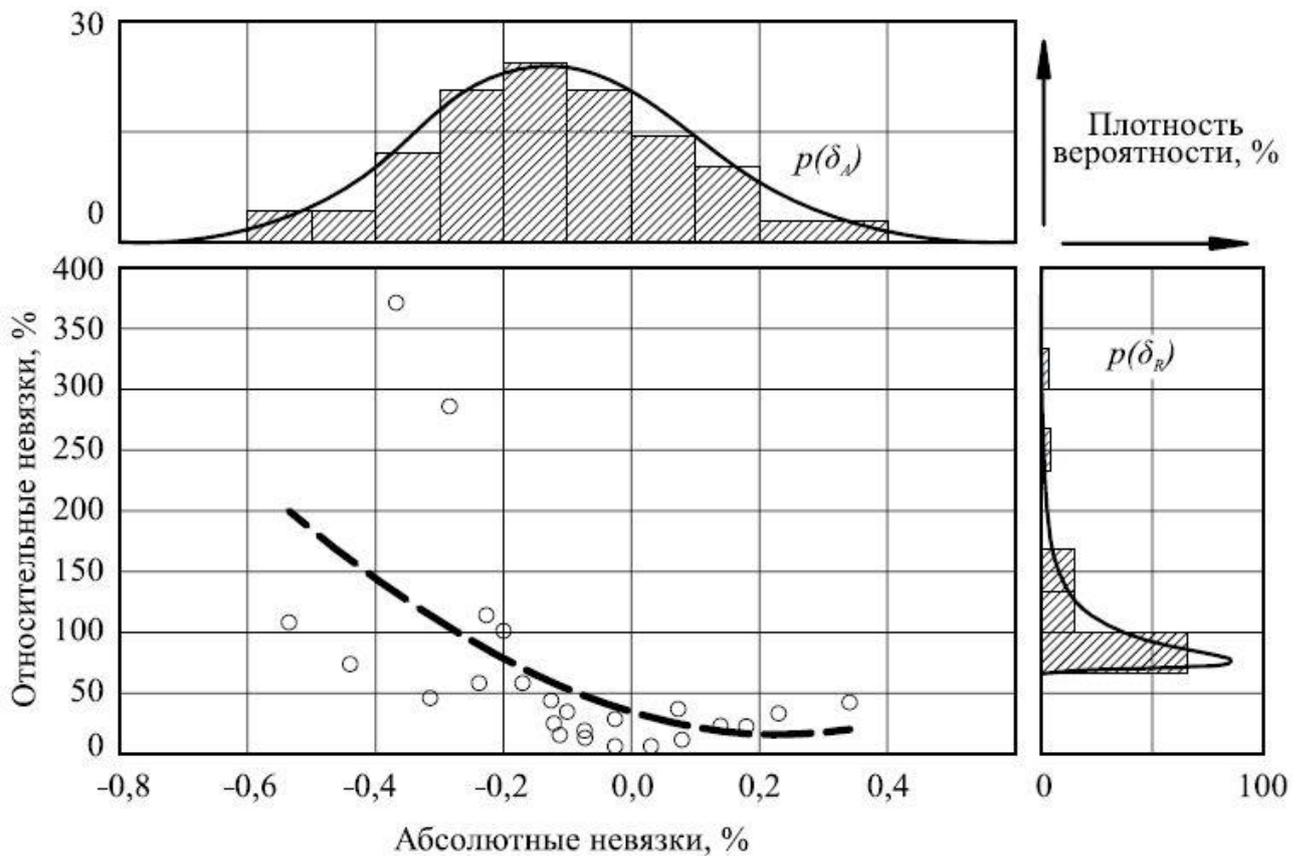


Рисунок 4.24 – Плотность вероятности абсолютных  $p(\delta_A)$  и относительных  $p(\delta_R)$  невязок. Корреляция функций распределения абсолютных и относительных невязок между идентифицированными и контрольными значениями массового содержания дисперсного модификатора

Для оценки адекватности идентифицированных значений содержания дисперсного модификатора необходимо было перейти от абсолютных погрешностей  $\delta_A$  к погрешностям относительным  $\delta_R$ , для чего значения

абсолютных невязок  $\delta_A$  (Рисунок 4.24) были нормированы относительно контрольных значений содержания дисперсного модификатора (Таблица 4.1). В результате статистического анализа относительных невязок  $\delta_R$  было установлено, что распределение вероятности относительных невязок  $p(\delta_R)$  имеет логнормальный вид (Рисунок 4.24) и описывается зависимостью

$$P_R(\Omega_\delta) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{Erf} \left( \frac{\ln(\Omega_\delta) - \mu_\delta}{\sigma_\delta \sqrt{2}} \right) \right],$$

где математическое ожидание –  $\mu_R = 3,61 \%$ ; СКО –  $\sigma_R = 1,04 \%$ .

При этом, функции распределений абсолютных и относительных погрешностей результатов идентификации значений массового содержания дисперсного модификатора не являются независимыми и с коэффициентом корреляции  $r = -0,518$  могут приближенно быть описаны соотношением  $\delta_R = 213,2116 \cdot \delta_A - 44,0$ , что также проиллюстрировано Рисунок 4.24.

Таким образом, в изученном диапазоне параметров относительная погрешность  $|\delta_R|$  результатов нейросетевого моделирования температуры составляет 9,74 %, уровня вакуума в процессе модификации 28,47%, и массовой доли наполнителя 3,61 % соответственно.

Приемлемые значения относительной погрешности полученных значений температуры и массовой доли наполнителя не могут быть рассмотрены отдельно, от значения уровня вакуума, так как представляют собой набор связанных технологических параметров. Из сопоставления и анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что разность между полученными значениями массовой доли наполнителя, уровня вакуума, температуры связующего в процессе модификации, и контрольными не сопоставима с контрольным значением рассматриваемой величины.

#### **4.4. Оценка и сопоставление результатов нейросетевого моделирования с результатами экспериментальных исследований и математического моделирования**

Существенная разница между контрольным и полученным значением технологических параметров позволяет рассматривать решение, полученное с использованием нейросетевого моделирование как самостоятельное.

Для проверки достоверности полученных решений была изготовлена серия экспериментальных образцов реактопластичного модифицированного связующего, с обеспечением технологических параметров, установленных по результатам нейросетевого моделирования. Технологические параметры изготовления и обозначения экспериментальных образцов представлены в Таблице 4.4.

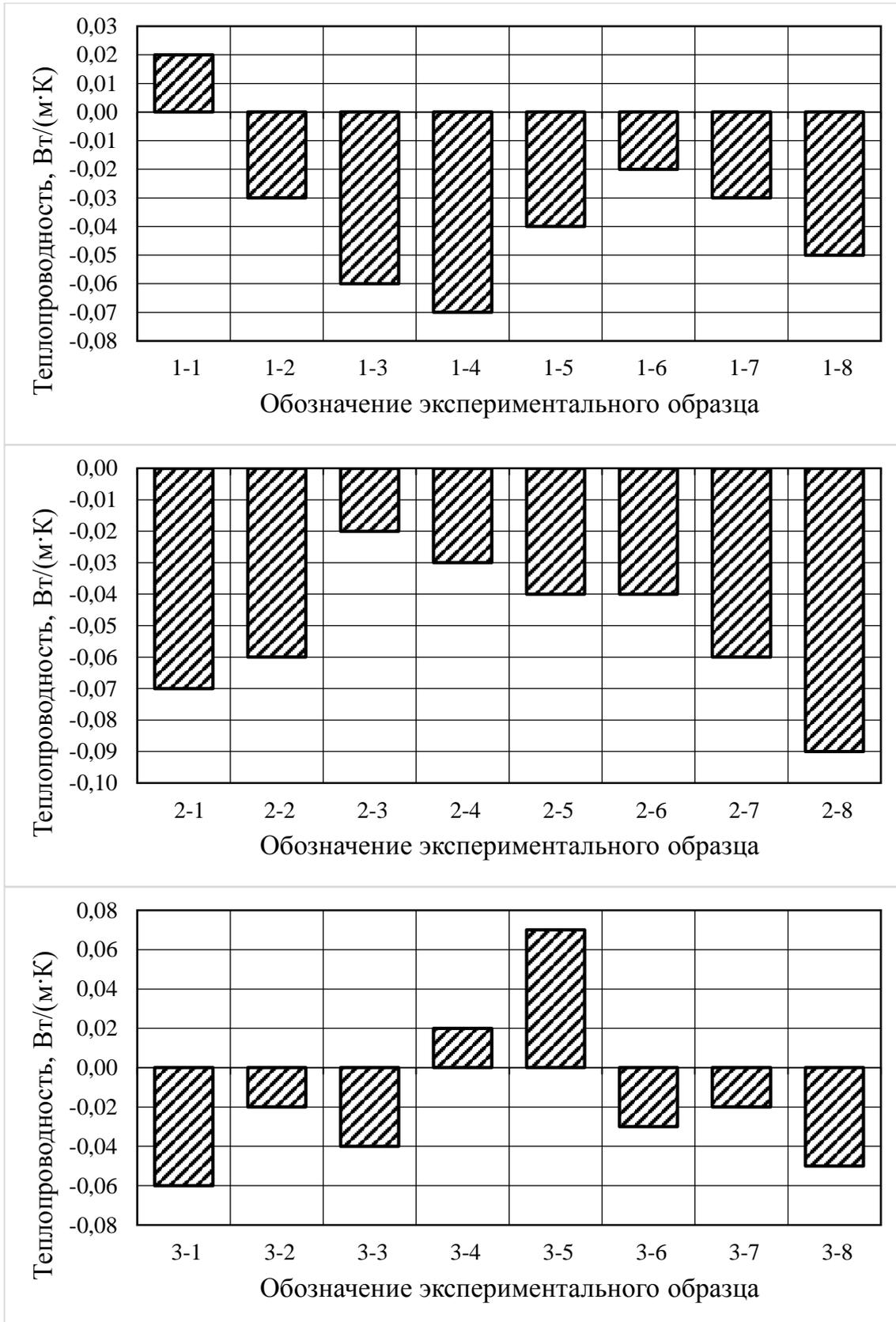
Серии экспериментальных образцов, представленные в Таблице 4.4 находятся в следующем соответствии с контрольными выборками Таблицы 4.1. Контрольная выборка при температуре модификации 40 °С и уровне вакуума 20 (-1)·кПа соответствует серии № 1 экспериментальных образцов; контрольная выборка при температуре модификации 50 °С и уровне вакуума 40(-1)·кПа соответствует серии № 2 экспериментальных образцов; контрольная выборка при температуре модификации 60 °С и уровне вакуума 60 (-1)·кПа соответствует серии № 3 экспериментальных образцов.

Результаты экспериментальных исследований теплопроводности модифицированных образцов реактопластичного связующего представлены в Таблице 4.4. Разность полученных и контрольных значений теплопроводности серий экспериментальных образцов и соответствующих контрольных выборок представлена на Рисунке 4.25.

Анализ разности контрольных и экспериментальных значений показал, что разность полученных и контрольных значений теплопроводности варьируется в диапазоне от -0,09 до 0,07 Вт/(м·К).

Технологические параметры изготовления  
экспериментальных образцов

Обозначение эксперимен- тального образца	Температура связующего в процессе модификации, °С	Массовая доля наполнителя, %	Уровень вакуума, (-1)·кПа
Серия № 1			
1-1	53,68	0,39	5,01
1-2	41,71	0,43	18,25
1-3	27,20	0,47	37,66
1-4	25,84	0,47	39,56
1-5	27,20	0,47	37,66
1-6	30,15	0,46	33,70
1-7	27,20	0,47	37,66
1-8	30,15	0,46	33,70
Серия № 2			
2-1	25,35	0,47	40,74
2-2	45,15	0,13	43,52
2-3	51,67	0,40	60,12
2-4	52,30	0,43	61,51
2-5	54,40	0,62	67,55
2-6	57,10	0,67	58,06
2-7	53,37	0,62	63,98
2-8	54,40	0,62	67,55
Серия № 3			
3-1	45,15	0,13	43,52
3-2	51,67	0,40	60,12
3-3	52,30	0,43	61,51
3-4	54,66	0,64	61,57
3-5	56,16	1,04	48,21
3-6	56,18	1,04	49,58
3-7	56,88	1,02	49,75
3-8	59,51	0,91	49,73



Выборки при температуре модификации и уровне вакуума  
 а) {40 °С, 20 (-1)·кПа}; б) {50 °С, 40(-1)·кПа}; в) {60 °С, 60 (-1)·кПа}

Рисунок 4.25 – Разность полученных и контрольных значений теплопроводности

Значения абсолютных невязок  $\delta_A$  между полученными и контрольными значениями теплопроводности (Рисунок 4.26) позволяют оценить точность определения теплопроводности. Так как различные выборки данных были получены с использованием единственной нейросетевой модели и характеризуют один и тот же материал в одном и том же технологическом процессе, но при различных его режимах, то возможно предположить, что все значения абсолютных невязок  $\delta_A$  являются элементами одной генеральной совокупности, что позволяет методами параметрической статистики проанализировать их совместно. Графически результат такого анализа представлен на Рисунке 4.26.

Было установлено, что в изученном диапазоне параметров абсолютная невязка при определении теплопроводности составляет  $3,41 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), а плотность вероятности распределения абсолютных невязок  $\delta_A$  при этом распределена нормально и описывается зависимостью

$$p(\delta_A) = \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_A - \mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right),$$

где мат. ожидание  $\mu_A = -3,41 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К); СКО  $\sigma_A = 3,39 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К).

Для оценки адекватности полученных результатов необходимо было перейти от невязок абсолютных  $\delta_A$  к невязкам относительным  $\delta_R$ , для чего значения абсолютных невязок  $\delta_A$  в каждой из выборок были нормированы относительно контрольных величин, после чего все выборки относительных погрешностей  $\delta_R$  были проанализированы совместно. Результаты анализа представлены графически на Рисунке 4.21.

В результате было установлено, что в изученном диапазоне параметров относительная погрешность  $\delta_R$  значений теплопроводности составляет 7,58 %, что говорит об адекватности полученных результатов. При этом, плотность вероятности относительных невязок  $p(\delta_R)$  также, как и плотность вероятности невязок абсолютных  $p(\delta_A)$ , описывается нормальным распределением

$$p_R(\delta_R) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta_R - \mu_R)^2}{2\sigma_R^2}\right),$$

где математическое ожидание  $\mu_R = -7,58 \%$ ; СКО  $\sigma_R = 7,24 \%$ .

Так как распределения абсолютных и относительных погрешностей определения теплопроводности распределены нормально, то представляется возможным оценить их взаимную корреляцию. В результате такой оценки установлено, что функции распределений не являются независимыми и с коэффициентом корреляции  $r = 0,83$  могут быть описаны следующим соотношением:  $\delta_R = -0,94 + 194,41 \cdot \delta_A$ . Графическая интерпретация корреляции распределений абсолютных и относительных погрешностей нейросетевого моделирования проиллюстрирована Рисунком 4.26.

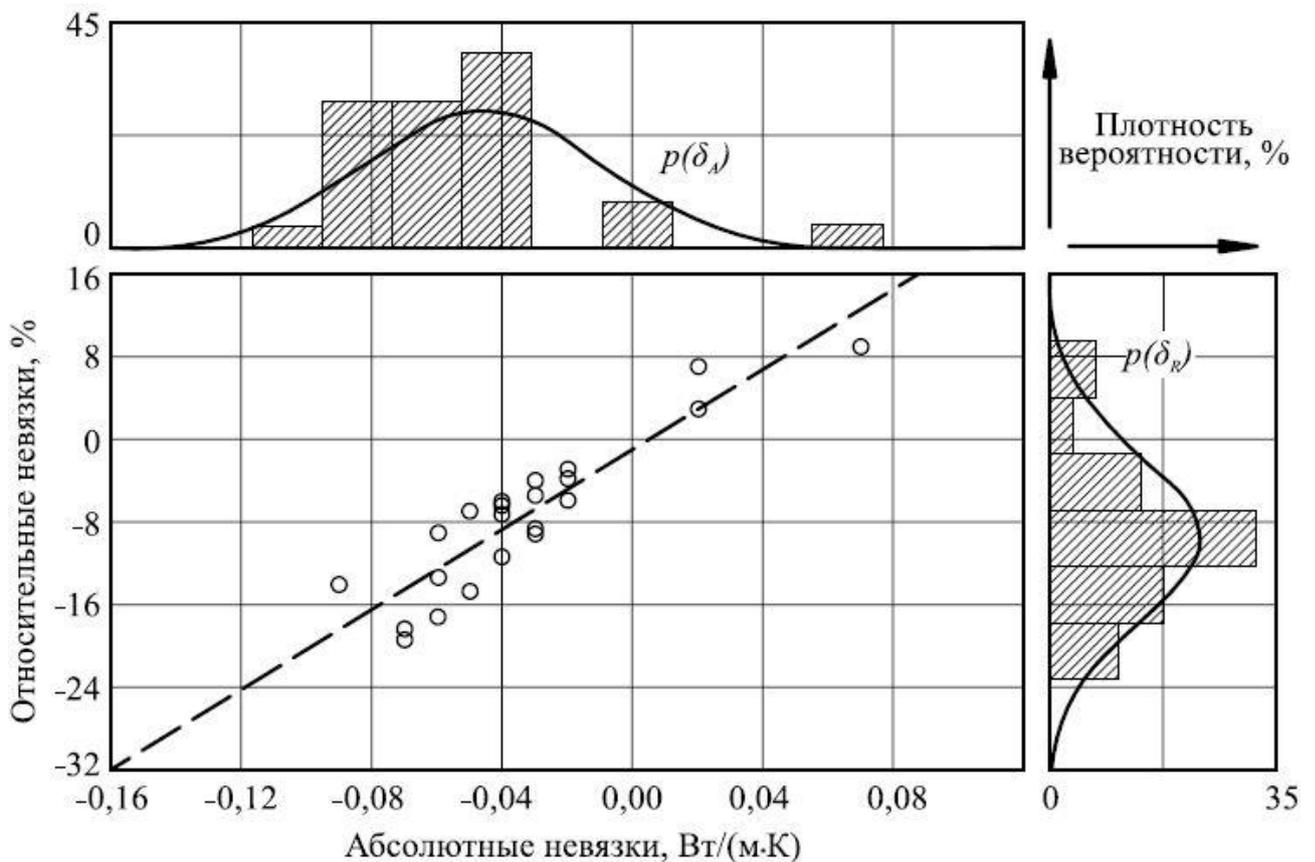


Рисунок 4.26 – Корреляция функций распределения абсолютных и относительных невязок определения теплопроводности

Таким образом, в изученном диапазоне параметров относительная погрешность  $|\delta_R|$  результатов нейросетевого моделирования составляет 7,58 %, что позволяет считать предложенную архитектуру нейросетевой модели идентификации технологических параметров переработки реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными структурами работоспособной, а результаты моделирования адекватно соответствующими результатам экспериментальных исследований. Кроме того, на основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности практического применения разработанных принципов построения нейросетевых моделей идентификации технологических параметров переработки КМ, модифицированных наноразмерными структурами.

#### **4.5. Выводы и заключения**

Экспериментальные исследования и последующая апробация разработанных моделей позволили получить следующие результаты и соответствующие им выводы и заключения.

1) По результатам оценки предложенных методов изготовления и исследования экспериментальных образцов реактопластичных полимеров, модифицированных углеродными наноразмерными структурами были сформированы базы экспериментальных данных целевых характеристик соответствующей вариацией технологических параметров переработки.

2) Оценка адекватности результатов математического моделирования, путем сопоставления с результатами экспериментальных исследований, установила необходимость внесения поправочных допущений, обусловленных технологическими особенностями производства наномодифицированных материалов. Необходимость проведения корректировки математической модели

путем проведения экспериментальных исследований образцов материалов позволяет говорить о несостоятельности утверждения об экономическом преимуществе методов математического моделирования перед методами нейросетевого моделирования, основанных на обучении модели выборками экспериментальных данных, в вопросах прогнозирования целевых свойств композиционных материалов, модифицированных наноразмерными структурами

3) Результаты апробации и анализа нейросетевой модели идентификации целевых свойств модифицированных материалов позволили сделать заключение о работоспособности предложенной архитектуры нейросетевой модели идентификации теплофизических характеристик реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными структурами, а практическое применение разработанных принципов построения нейросетевых моделей целесообразным в вопросах решения задачи идентификации целевых свойств модифицированных КМ.

4) Анализ результатов нейросетевого моделирования в задаче идентификации технологических параметров переработки наномодифицированного реактопластичного связующего с последующей экспериментальной верификацией полученных результатов позволил сделать вывод о состоятельности самостоятельного решения, которое может быть использовано в качестве инструмента оптимизации технологической подготовки производства модифицированных КМ. На основании полученных результатов можно сделать заключение о работоспособности предложенной архитектуры нейросетевой модели идентификации технологических параметров переработки, модифицированных КМ и состоятельности принципов построения нейросетевых моделей идентификации технологических параметров переработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе доказано, что автоматизация этапа подготовки производства изделий из РПКМ в условиях неопределенности режимов их изготовления должна осуществляться системно на основе разработанного метода идентификации взаимозависимости целевых свойств этих изделий и режимов их изготовления, основанном на нейросетевом моделировании плохо формализуемых процессов.

1. Теоретическими исследованиями установлено, что взаимосвязь между целевыми свойствами изделий из РПКМ и режимами их изготовления является нетривиальной. Для автоматизации процесса подготовки производства эта взаимосвязь должна быть выявлена и формализована. Решение указанной задачи заключается:

- в раскрытии и объяснении сущности взаимосвязи между целевыми характеристиками изделий из РПКМ и режимами их изготовления;
- в формировании структуры и описании модели автоматизированной системы обеспечения требуемых свойств РПКМ с позиции достижения целевых свойств изготавливаемого изделия;
- в разработке нейросетевой модели, позволяющей, с достаточной для практического применения достоверностью, определить целевые свойства изделий из РПКМ, исходя из технологических режимов их изготовления;
- в аналитическом описании поправочных коэффициентов, позволяющих проводить математическое моделирование теплофизических характеристик РПКМ;
- в разработке метода интеллектуализации процесса идентификации взаимосвязи целевых свойств изделий из РПКМ и технологических режимов их изготовления, который позволяет получить оригинальные (не входящие в обучающие выборки) значения этих режимов.

2. Для автоматизации процесса подготовки производства изделий из РПКМ, прежде всего, должны быть установлены ключевые целевые свойства этих изделий и основные параметры технологических режимов их изготовления с последующим выявлением взаимосвязи между этими параметрами.

3. Одним из ключевых свойств оценки эксплуатационной способности изделий из РПКМ является их размерная стабильность. Доминирующим фактором, влияющим на размерную стабильность, является теплопроводность. Использование конечно-элементного моделирования позволило установить параметры свойств материала, непосредственно влияющие на теплопроводность и, в конечном итоге, на размерную стабильность, а именно геометрические характеристики включений, их ориентация включений и концентрация.

4. Обеспечение требуемой теплопроводности РПКМ может быть достигнуто путем его модификации наноразмерными углеродными структурами (нанотрубками). Установлено, что основными параметрами режимов изготовления должны быть значения массовой доли наполнителя, уровня вакуума и температуры связующего. В тоже время контролируемым целевым свойством должна быть теплопроводность, включающая в себя такие контролируемые параметры, как температуропроводность, плотность связующего и его теплоемкость. Эти параметры являются общими для всех изделий из РПКМ.

5. Для автоматизации процесса подготовки производства, задача выявления и поиска формального представления взаимосвязи целевых свойств изделий из РПКМ и режимов их изготовления должна быть определена как идентификация этой взаимозависимости. В работе показано, что в условиях неопределенности режимов изготовления, вызванных нетривиальностью указанной взаимосвязи, эффективным инструментом решения этой задачи является нейросетевое моделирование.

6. Нейросетевая модель, построенная на обучающей выборке, способна генерировать рациональные, с позиций целевых свойств изделий, технологические режимы их изготовления. Это позволяет исключить влияние субъективного фактора и, тем самым, автоматизировать процесс принятия решений на этапе ТПП.

В работе представлен принцип построения и метод выбора состава и архитектуры нейронной сети, а также результаты экспериментальных исследований, необходимые для формирования обучающей выборки.

7. Экспериментальная проверка разработанного метода с использованием нейросетевых моделей показала:

– идентификация целевых свойств изделий в изученном диапазоне параметров выполняется с относительной погрешностью, не превышающей 6,83 %;

– идентификации технологических режимов изготовления в изученном диапазоне параметров выполняется с относительной погрешностью, не превышающей 7,58 %.

8. Предлагаемые методы интеллектуализации процесса идентификации технологических параметров переработки модифицированных КМ позволяют получать значения технологических режимов изготовления, соответствующие фактическим целевым свойствам, в поле допуска рассматриваемых величин. Практическая реализация и целесообразность предложенных в работе решений, способствующих повышению уровня автоматизации процесса изготовления изделий из РПКМ на этапе технологической подготовки их производства, подтверждена актами о внедрении результатов диссертационной работы на ЗАО «Псковская лодочная верфь», ООО НПП «ЗСТ», заключением ООО «ПОТОК-М».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Теория автоматического управления / Брюханов В.Н., Косов М.Г., Протопопов С.П., Соломенцев Ю.М.; Под ред. Соломенцева Ю.М. 3-е, стер. изд. М.: Высшая школа, 2000. – 268 с.
2. Цоу, Ц.В., Мак-Каллоф, Р.Л., Пайпс, Р.Б. Композиционные материалы / Ц.В. Цоу, Р.Л. Мак-Каллоф, Р.Б. Пайпс // В мире наук. – 1986. – № 12. – С. 133-144.
3. Chung, D.I. Composite Materials. Science and Applications / D.I. Chung. – London: Springer-Verlag London Limited, 2010. – 385 p.
4. Rosenblatt, R. Principles of Neurodynamics / R. Rosenblatt, Spartan Books, New York, 1962. Русский перевод: Розенблатт, Ф. Принципы нейродинамики: перцептроны и теория механизмов мозга: Пер. с англ / Розенблатт, Ф. – М.: Мир, 1965. – 480 с.
5. Комков, М.А., Тарасов, В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: учеб. Пособие / М.А. Комков, В.А. Тарасов. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
6. Каблов, Е.Н. Композиты: сегодня и завтра / Е.Н. Каблов // Металлы Евразии. 2015. – № 1. – С. 36-39.
7. Головкин, Г.С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов / Г.С. Головкин. – М.: Колос, 2007. – 399 с.
8. Братухин, А.Г., Боголюбов, В.С., Сироткин, О.С. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. – М.: Готика, 2003. – 515 с.
9. Мищенко, С.В., Ткачев, А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С.В. Мищенко. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
10. Елецкий, А.В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе / А.В. Елецкий // УФН. 2007. – Т. 177, № 3, С. 233-273.
11. Ткачев, А.Г. Углеродный наноматериал «Таунит» – структура, свойства, производство и применения / А.Г. Ткачев // Перспективные материалы. 2007. – Т. 177, № 3. – С. 5-9.

12. Композиционные материалы. Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
13. Буланов, И.М., Воробей, В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учебник / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
14. Композиционные материалы. Справочник / Под. ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 592 с.
15. Matthews, F.L., Rawlings, R.D. Composite Materials: Engineering and Science / F.L. Matthews, R.D. Rawlings. – London: Woodhead Publishing Limited; Imperial College London, 2005. – 512 p.
16. Bayer MaterialScience [Electronic resource]: official website. – Mode of access: <http://www.bayerbms.com>.
17. Тростянская, Е.Б., Михайлин, Ю.А., Бухаров, С.В. Тенденции применения и развития композиционных материалов в самолетостроении / Е.Б. Тростянская, Ю.А. Михайлин, С.В. Бухаров / Авиационная промышленность. – 2002. – № 2. – С. 18-22.
18. Карпачева, Г.П. Фуллеренсодержащие полимеры / Г.П. Карпачева // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. – 2000. – Т. 42, № 11. – С. 1974-1999.
19. Бадамшина, Э.Р., Гафурова, М.П. Модификация свойств полимеров путем допирования фуллереном C<sub>60</sub> / Э.Р. Бадамшина, М.П. Гафурова // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2008. – Т. 50, № 8. – С. 1572-1584.
20. Тарасов, В.А., Степанищев, Н.А. Применение нанотехнологий для упрочнения полиэфирной матрицы композиционного материала / В.А. Тарасов, Н.А. Степанищев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – № 3. – С. 34-55.
21. Morphological and mechanical properties of carbon-nanotubereinforced semicrystalline and amorphous polymer composites / M. Cadek, J.N. Coleman, V. Barron, K. Hedicke, W.J. Blau // Appl. Phys. Lett. 2002. – Vol. 81, № 5. – P. 32-51.
22. Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite / A. Allaoui, S. Bai, H.M. Cheng, J.B. Bai // Comp. Sci. Technol. 2002. – Vol.62, № 8. – P. 62-93.

23. Wong, E.W., Sheehan, P.E., Lieber, C.M. Nanobeam mechanics: elasticity, strength and stiffness of the nanorods and nanotubes / E.W. Wong, P.E. Sheehan, C.M. Lieber // *Science*. 1997. – Vol. 277, № 1971-5. – P. 260-277.
24. Ruoff R.S., Lorents D.C. Mechanical and thermal properties of carbon nanotubes / R.S. Ruoff, D.C. Lorents // *Carbon*. 1995. – Vol. 33, № 7. – P. 925-930.
25. Lordi, V., Nan, Y. Molecular mechanics of binding in carbon-nanotube-polymer composites / V. Lordi, Y. Nan // *J. Mater. Res*. 2000. – Vol. 15, № 12. – P. 2770-2779.
26. The way of getting MWNT/epoxy composite / A. Allaoui, S. Bai, H.M. Cheng // *Comp. Sci. Technol*. 2002. – № 62. – P. 1993-2001.
27. Пат. 2500706 Российская Федерация, МПК C09J 4/00, B82B 3/00. Способ диспергирования наночастиц в эпоксидной смоле / Вермель В.Д., Доценко А.М., Титов С.А., Аниховская Л.И., Кладова Л.С., Ткачев А.Г., Слепов С.К., Мележик А.В., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ») – № 2012114992/05; заявл. 17.04.2012; опубл. 10.12.2013 Бюл. № 34.
28. Наномодифицированная клеевая композиция для повышения прочности узлов соединений авиационных конструкций на основе полимерных композиционных материалов / С.А. Титов, В.Д. Вермель, Ю.В. Корнев, Е.А. Никитина, О.В. Бойко, С.В. Чиркунова // *Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения*. – 2016. – М.: Рос. Акад. наук. – С. 488-497.
29. e-Xstream engineering [Electronic resource]: official website. – Mode of access: <http://www.e-xstream.com>.
30. APM Multiphysics - Моделирование физических процессов [Electronic resource]: official website. – Mode of access: <https://apm.ru/apm-multiphysic>.
31. ANSYS - Engineering Simulation & 3D Design Software [Electronic resource]: official website. – Mode of access: <http://www.ansys.com>.

32. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов. – М.: Машиностроение, 2000. – 352 с.
33. Получение, активирование, функционализация, самосборка и перспективы применения нанотрубок и нановолокон / Э.Г. Раков, И.В. Аношкин, Ч.Х. Нгуен, А.В. Малых, М.Т. Нгуен // Нанотехника. 2007. – № 4/12. – С. 3-8.
34. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 592 с.
35. Флинн, Г. Физика акустической кавитации в жидкостях / Г. Флинн; Под ред. У. Мезона. – М.: Мир, 1967. – Т. 1. – 138 с.
36. Geganken, A. Using sonochemistry for the fabrication of nanomaterials / A. Geganken // Ultrasonics Sonochemistry. 2004. – Vol. 11, № 47. – P. 21-47.
37. Hiller, R., Putterman, S.J., Barber, B.P. Spectrum of synchronous picosecond sonoluminescence / R. Hiller, S.J. Putterman, B.P. Barber // Phys. Rev. Lett. 1992. – № 69. – P. 79-88.
38. Barber, B.P., Putterman, S.J. Observation of synchronous picosecond sonoluminescence / B.P. Barber, S.J. Putterman // Nature. 1991. – Vol. 352, № 414. – P. 1745-1758.
39. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами / Александровский Н.М., Егоров С.В., Кузин Р.Е.; Под ред. Александровского Н.М. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
40. Многоуровневое управление динамическими объектами / Васильев В.И., Гусев Ю.М., Ефанов В.И. и др.; Под ред. Васильева В.И. – М.: Наука, 1998. – 309 с.
41. Модели предупреждения критических режимов управления объектов в условиях неопределенности / Ильясов Б.Г., Миронов В.В., Юсупова Н.И.; Под ред. Ильясова Б.Г. – Уфа: Препринт УНИ РАН, 1994. – 245 с.
42. Волчкевич, Л.И. Автоматизация производственных процессов / Л.И. Волчкевич. – М.: Машиностроение, 2005. – 168 с.
43. Земляков, С.Д. Принципы построения и методы исследования адаптивных САУ / С.Д. Земляков. – М.: Высшая школа, 1978. – 113 с.

44. Кашьян, Р.Л., Рао, А.Р. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным / Р.Л. Кашьян, А.Р. Рао. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
45. Вавилов, А.А., Имаев, Д.Х. Эволюционный синтез систем управления / А.А. Вавилов, Д.Х. Имаев. – Л.: Изд-во ЛЭТИ, 1983. – 80 с.
46. Воронов, А.А. Ведение в динамику сложных управляемых систем / А.А. Воронов. – М.: Наука, 1985. – 352 с.
47. Мамиконов А.Г. Теоретические основы автоматизированного управления / А.Г. Мамиконов. – М.: Высшая школа, 1994. – 303 с.
48. Горбань, А.Н. Обучение нейронных сетей / А.Н. Горбань. – М.: Изд. СССР-США СП «ParaGraph», 1990. – 160 с.
49. Дунин-Барковский, В.Л. Информационные процессы в нейронных структурах / В.Л. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1978. – 317 с.
50. Миркес, Е.М. Логически прозрачные нейронные сети и производство явных знаний из данных / Е.М. Миркес // Нейроинформатика. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1998. – С. 283-292.
51. Суздаев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздаев. – М.: Ком. книга, 2006. – 420 с.
52. The MathWorks, Inc. [Electronic resource]: official website. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/>.
53. Deep Learning Toolbox – модуль MATLAB. [Electronic resource]: official website. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/products/neural-network.html>.
54. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Издательский дом Вильямс, 2003. – 288 с.
55. Головкин, В.А. Нейроинтеллект: теория и применения. Книга 1. Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями / В.А. Головкин. – Брест: БПИ, 1999. – 260 с.
56. Хайкин, С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом Вильямс, 2006. – 1104 с.
57. Александров, И.А. Исследование влияния углеродных наноразмерных частиц на теплофизические характеристики полимерного связующего

композиционных материалов / И.А. Александров // Качество. Инновации. Образование – 2015. – Т. 2, № 5. – С. 210-218

58. Александров, И.А., Просунцов, П.В. Оценка влияния углеродных наноразмерных частиц на теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов / И.А. Александров, П.В. Просунцов // Клеи. Герметики. Технологии – 2016. – № 5. – С. 17-21.

59. Раков, Э.Г. Нанотрубки и фуллерены. Учебное пособие / Э.Г. Раков. – М.: Университетская книга, 2006. – 235 с.

60. Ершов, В.А., Кондратьев, В.В., Афанасьев, А.Д. Сонохимическое диспергирование кварца с использованием эффектов кавитации / В.А. Ершов, В.В. Кондратьев, А.Д. Афанасьев // Вестник ИрГТУ. 2011. №11 (58).

61. NETZSCH-Gerätebau GmbH (Germany). [Electronic resource]: official website. – Mode of access: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/>.

62. Modification of polyester resin binder by carbon nanotubes using ultrasonic dispersion / V.A. Tarasov, M.A. Komkov, N.A. Stepanishchev, V.A. Romanenkov, R.V. Boyarskaya // Polymer Science. Series D. 2015. – Vol. 8, № 1. – P. 9-16.

63. Методика экспериментального определения характеристических моментов времени технологического процесса приготовления наносuspensions в условиях ультразвукового воздействия / В.А. Тарасов, Н.А. Степанищев, Р.П. Боярская // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № 8. С. 53.

64. Прочность волокнистых композиционных материалов с наномодифицированным наполнителем / Н.А. Степанищев, В.А. Тарасов, Р.В. Боярская, В.А. Романенков, Ю.В. Кучина // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2013. № 3 (92). С. 122-132.

65. Al-Saleh, M.H., Sundararaj, U. A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites / M.H. Al-Saleh, U. Sundararaj // Carbon. – 2009. – Vol. 47. – №. 1. – P. 2-22.

66. Enhancement of the crack growth resistance of a carbon/epoxy composite by adding multi-walled carbon nanotubes at a cryogenic temperature / M.G. Kim, J.-S. Hong, S.-G. Kang, C.-G. Kim // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2008. – Vol. 39. – №. 4. – P. 647-654.
67. Степанищев, Н.А., Тарасов, В.А. Упрочнение полиэфирной матрицы углеродными нанотрубками / Н.А. Степанищев, В.А. Тарасов // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение*. – 2010. – № 5. – С. 53-65.
68. Повышение качества и технологичности полиэфирной матрицы композитных конструкций на базе ультразвукового наномодифицирования / Тарасов В.А., Степанищев Н.А., Романенков В.А., Алямовский А.И. // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2012. – № 9 (9). – С. 37.
69. Пат. 2500695 Российская Федерация, МПК C08J 3/205, C08J 3/28, G01N 15/06, B82B 3/00, B82Y 30/00, B01F 3/12. Способ диспергирования наночастиц в эпоксидной смоле / Тарасов В.А., Степанищев Н.А., Степанищев А.Н., Назаров Н.Г., Копыл Н.И., Алямовский А.И., Нелюб В.А., Буянов И.А., Чуднов И. В., Бородулин А.С., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) – № 2012124228/04; заявл. 13.06.2012; опубл. 10.12.2013 Бюл. № 34.
70. Борисов, В.В., Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети: теория и практика / В.В. Борисов, В.В. Круглов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. 382 с.
71. ГОСТ 34.003–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные систем. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 15 с.
72. РД 50-680-88. Методические указания. Автоматизированные системы. Основные положения. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. – 7 с.

73. Потресов, Д.К., Скоморохов, Д.В. Анализ факторов, влияющих на надежность информационных систем высокой готовности / Д.К. Потресов, Д.В. Скоморохов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №. 12. – С. 303-306.
74. Попов, Ф.А., Максимов, А.В. Подходы к проектированию баз данных для автоматизированных систем / Попов, Ф.А., Максимов, А.В. // Известия АлтГУ. – 2003. – № 1. – С. 50-53.
75. Волков, М.В., Филиппов, Р.Н. Анализ основных характеристик определяющих эффективность автоматизированных систем управления и методов их оценки / М.В. Волков, Р.Н. Филиппов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – № 3. – С. 52-56.
76. Аскадский, А.А., Кондрашенко, В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Том 1. Атомно-молекулярный уровень / А.А. Аскадский, В.И. Кондрашенко. – М.: Научный мир, 1999. – 544 с.
77. Пат. 2522884 Российская Федерация, МПК C08L 63/00, C08K 3/04, C08J 3/28, B82B 3/00. Способ получения наномодифицированного связующего / Нелюб В.А., Буянов И.А., Бородулин А.С., Чуднов И.В., Александров И.А., Муранов А.Н., Полежаев А.В., Бессонов И.В., Кузнецова М.Н. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) – № 2012148431/05; заявл. 15.11.2012; опубл. 20.07.2014 Бюл. № 20.
78. Пат. 2508176 Российская Федерация, МПК B22D 15/00. Устройство для изготовления образцов из литевых отверждающихся смол / Нелюб В.А., Буянов И.А., Бородулин А.С., Чуднов И.В., Александров И.А., Муранов А.Н., Полежаев А.В., Бессонов И.В., Михеев П.В. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) – № 2012148430/02; заявл. 15.11.2012; опубл. 27.02.2014 Бюл. № 6.

79. Митрофанов, В.Г. Структурный анализ автоматизированных технологических систем / В.Г.Митрофанов, А.В.Капитанов, И.С.Омельченко // Проблемы машиностроения и автоматизации. Национальный институт авиационных технологий (Москва). – 2015. – № 4. – С. 130-135.
80. Density determination kit. [Electronic resource]: website. – Mode of access: [http://www.andk.co.kr/page\\_sub2/product\\_detail.html?seq=46&PHPSESSID=a337cd7fe46e38847a7c33ab3e9a633b&ckattempt=1](http://www.andk.co.kr/page_sub2/product_detail.html?seq=46&PHPSESSID=a337cd7fe46e38847a7c33ab3e9a633b&ckattempt=1)
81. Пат. 2629910 Российская Федерация, МПК G01N 9/08. Способ гидростатического взвешивания твёрдых тел / Мироненко В.Н., Васенев В.В.. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) – № 2016132721; заявл. 08.08.2016; опубл. 04.09.2017 Бюл. № 25.
82. Grabusts, P., Zorins, A. The Influence of Hidden Neurons Factor on Neural Network Training Quality Assurance / P. Grabusts, A. Zorins // Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Volume III. – 2015. – Vol. 76. – P. 81.
83. Abadie, M. High Performance Polymers-Polyimides Based: From Chemistry to Applications / M. Abadie. – BoD–Books on Demand, 2012. – 244 p.
84. Lawrence, S., Giles, CL, and Tsoi, AC (1996), «Какая размерная нейронная сеть дает оптимальное обобщение? обратное распространение». Технический отчет UMIACS-TR-96-22 и CS-TR-3617, Институт перспективных компьютерных исследований, Университет Мэриленда, Колледж-Парк.
85. Elisseeff, A., and Paugam-Moisy, H. (1997), «Размер многослойных сетей для точного обучения: аналитический подход». Достижения в системах обработки нейронной информации 9, Кембридж, Массачусетс: Пресса MIT, стр. 162-168.
86. Schadler, L.S., Giannaris, S.C., Ajayan, P.M. Load transfer in carbon nanotube epoxy composites / L.S. Schadler, S.C. Giannaris, P.M. Ajayan // Applied physics letters. – 1998. – Vol. 73. – №. 26. – P. 3842-3844.

87. Fabrication and properties of composites of poly (ethylene oxide) and functionalized carbon nanotubes / H.Z. Geng, R. Rosen, B. Zheng, H. Shimoda, L. Fleming, J. Liu, O. Zhou // *Advanced Materials*. – 2002. – Vol. 14, №. 19. – P. 1387-1390.
88. Thostenson, E.T., Chou, T-W. Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and mechanical characterization / E.T. Thostenson, T-W. Chou // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2002. – № 35. – P. 77-80.
89. Клеевая композиция с добавками углеродных наноматериалов для авиационных конструкций на основе полимерных композитов / С.А. Титов, В.Д. Вермель, Ю.В. Корнев, Е.А. Никитина // *Учен. Зап. Казан. ун-та. Сер: Физ.-матем. науки*. – 2015. – Т. 157, кн. 3. – С. 148–152.
90. Evaluation of improving mechanical characteristics of epoxy binder after dispersing carbon nanotubes / V.D. Vermel, S.A. Titov, Yu.V. Kornev, P.E. Semenov, T. Yu. Nagovitsyna, L.L. Chernyshev // *Advanced materials & technologies* – 2018, № 4 – P. 5–15.
91. Влияние диспергирования углеродных нано-волокон с применением волновых процессов и ультразвука на изменение механических характеристик эпоксидного связующего / С.А. Титов, В.Д. Вермель, Ю.В. Корнев, Т. Ю. Наговицына // *Труды ЦАГИ*. – 2018. – Вып. 2768. – С. 95–98.
92. Papageorgiou, E.I., Poczeta, K. A two-stage model for time series prediction based on fuzzy cognitive maps and neural networks / E.I. Papageorgiou, K. Poczeta // *Neurocomputing*. – 2017. – Vol. 232. – P. 113-121.
93. Stuart, K.D., Majewski, M. Intelligent opinion mining and sentiment analysis using artificial neural networks / K.D. Stuart, M. Majewski // *International Conference on Neural Information Processing*. – Springer, Cham, 2015. – P. 103-110.
94. Stuart, K.D., Majewski, M., Trelis, A.B. Intelligent semantic-based system for corpus analysis through hybrid probabilistic neural networks / K.D. Stuart, M. Majewski, A.B. Trelis // *International Symposium on Neural Networks*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 83-92.

95. Nguyen, D., Widrow, B. Improving the learning speed of 2-layer neural networks by choosing initial values of the adaptive weights / D. Nguyen, B. Widrow // 1990 IJCNN International Joint Conference on Neural Networks. – IEEE, 1990. – P. 21-26.
96. Możaryn, J., Kurek, J.E. Relative error indices for comparison of neural models of different robots / J. Możaryn, J.E. Kurek // Recent Advances in Mechatronics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – P. 233-238.
97. Исследования микроструктуры наномодифицированных полимерных композиционных материалов / А.Н. Муранов, И.А. Александров, И.А. Буянов, И.В. Чуднов, А.С. Бородулин, Ю.М. Миронов, В.А. Нелюб // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2012. – №. 7. – 5 с.

**Приложение А. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Таблица 1

Результаты анализа процесса теплопереноса для хаотически армированных ячеек  
с массовой долей УНТ 0,4%, при разнице начальных температур  
противоположных стенок,  $\Delta T = 5 \text{ K}$

№	Длина ребра элементарной ячейки, $a$ , нм	Количество цилиндрических включений в элементарной ячейке	Суммарное тепловое излучение боковой стенки, $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	Теплопро- водность, $\lambda$ , Вт/(м·К)
1.	100	7	0,16	0,32
2.	200	16	0,55	0,55
3.	300	36	0,93	0,62
4.	400	72	1,29	0,65
5.	500	136	1,64	0,66
6.	600	191	2,07	0,69
7.	700	286	2,17	0,62
8.	800	376	2,72	0,68
9.	900	481	3,17	0,70
10.	1000	687	3,38	0,68

Таблица 2

Результаты анализа процесса теплопереноса для хаотически армированных ячеек с массовой долей УНТ 0,4%, длиной ребра 500 нм, при вариации диаметра включений от 5 до 30 нм, с разницей начальных температур противоположных стенок,  $\Delta T = 5$  К

№	Диаметр цилиндрических включений элементарной ячейки, $d$ , нм	Количество цилиндрических включений в элементарной ячейке	Суммарное тепловое излучение боковой стенки, $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(м·К)
1.	5	163	2,78	1,11
2.	10	142	2,01	0,81
3.	13	136	1,05	0,66
4.	20	58	1,39	0,56
5.	25	42	1,33	0,53
6.	30	39	1,57	0,52

Таблица 3

Результаты анализа процесса теплопереноса для хаотически армированных ячеек с массовой долей УНТ 0,4% и вариацией длины включений от 250 до 1500 нм, при разнице начальных температур противоположных стенок,  $\Delta T = 5$  К

№	Длина цилиндрических включений элементарной ячейки, $l$ , нм	Количество цилиндрических включений в элементарной ячейке	Суммарное тепловое излучение боковой стенки, $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(м·К)
1.	250	293	1,28	0,51
2.	375	245	1,63	0,65
3.	500	206	2,10	0,84
4.	625	167	2,33	0,93
5.	750	152	2,22	0,89
6.	875	139	1,80	0,72
7.	1000	125	1,64	0,65
8.	1125	104	1,53	0,61
9.	1250	89	1,47	0,59
10.	1375	93	1,68	0,67
11.	1500	98	2,41	0,97

Таблица 4

Результаты анализа процесса теплопереноса для ячеек, армированных плоско ориентированных, с массовой долей УНТ 0,4% и вариацией угла ориентации относительно теплового потока от 0 до 90°, при разнице начальных температур противоположных стенок,  $\Delta T = 5 \text{ K}$

№	Угол ориентации относительно теплового потока, $\xi$	Суммарное тепловое излучение боковой стенки, $q, \text{ Вт/м}^2$	Теплопроводность, $\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$
1.	0	7,91	3,17
2.	15	6,4291	2,57
3.	30	4,3415	1,74
4.	45	2,128	0,85
5.	60	1,0618	0,35
6.	75	0,73546	0,25
7.	90	0,6245	0,21

**Приложение Б. АКТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ  
О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**



# ПСКОВСКАЯ ЛОДОЧНАЯ ВЕРФЬ

## Закртое акционерное общество

### АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы  
 «Автоматизация технологической подготовки производства реактопластичных  
 полимерных композиционных материалов на основе связи свойств изделия и  
 технологических параметров его изготовления»  
 Александра Ислама Александровича

«22» июня 2020 г.

г. Псков

ЗАО «Псковская лодочная верфь» – специализированное предприятие по серийному производству, ремонту и техническому обслуживанию композитных лодок, катеров и яхт. Основным видами выпускаемой продукции является более 20 видов малых судов длинами от 3 до 15 метров (лодки, катера, яхты, промысловые суда). Вся продукция верфи изготавливается из высококачественного сырья, соответствует современным мировым стандартам.

Предприятие имеет Признание Российского Речного Регистра на право строительства и проектирования стеклопластиковых судов. Все катера, лодки и яхты строятся в соответствии с требованиями ГОСТов, Правил Регистра и Технического регламента Таможенного Союза «О безопасности маломерных судов».

При выполнении работ по разработке конструктивных и технологических решений корпуса и судовой надстройки для скоростного малотоннажного промышленного судна с повышенными технико-экономическими характеристиками, проводимыми ЗАО «Псковская лодочная верфь» совместно с Институтом конструкторско-технологической информатики РАН, было реализован комплект инженерно-исследовательских работ, направленных на создание корпуса и надстройки из композиционных материалов для скоростного малотоннажного промышленного судна. В процессе обеспечения технологической подготовки производства опытных образцов материалов, в также опытных образцов конструкций, изготавливаемых в ходе работ, была применена методика, направленная на автоматизацию технологической подготовки производства модифицированных композиционных материалов на основе связи свойств изделия и технологических параметров его изготовления, разработанная Александровым И.А. Практическая реализация сформулированных Александровым И.А. подходов позволила значительно улучшить свойства композита в целом и позволила применять более технологичные полимеры, которые ранее не использовались из-за своих ограниченных физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Настоящим ЗАО «Псковская лодочная верфь» подтверждает факт и целесообразность внедрения результатов диссертационной работы Александра И.А. «Автоматизация технологической подготовки производства реактопластичных полимерных композиционных материалов на основе связи свойств изделия и технологических параметров его изготовления» на производстве.

Технический директор  
 ЗАО «Псковская лодочная верфь»  
 М.П.

  
 В. В. Чулков

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ООО НПП «ЗСТ»

С.А. Волков

«10» декабря 2019 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Александрова Ислама Александровича «Автоматизация технологической подготовки производства реактопластичных полимерных композиционных материалов на основе связи свойств изделия и технологических параметров его изготовления»

Результаты, полученные И.А. Александровым в рамках диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук имеют реальное практическое значение для предприятия. Автоматизация технологического процесса модификации реактопластичных полимеров наноразмерными углеродными структурами для обеспечения технологической подготовки производства изделий из композиционных материалов позволило ООО НПП «ЗСТ» снизить себестоимость изготовления, повысить производительность за счет автоматизации выбора технологических параметров обработки и оптимизировать сроки разработки технологической документации для стеклопластиковых труб в антистатическом исполнении, предназначенных для транспортировки легко воспламеняемых жидкостей.

Главный инженер

Р.Г. Нургатин



ГРУППА КОМПАНИЙ  
**МАШСПЕЦСТРОЙ**  
www.mssgroup.ru

Композиты  
Оборудование  
НИОКР

Общество с ограниченной ответственностью «ПОТОК-М»  
ОГРН 1025901371902, ИНН 5906050698, КПП 590601001  
Тел.: (342) 203-28-08  
www.mssgroup.ru, info@mssgroup.ru

От 04.10.2019 № \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



**УТВЕРЖДАЮ**

Генеральный директор  
ООО «ПОТОК-М»  
Шаклеин О.В.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

О реализации на предприятии Общество с ограниченной ответственностью «ПОТОК-М» результатов диссертационной работы И.А. Александрова

Наше предприятие успешно сотрудничает с И.А. Александровым – сотрудником Института конструкторско-технологической информатики РАН на протяжении последних лет. Для ООО «Поток-М» группы компаний «Машспецстрой», как для ведущего отечественного промышленного предприятия, результаты диссертационной работы И.А. Александрова представляют интерес для практической реализации на производстве.

Модификация композитных конструкций может быть выполнена различными способами, исходя из технологических возможностей производства, специфики исходных компонентов, квалификации исполнителей, требований к конструктивному либо функциональному исполнению изделий и т.д.

Предлагаемые И.А. Александровым подходы направлены на повышение экономической эффективности производственных процессов и практически доказали свою состоятельность. К преимуществам предлагаемых решений, направленных на построение автоматизированных систем, можно отнести их простоту и высокую надежность.

Методика автоматизации технологической подготовки производства модифицированных композиционных материалов на основе связи свойств изделия и технологических параметров его изготовления успешно внедрена на нашем производстве для изготовления автоматизированных средств технологической подготовки связующего при производстве полимерных композитных конструкций.

Технический директор

А.В. Камнев