

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»



На правах рукописи

Вафаева Христина Максудовна

**Композитные материалы для стеклобазальтопластиковых труб
с повышенными эксплуатационными характеристиками**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ватин Николай Иванович

Санкт-Петербург

2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. ОБЗОР И АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Характеристики гибридных стеклобазальтопластиковых композитных труб	11
1.2 Основные характеристики стеклопластиковых композитных труб.....	15
1.3 Современное состояние исследований оценки дефектов в композитных трубах и их влияния на свойства материала	17
1.4 Неразрушающий контроль композитных труб: современное состояние и перспективы	21
1.5 Фрактальная геометрия как инструмент оценки качества композитных труб	25
1.6 Выводы по главе 1	33
Глава 2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	35
2.1 Стеклобазальтопластиковые композитные трубы	35
2.2 Стеклопластиковые композитные трубы.....	37
2.3 Механические испытания стеклобазальтопластиковых труб.....	38
2.4 Механические испытания стеклопластиковых труб	39
2.5 Экспериментальные исследования стеклобазальтопластиковых труб.....	42
2.6 Экспериментальные исследования стеклопластиковых труб.....	43
2.7 Выводы по главе 2.....	47
Глава 3. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗА СВОЙСТВ СТЕКЛОБАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ....	49
3.1 Постановка задачи по реализации основных этапов метода управления и прогноза свойств стеклобазальтопластиковых труб	49
3.2 Определение рабочей области параметров стеклобазальтопластиковых труб.....	50
3.3 Определение рабочей области рецептурно-технологических факторов для прогноза критериев качества стеклобазальтопластиковых труб	51
3.4 Влияние рецептурных факторов и структуры на свойства стеклобазальтопластиковых труб	52
3.5 Проверка на адекватность разрабатываемого метода на примере реализованных экспериментов с полиуретановой смолой.....	64
3.6 Выводы по главе 3.....	67
Глава 4. УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ	70
4.1 Организация фрактального моделирования композитных материалов	70
4.2 Метод вычисления фрактальной размерности структуры	73
4.3 Определение границ фрактальности (самоподобия) структуры и оценка степени неоднородности структуры исследуемых композитных труб с применением мультифрактального анализа	77
4.4 Установление чувствительности между структурой и свойствами труб	85

4.5	Установление взаимосвязи между размерностными оценками структуры и механическими свойствами	90
4.6	Выводы по главе 4.....	93
Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ И ПРИЧИН ЕЕ РАЗРУШЕНИЯ.....		94
5.1	Фрактальный анализ зон разрушения полимерной трубы, армированной стекловолокном	94
5.2	Модель прогноза осевой прочности стеклопластиковых труб	97
5.3	Выводы по главе 5.....	99
Глава 6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗА СВОЙСТВ СТЕКЛОБАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ		100
6.1	Структурная схема разработанного метода управления и прогноза свойств труб ..	100
6.2	Эффективность применения стеклобазальтопластиковых, стеклопластиковых труб в различных климатических условиях	102
6.3	Экономический расчет эффективности разработанного метода управления и прогноза свойств труб.....	104
6.4	Выводы по главе 5.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		106
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....		108
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....		109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		111
ПРИЛОЖЕНИЯ		122
Приложение А. Акт стендовых испытаний образца из базальтопластика		123
Приложение Б. Протокол испытаний труб кольцевых стеклопластиковых.....		125
Приложение В. Протокол испытания на сжатие стеклопластика.....		127
Приложение Г. Внедрение результатов диссертационной работы в ООО «МЕПОС».....		129
Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ		130
Приложение Е. Внедрение результатов диссертационной работы в ООО «ГидроИзолГрупп»		131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и долговечности композитных труб, которые представляют собой перспективный материал для создания легких, долговечных и энергоэффективных быстро-сборных модульных конструкций с необходимым сочетанием характеристик, таких как высокая прочность, коррозионная стойкость и др. Предложено для установления связи между структурой и свойствами применять теорию фракталов, что позволяет не только эффективно прогнозировать и корректировать свойства труб в процессе производства, но и существенно сократить объем экспериментальных исследований.

Потребность в научно обоснованном и экспериментально подтвержденном методе управления свойствами стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов становится особенно актуальной в связи с возможностью расширения их функциональности и повышения экономической эффективности применения для различных климатических регионов.

Степень разработанности темы. Проведенные исследования композитных материалов демонстрируют существенное продвижение в изучении их свойств, а также в разработке методов прогнозирования их эксплуатационных и физико-механических характеристик. Многие исследователи (А. Г. Терешков [1–3], V.V. Cao [4], T. Pavan Kumar [5], Amith H. Gadagi [6], H. Dai [7], Ü. Yurt [8], И. П. Малашин [9–13], Ch. Yao [14; 15], M. Fawad [16–18], Sh. Philip [19; 20], Y. Wei [21–25] и др.) посвятили свои работы изучению свойств композитных материалов и разработке методов прогнозирования их характеристик. В частности, исследования гибридных стеклобазальтопластиковых композитных труб продемонстрировали высокую коррозионную стойкость и пригодность для эксплуатации в суровых климатических условиях [26–29]. Однако, несмотря на достигнутые успехи, сохраняется ряд нерешенных задач.

Отсутствие комплексных методов оценки свойств материалов, направленных на сокращение объема испытаний представляет собой существенное ограничение. Недостаточная разработанность моделей для прогнозирования свойств композитов на основе их компонентного состава и структуры, обусловленная сложностью учета многофакторных процессов формирования композитов, также является значимой проблемой.

Применение теории фракталов для описания структуры строительных материалов и изделий [30–37] создает новые возможности в прогнозировании свойств композитов, позволяя количественно описать их неоднородность, иерархичность и устойчивость к деформациям. Несмотря на активное развитие исследований в области композитных материалов и фрактального моделирования, остается ключевой пробел, который заключается в отсутствии

метода, устанавливающего прямые количественные зависимости между фрактальными параметрами структуры стеклобазальтопластиковых труб и их эксплуатационными характеристиками. Актуальность разработки таких методов усиливается в контексте необходимости сокращения ресурсоемких экспериментальных испытаний и перехода к цифровому проектированию материалов.

Объектом исследования являются строительные изделия из композитного материала (стеклобазальтопластика или стеклопластика) в виде труб, используемых как конструктивные строительные элементы.

Предметом исследования являются механические характеристики композитных труб (прочность на растяжение, прочность на сжатие, модуль упругости).

Цель исследования заключается в разработке научно обоснованного метода оперативной оценки механических характеристик изделий из стеклобазальтопластика.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

- обоснование метода подбора входных параметров при производстве изделий, позволяющих испытать изделие (стеклобазальтопластиковые трубы) с заданным сочетанием свойств и определение областей требуемых свойств;
- разработка метода (с применением теории фракталов) для прогнозирования механических свойств стеклобазальтопластиковых труб, включающего определение чувствительности к спектру механических свойств и к спектру фрактальных размерностей и обеспечивающего сокращение объема испытаний;
- применение метода, основанного на теории фракталов для мониторинга зон разрушения труб с использованием фрактальной размерности в качестве индикатора трансформаций деформационного рельефа;
- апробация и внедрение полученных результатов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Обоснован и экспериментально подтвержден метод прогнозирования механических свойств (предел прочности на разрыв, предел прочности на сжатие и модуль упругости) стеклобазальтопластиковых труб, обеспечивающий сокращение объема испытаний.

1. Установлено влияние рецептурных факторов на свойства изделий, а именно: доли стеклоровинга (волокна) и связующего, рационально подобранного диаметра волокна, выбора эпоксидной смолы, отвердителя и ускорителя. Определены рациональные границы варьирования рецептурно-технологическими факторами: 60-66% стеклоровинга, 30-35% связующего и диаметр волокон 5-11 мкм.

2. Установлены чувствительности к фрактальной размерности элементов структуры труб и к их пределу прочности на разрыв, пределом прочности на сжатие, а также к модулю

упругости, что дает возможность прогнозирования механических характеристик изделий по фрактальным размерностям. Показано, что модели, основанные на результатах изучения фрактальных размерностей имеют относительную погрешность 3–7% прогнозирования механических характеристик, что подтверждает надежность предложенного метода прогнозирования, направленного на сокращение объема испытаний.

3. С использованием теории мультифракталов выявлено влияние неоднородности структуры материала изделий в диапазоне 6–15% на механические характеристики исследуемых композитных труб. При этом неоднородность заключается в неравномерном распределении элементов структуры материала, в которой каждая структурная составляющая характеризуется собственной фрактальной размерностью. Рассчитаны мультифрактальные параметры, характеризующие неоднородность структуры материала, включая степень однородности, скрытую периодичность и регулярность. Результаты анализа показали, что фрактальная размерность может служить индикатором качества исследуемых труб, предоставляя возможность оперативно определять количественные критерии для их оценки.

4. Предложено использовать разработанный метод прогнозирования, в котором фрактальная размерность используется в качестве показателя, отражающего геометрические особенности деформационного рельефа для выявления зон возможного разрушения труб из стеклопластика на микроструктурном уровне. В ходе фрактального анализа зон разрушения образцов труб установлено следующее: для разрушенных зон фрактальный коэффициент неоднородности находится в диапазоне значений $3.0 > D_{200}/D_{-200} > 2.5$, а для недеформированных однородных областей матрицы стекловолокна коэффициент неоднородности $2.0 > D_{200}/D_{-200}$.

5. Установлено, что каждый тип исследуемого разрушения (хрупкое разрушение поверхностных слоев, горизонтальное разрушение продольно направленных волокон, продольное разрушение поперечно ориентированных волокон, боковое разрушение слоев, ориентированных под углом) характеризуется фрактальными размерностями, что создает основу для установления связи между макропараметрами (свойствами) и микропараметрами (микроструктурой зон разрушения), позволяющую более точно предсказывать поведение материалов в процессе эксплуатации.

Практическая значимость полученных экспериментальных данных заключается в возможности использования данных для разработки составов композитов и прогнозирования механических свойств композитов на основе определения границ варьирования рецептурно-технологических параметров (68-75% стеклоровинга, 22-29% связующего и диаметр волокон 5-11 мкм) с пределом прочности на сжатие 320–370 МПа, с пределом прочности на растяжение в окружном направлении 400–480 МПа, осевым модулем упругости на растяжение 16.7–19.2 кг/мЗ.

Разработанные модели дают возможность оценки характеристик σ_r , σ_s и E труб в заданной зоне рабочих значений рецептурно-технологических факторов с относительной погрешностью 3.3% до 8.0%.

Практическая значимость имеет разработка неразрушающего метода экспресс-контроля качества композитных труб, основанного на применении теории фракталов. В рамках метода построены эмпирические модели, которые опираются на анализ наиболее чувствительных параметров фрактальных размерностей и свойств труб, что позволило достичь высокой точности прогнозирования характеристик, с коэффициентом парной корреляции $R^2=0.92-0.98$. Преимущество метода заключается в его экономической эффективности, так как значительно сокращает временные и материальные затраты на проведение лабораторных и натурных испытаний благодаря прогнозированию свойств на основе разработанных моделей.

Теоретическая значимость. Выполненные экспериментальные исследования являются основой для углубления теоретических представлений о закономерностях структурообразования композитов и развития прогностических теорий композитных материалов. Теоретическая значимость работы заключается в расширении знаний о стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых композитах и о процессах их структурообразования, что позволит обеспечить их требуемые механические характеристики. Применение теории фракталов для анализа их структуры позволяет выявить новые закономерности и создать модели, описывающие влияние фрактальной размерности ровинга и связующего труб на предел прочности при растяжении, сжатии, модуль упругости, и позволяющие таким образом предсказывать их для этих материалов.

Методы исследования включают:

1. Экспериментальные исследования: проведение физических экспериментов для измерения и анализа свойств стеклопластиковых и стеклобазальтопластиковых труб. Эксперименты включают испытания на прочность, модуль упругости, разрушение, изгиб и др.
2. Аналитические и статистические исследования с целью оценки данных, полученных в результате экспериментов и численных расчетов, включающие в себя корреляционные анализы, регрессионные модели и другие статистические методы.

Комплексный подход, объединяющий экспериментальные исследования и статистический анализ, позволил получить надежные и всесторонние данные о поведении композитных материалов, что в свою очередь, обеспечило глубокое понимание взаимосвязи между структурой, составом и свойствами композитных труб.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование и экспериментальная верификация метода прогнозирования механических свойств (прочность на разрыв/сжатие, модуль упругости) стеклобазальтопластиковых труб для

сокращения объема испытаний, базирующегося на анализе фрактальной размерности структуры (погрешность прогноза $\leq 7\%$);

- установленные количественные зависимости между рецептурно-технологическими параметрами (доля ровинга 60–66%, связующего 30–35%, диаметр волокон 5–11 мкм) и эксплуатационными характеристиками, обеспечивающие целенаправленное проектирование труб с заданным комплексом свойств;

- выявленная корреляция фрактальной размерности элементов структуры (матрица, волокна, зоны разрушения) с механическими свойствами, позволяющая использовать фрактальный анализ как критерий оперативной оценки качества;

- обоснование применения мультифрактальных параметров (степень однородности, скрытая периодичность) для оценки структурной неоднородности материала и прогнозирования локализации зон разрушения на микроструктурном уровне;

- метод идентификации типов возможного разрушения (хрупкое, горизонтальное, продольное) по фрактальным размерностям деформационного рельефа, устанавливающий связь между микроструктурными аномалиями и макромеханическим поведением труб в условиях эксплуатации.

Степень достоверности результатов подтверждается использованием современных методов исследования (использованы современные методы экспериментальной физики, механики разрушения), большим объёмом экспериментальных исследований. Комбинация экспериментальных исследований и аналитических методов позволила получить разносторонние данные и повысить надежность результатов. Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с результатами моделирования, что подтвердило адекватность разработанных моделей. Выводы и рекомендации, полученные в ходе исследования, согласуются с современными научными представлениями в данной области.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждены на 6 конференциях и межвузовских научных семинарах, отраслевых форумах в 2023–2024 г.:

- 1 Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы военного строительства, военной экономики, финансового и квартирно-эксплуатационного обеспечения ВС РФ», доклад «Исследование стеклобазальтопластиковых труб в составе префаб-конструкций для защиты стоянок самолетов от климатических воздействий в умеренных и арктических климатических районах», Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения ВИ (ИТ) ВА МТО, г. Санкт-Петербург, октябрь 2023 г.

- 2 Международная научно-практическая конференция «Информационные системы и технологии АПК и ПГС», секция «Транспортные системы и эксплуатация машинно-

тракторного парка АПК и ПГС», доклад «Nanotechnology in Construction: New Composite Materials Based on Carbon Nanotubes», Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, г. Курск, октябрь 2023.

3 Отраслевой форум «Морские и речные порты России: инфраструктура, инвестиции», доклад «Сборные конструкции из гибридных стеклобазальтовых композитных труб для умеренных и арктических условий», г. Сочи, ноябрь 2023 г.

4 Международная конференция «Материалы и технологии нефтегазовой отрасли. Коррозия», доклад «Сборные конструкции из гибридных стеклобазальтопластиковых труб для умеренных и арктических условий», г. Санкт-Петербург, май 2024 г.

5 Межвузовский научный семинар «Цифровой инжиниринг в гражданском строительстве», доклад «Композитные трубы в сборных конструкциях», г. Санкт-Петербург, ноябрь 2024 г.

6 Межвузовский научный семинар «Цифровой инжиниринг в гражданском строительстве», доклад «Композитные материалы для стеклобазальтопластиковых труб с повышенными эксплуатационными характеристиками», г. Санкт-Петербург, декабрь 2024 г.

Внедрение результатов исследований. Метод контроля качества стеклобазальтопластиковых труб, позволяющих проводить экспресс-контроль их характеристик/свойств и регулировать ими на предпроектной стадии внедрен в производство изделий из композитных материалов в ООО «Мепос» (г. Екатеринбург, РФ), ООО «ГидроИзолГрупп» (г. Санкт-Петербург, РФ).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях в количестве 26 публикаций. В том числе: 2 статьи в журналах из актуального перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 8 статей в журналах, входящих в перечень «Белый список», 6 статей индексируемых в RSCI, 9 статей в журналах, индексируемых в SCOPUS и WoS. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Автором произведен выбор материалов и методов, проведен комплекс экспериментальных исследований, выполнен детальный анализ и обработка полученных данных. Разработаны модели, описывающие влияние фрактальных характеристик структуры материалов на их свойства, проведены расчеты и анализ результатов моделирования. Разработан экспресс-метод оценки и прогноза механических свойств композитных труб, а также метод мониторинга их структурного состояния на основе анализа фрактальной размерности, составлены практические рекомендации по применению разработанного метода оценки качества композитных труб.

Структура и объем работы состоит из введения, шести глав, основных выводов,

списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 140 странице машинописного текста, включающего 15 таблиц, 60 рисунков и фотографий, список литературы из 147 наименований, 6 приложений.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 2.1.5. «Строительные материалы и изделия»:

- п. № 11. «Разработка методов прогнозирования и оценки долговечности строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации»;
- п. № 17. «Развитие системы контроля и оценки качества строительных материалов и изделий».

Глава 1. ОБЗОР И АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В условиях повышенного интереса к развитию инфраструктуры в арктических регионах особое значение приобретает разработка надежных методов управления и прогнозирования механических свойств стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб. Эти трубы также предназначены для эксплуатации в суровых климатических условиях, что требует тщательного изучения их характеристик, включая состав, строение, дефекты и эксплуатационные свойства. Комплексное исследование указанных аспектов позволяет не только выявить наиболее рациональные способы решения поставленных задач, но и добиться высокой точности получаемых результатов при минимальных затратах ресурсов, как временных, так и материальных.

1.1 Характеристики гибридных стеклобазальтопластиковых композитных труб

Тенденции в области создания композитных материалов направлены на использование возобновляемых компонентов. Натуральные волокна, как минеральные, так и растительные, все чаще применяются в качестве армирующих элементов в полимерных композитах благодаря своей универсальности и обработке [38]. Относительно невысокая стоимость производства, включая экологическую безопасность натуральных волокон, свидетельствуют о перспективности использования данного материала при создании легких и экономичных композитов, что обуславливает растущий мировой спрос на такую продукцию [39].

Эпоксидные смолы, как одни из наиболее распространенных термореактивных полимеров, широко используются в качестве матрицы для создания электроизоляционных материалов, покрытий, ламинатов и композитов. Их популярность обусловлена свойствами, такими как высокая теплопроводность, низкая усадка, механическая стабильность, простота обработки и химическая и физическая стойкость [40; 41].

В контексте глобальных климатических изменений возрастает потребность в разработке композитных материалов. Приоритетным направлением становится создание композитов с возможностью рециркуляции, способных удовлетворять высоким требованиям к производительности, долговечности и безопасности [42].

Традиционно в композитных материалах используются стеклянные (GF) и углеродные (CF) волокна в качестве армирующих элементов. Однако стремление к снижению экологической нагрузки и производственных затрат способствует поиску альтернативных материалов. Перспективным решением является использование натуральных минеральных волокон, в частности базальтового волокна, получаемого из вулканических пород.

Базальтовые волокна демонстрируют ряд преимуществ по сравнению со стеклянными

аналогами (Таблица 1.1). Они характеризуются более высокими физико-механическими характеристиками и лучшей щелочестойкостью. При этом базальтовые композиты характеризуются более низкой стоимостью и более простой переработкой [38], [43; 44].

Таблица 1.1 - Сравнение механических свойств базальтовых и стеклянных волокон [38; 45]

Свойства/Тип волокна	Базальт (Basalt)	Е-стекло (E-glass)	S-стекло (S-glass)
Диаметр основания (мкм)	6-21	6-21	6-21
Плотность (г·см ⁻³)	2.65-3.00	2.55-2.62	2.46-2.49
Прочность на разрыв (МПа)	3000-4840	3100-3800	4590-4832
Модуль упругости (ГПа)	79.3-93.1	72.5-75.5	88-91
Удлинение при разрыве (%)	3.1	4.7	5.6
Цена (Рубль/кг)	225-315	66-108	450-630

Композиты, созданные на базе базальтовых волокон (BFRP), привлекают внимание своими механическими и термическими свойствами, делая их перспективными для эксплуатации в условиях более высоких температур [46]. Сравнительный анализ со стеклянными волокнами показывает, что базальтовые волокна имеют эквивалентную прочность на разрыв, а также более высокие показатели модуля упругости и стойкости к щелочным средам. Базальтовые волокна имеют преимущества перед углеродными как по огнестойкости, так и по теплоизоляционным характеристикам [41; 47].

Производство базальтовых волокон из природного сырья не сопровождается выбросами вредных веществ, характерных для производства стекловолокон, что делает их более безопасными для утилизации [48], [49]. Высокая химическая стойкость базальтовых волокон, особенно их устойчивость к окислению, позволяет использовать их в качестве катализаторов для очистки сточных вод и газовых выбросов без дополнительного загрязнения окружающей среды [50].

Базальтовые волокна рассматриваются как перспективная альтернатива стекловолоконам в композитных материалах, особенно при создании композитов с биоразлагаемыми матрицами, что способствует развитию замкнутых производственных циклов. Высокая прочность на разрыв и значительный модуль упругости, в сочетании с экологической безопасностью и доступностью, делают базальтовые волокна конкурентоспособными кандидатами для производства композитов для различных областей применения [39; 51].

Экспериментальные исследования показывают возможность регулирования свойств базальтовых композитов путем выбора типа матрицы и методов модификации поверхности волокон [39; 48; 51–54]. Перспективным направлением также является создание гибридных композитов, сочетающих базальтовые волокна с другими типами армирующих элементов [39].

Базальтовые композиты применяются в сфере гражданского строительства, различных инфраструктурных проектах, а также в химической и автомобильной промышленности, включая производство защитных материалов от воздействия ударов и пожаров [39].

Механические характеристики слоистых композитов зависят во многом от характеристик их состава, прочности адгезии на границе раздела фаз и технологических параметров производства [46], [55]. Армирующие волокна и полимерная матрица вносят основной вклад в формирование механических характеристик материала, однако существенное влияние оказывает также технология производства композита, которая может существенно изменять конечные свойства материала.

Для улучшения механических свойств базальтовых композитов исследователи активно применяют различные подходы. Один из них заключается в модификации полимерной матрицы (например, эпоксидной смолы) путем введения нано- или микромасштабных наполнителей (графеновых нанопластин, наноглины, углеродных нанотрубок и др.) [56–61]. Другой подход связан с обработкой поверхности базальтовых волокон силанами, что позволяет улучшить адгезию между волокном и матрицей [62; 63]. Кроме того, ориентация волокон и слоистая структура композита существенно влияют на его механическое поведение и характер разрушения [64–66].

Базальтовые композиты демонстрируют перспективность в сравнении с традиционными композитами на основе стеклянных или углеродных волокон. Несмотря на то, что их механические свойства еще недостаточно изучены, они уже активно исследуются и разрабатываются [67].

Гибридные композиты, созданные на базе базальтовых волокон, в особенности в сочетании с углеродными или стеклянными волокнами, характеризуются высокими показателями механических свойств и высокой термостойкостью [68], [69]. Добавление базальтового порошка в композиты позволяет повысить их жесткость и термостойкость [70]. Анализ оптической микроскопии образцов композитных ламинатов на основе базальтовых и стеклянных волокон показал, что они успешно выдерживают различные типы нагрузок и демонстрируют характерные режимы разрушения [71]. Несмотря на высокую анизотропию, образцы проявляют схожее поведение при различных типах нагрузок, что подтверждается сопоставимыми значениями прочности, жесткости и деформации.

Гибридные стеклобазальтопластиковые трубы (Рисунок 1.1) представляют собой перспективное решение в области композиционных материалов, так как полимерная матрица в таких трубах обеспечивает не только сцепление между волокнами, но и структурную целостность материала.

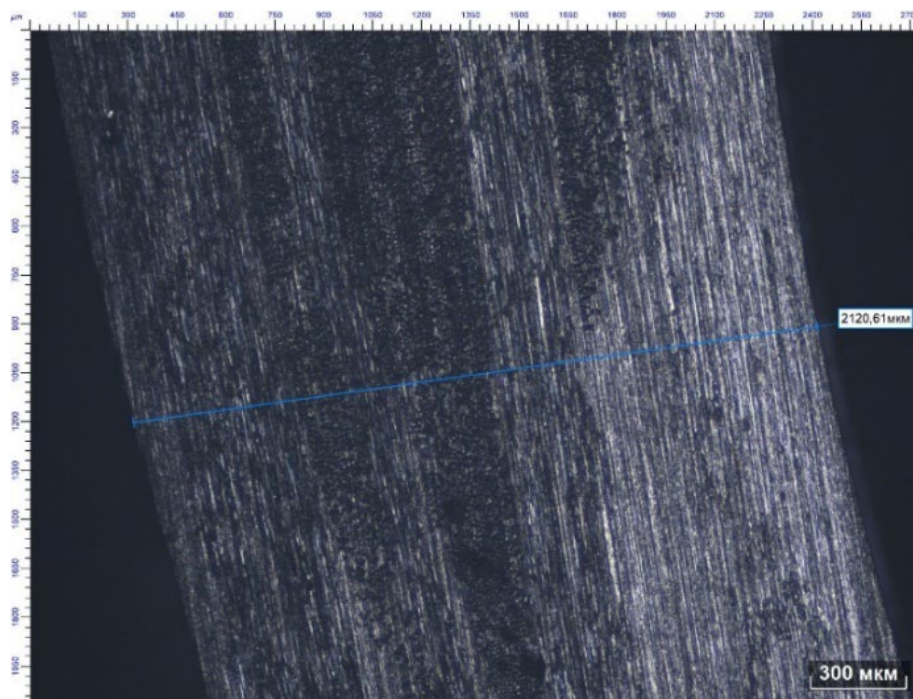


Рисунок 1.1 - Типичное строение стеклобазальтопластиковых труб с эпоксидной связующей

Наиболее распространёнными матрицами для композитных материалов являются эпоксидные и полиэфирные смолы. Эпоксидные смолы выделяются своими высокими механическими свойствами, химической стойкостью и адгезией к армирующим волокнам. Полиэфирные смолы уступают эпоксидным по ряду параметров, их основным преимуществом является более низкая стоимость.

Армирование гибридных труб осуществляется комбинацией стекловолокна и базальтового волокна. Стекловолокно обеспечивает высокий уровень прочности на растяжение и изгиб, тогда как базальтовое волокно придаёт материалу повышенную термостойкость и устойчивость к химическим воздействиям. Сочетание этих волокон позволяет достичь требуемого комплекса свойств для композитного материала.

Гибридные трубы характеризуются высокой прочностью на растяжение и сжатие, что позволяет им выдерживать значительные механические нагрузки. Прочностные характеристики этих труб зависят от типа матрицы и ориентации армирующих волокон. Хотя модуль упругости гибридных труб уступает аналогичным показателям металлов, он значительно превосходит показатели большинства пластиков. Высокая ударная вязкость гибридных труб гарантирует сохранение целостности материала при влиянии динамической нагрузки. Диэлектрические свойства гибридных труб делают их очень ценными для использования в областях электроники и электротехники, повышая при этом их устойчивость к воздействию агрессивных сред (к примеру, кислоты, щелочи и соли), что значительно расширяет возможности их применения в условиях высокой влажности и агрессивных сред.

Гибридные трубы также демонстрируют способность эффективно функционировать в

широком диапазоне температур, от низких до высоких, причём конкретный температурный диапазон зависит от типа матрицы и армирующих волокон. Для повышения долговечности при эксплуатации на открытом воздухе гибридные трубы подвергаются специальной обработке, включающей нанесение защитных покрытий, которые улучшают их устойчивость к ультрафиолетовому излучению. Низкая теплопроводность гибридных труб, обусловленная наличием пор и воздушных включений в структуре материала, делает их эффективными для теплоизоляции и снижения энергопотерь.

Комбинация высокой прочности и малого веса делает гибридные трубы рациональным выбором для конструкций, где важны лёгкость и прочность. Высокая коррозионная стойкость обеспечивает надёжную эксплуатацию в условиях повышенной влажности и агрессивных сред, где традиционные металлические трубы склонны к преждевременному износу. Гибридные стеклобазальтопластиковые трубы также находят широкое применение в сборных конструкциях, представляющих собой строительные системы, состоящие из предварительно изготовленных элементов, таких как модульные здания, панели для стен и перекрытий, лестничные марши и другие элементы, собираемые непосредственно на объекте.

Представленные данные свидетельствуют о значительных перспективах их использования в умеренных и арктических условиях, а также о развитии эффективных методов контроля качества с высокой точностью прогноза, что обеспечит необходимое качество труб и увеличит срок их эксплуатации с учётом возможных структурных изменений.

1.2 Основные характеристики стеклопластиковых композитных труб

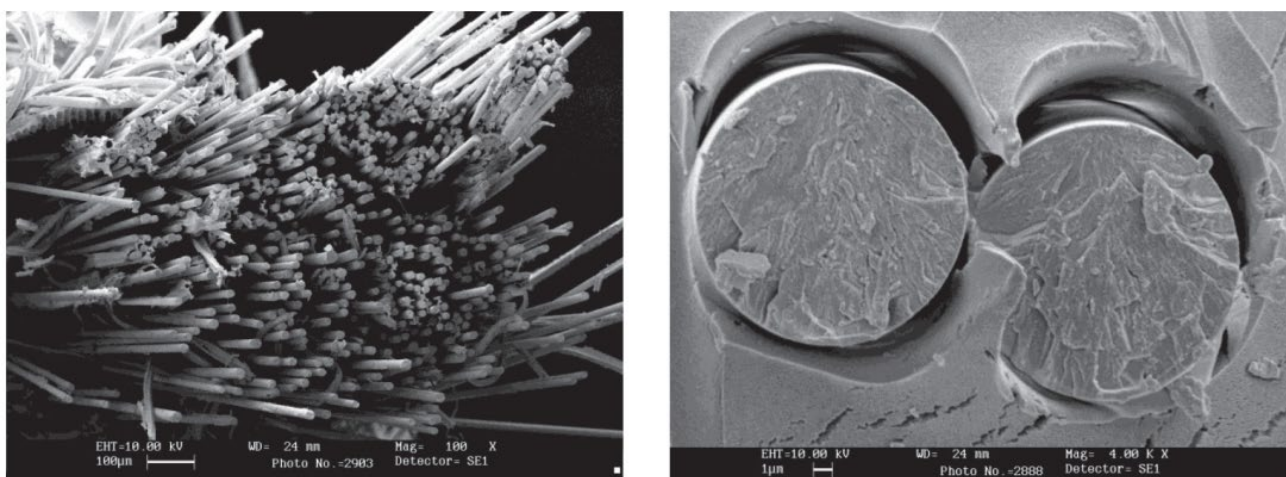
Полимерные матрицы в композитах ценятся за малый вес, удобство обработки и высокую прочность. Высокотемпературные смолы незаменимы в производстве материалов для аэрокосмической, судостроительной и других высокотехнологичных отраслей.

В углеродно-эпоксидных композитах основную нагрузку несут волокна, усиленные полимерной матрицей. Свойства волокон значительно влияют на прочность и жесткость композита [72–74]. Стекловолоконные композиты сочетают в себе высокую прочность, жесткость и небольшой вес, превосходя многие металлы по этим характеристикам. Их высокая усталостная прочность делает их устойчивыми к циклическим нагрузкам [74].

Механические свойства волокнистых композитов, согласно исследованиям [75], определяются комплексом факторов: типом, количеством и ориентацией волокон, свойствами матрицы, наличием дефектов и силой сцепления между волокнами и матрицей. Последняя играет критическую роль в передаче нагрузки на межфазных границах. Как показано в работе [73], прочность волокон может существенно изменяться под воздействием окружающей среды.

Стеклопластиковые трубы представляют собой композитный материал, который

характеризуется относительно высокими показателями прочности, а также коррозионной стойкости и невысокому удельному весу, что позволяет находить им более широкое применение в разных промышленных областях. В состав стеклопластиковой трубы входит армированная стекловолокном полимерная матрица (Рисунок 1.2). В качестве самой матрицы такой трубы наиболее часто применяются эпоксидные или полиэфирные смолы. Эпоксидные смолы обеспечивают более высокие прочностные и химические характеристики, однако они дороже. Полиэфирные смолы являются более экономным вариантом, но их механические свойства несколько ниже.



а-б

Рисунок 1.2 - Фрактографические особенности, показывающие (а) продольное расщепление и (б) радиальные волокна (образец стеклопластика) [73]

Основой стеклопластиковой трубы является полимерная матрица, армированная стекловолокном. Вид и ориентация стекловолокна (ровинг, мат, ткань) оказывают значительное влияние на механические свойства композита. Продольная ориентация волокон способствует увеличению прочности на растяжение, в то время как хаотическая ориентация повышает ударную вязкость. Для защиты от ультрафиолетового излучения и увеличения долговечности при наружной эксплуатации стеклопластиковые трубы покрываются специальными защитными составами.

Покрытия для труб повышают их устойчивость к ультрафиолетовому излучению, сохраняя эксплуатационные характеристики на протяжении длительного времени.

Металлические трубопроводы долгое время оставались основой трубопроводной промышленности. Их способность выдерживать различные промышленные требования сделала их стандартом для транспортировки нефти, газа и воды. Однако, несмотря на их широкое использование, у металлических трубопроводов существует серьезная проблема: склонность к коррозии [76; 77]. Уязвимость к коррозии вызывала опасения относительно их долговечности и

безопасности, что побудило провести значительные исследования и инвестиции в методы предотвращения и смягчения коррозии [78].

Наблюдается стремительный рост популярности композитных труб, особенно тех, что изготовлены из армированного стекловолокном полимера (FRP) [79]. Основным фактором, выделяющим FRP-трубы на фоне традиционных металлических аналогов, является их коррозионная стойкость [80]. Кроме того, FRP-трубы обладают высокой гибкостью настройки [81], что позволяет разрабатывать индивидуальные решения для конкретных промышленных нужд. Тем не менее, несмотря на многочисленные преимущества FRP-труб, их широкое внедрение в промышленность сталкивается с рядом проблем [82].

Одной из основных проблем является старение композитных материалов. В отличие от металлических труб, где процессы старения и деградации достаточно хорошо изучены, механизмы старения FRP-труб остаются менее понятными [83], [84]. Это связано с неоднородной структурой композитных материалов и сложным взаимодействием различных компонентов. Как результат, композитные трубы демонстрируют более сложное поведение при эксплуатации, особенно при длительных нагрузках. Недостаток знаний о типах дефектов, их возникновении и развитии, а также о долгосрочном поведении FRP-труб под воздействием различных факторов окружающей среды затрудняет точную оценку их долговечности и надежности.

1.3 Современное состояние исследований оценки дефектов в композитных трубах и их влияния на свойства материала

Анализ существующих исследований [76–80; 82–85] выявляет несколько характерных тенденций в области композитных материалов на основе стекловолокна. В большинстве из указанных источников отмечается смещение акцента исследовательского сообщества в сторону экспериментальных методов, в противовес теоретическим числовым моделям. Эта тенденция предполагает стремление учитывать сложности реальных образцов. Однако многие эксперименты проводятся в контролируемых лабораторных условиях, что ограничивает их применимость в реальных ситуациях.

Большая часть исследований (около 40%) [83] стекловолоконных труб сосредоточена на материалах на основе эпоксидной смолы (GRE), что обуславливает их доминирование в трубопроводной отрасли. Экспериментальные исследования, как правило, проводятся на образцах длиной 0.5-1 метр, что позволяет изучать фундаментальные свойства материала, однако не позволяет адекватно оценить поведение труб в реальных условиях эксплуатации, где длина трубопроводов достигает километров, а присутствуют различные соединительные элементы и вспомогательное оборудование [83].

Вышеперечисленные исследования полезны для фундаментального анализа, однако, сосредоточение на коротких трубах может упускать из виду сложности реальных трубопроводных систем, которые могут простираться на километры и включать различные вспомогательные компоненты, такие как клапаны, сварные швы и устройства управления потоком. Эти компоненты критичны, так как дефекты могут возникать в любых частях системы, а не только на поверхности труб, и могут серьезно повлиять на эксплуатационную целостность системы.

Кроме того, в [83] отмечается предпочтение диаметров труб в диапазоне от 50 до 120 мм. Это предпочтение указывает на тенденцию к производству FRP труб меньшего диаметра, которые все чаще заменяют металлические аналоги. Примерно 30% литературных источников также исследуют трубы диаметром более 120 мм, что поддерживает идею о том, что более крупные композитные конструкции осуществимы и находят применение в таких областях, как канализация и очистка воды. Эта тенденция свидетельствует об универсальности и масштабируемости технологии FRP, которая может удовлетворить широкий спектр промышленных потребностей.

В отличие от металлических материалов, в которых дефекты имеют более ограниченный спектр, композиты из стеклопластика (FRP) характеризуются широким разнообразием дефектов, отличающихся по типу, масштабу, месту возникновения и путям развития. Дефекты в FRP могут зарождаться и прогрессировать на всех этапах жизненного цикла материала: от производства до эксплуатации, включая хранение и монтаж [86].

Рисунок 1.3 обобщает дефекты, возникающие в FRP-композитах, с классификацией по стадиям их возникновения и масштабу. Спектр дефектов охватывает широкий диапазон – от наноразмерных несовершенств до макроскопических структурных повреждений, что подчеркивает сложность и неоднородность композитных материалов. Генезис дефектов обусловлен различными факторами, включая условия производства, внешние воздействия (температура, влажность, химические вещества) и механические нагрузки, которые могут как инициировать их появление, так и способствовать росту и развитию.

Также, классификация, представленная на Рисунке 1.3, обобщает результаты ряда исследований [87,88] и демонстрирует, что механизмы дефектообразования в FRP существенно отличаются от процессов, наблюдаемых в металлах [89]. Взаимодействие различных типов дефектов формирует сложную сеть, которая может ускорять деградацию материала [90]. В отличие от металлов, где границы дефектов обычно четко определены, в FRP дефекты могут проявляться и изменяться динамически со временем. Анизотропная природа FRP и их чувствительность к множеству внешних факторов [91–93], [94] требуют глубокого анализа механизмов дефектообразования для обеспечения надежности конструкций из этих материалов.

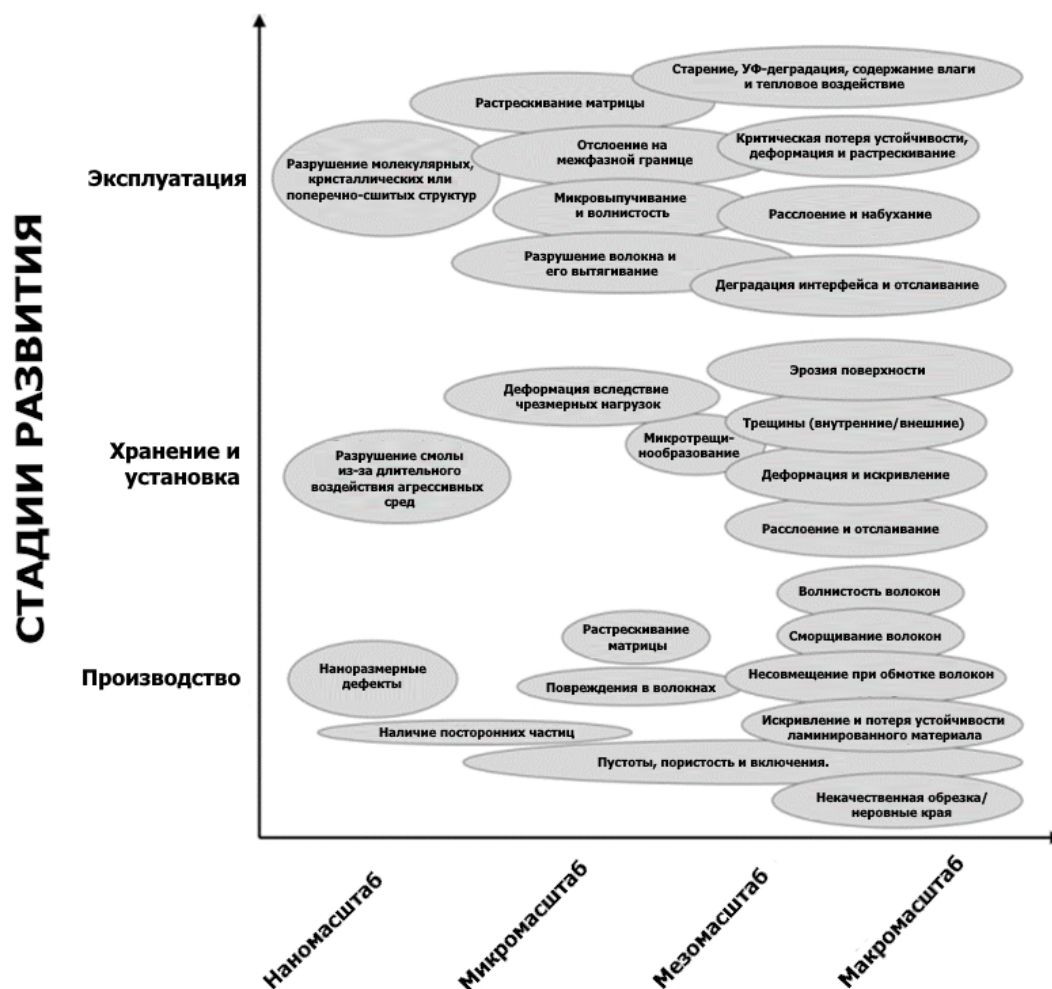


Рисунок 1.3 - Жизненный цикл и масштабная классификация дефектов в армированных стекловолокном полимерных композитах [83]

Классификация разделена на три основных сегмента: *производство* (Manufacturing), *хранение и установка* (Storage and installation), а также *эксплуатация* (In-service), которые соответствуют жизненному циклу композитов FRP:

1. *Производство*. На начальном этапе производства преобладают дефекты микро- и наномасштаба, такие как посторонние включения, трещины в матрице, волнистость волокон и несоосность нитей. Также характерны дефекты мезомасштаба, например, коробление ламината и пористость. Точность производственных процессов существенно влияет на количество и тип возникающих дефектов.

2. *Хранение и установка*. На этом этапе к уже существующим дефектам добавляются макроскопические повреждения, вызванные внешними воздействиями: трещины, эрозия, различные виды растрескивания из-за перенапряжений и деградации смолы. Правильные условия хранения и бережная установка способствуют минимизации повреждений.

3. *Эксплуатация*. В процессе эксплуатации композитов FRP возникают самые серьезные макроскопические дефекты: растрескивание матрицы, разрыв волокон, расслоение, набухание и

деградация интерфейса. Эти дефекты обусловлены длительной эксплуатацией и воздействием агрессивных сред.

Рисунок 1.3 также демонстрирует, что дефекты в композитах FRP имеют тенденцию к развитию и перерастанию в более крупные повреждения. Небольшие начальные дефекты могут служить зародышами для трещин, которые со временем увеличиваются в размерах, что подчеркивает важность ранней диагностики и предотвращения развития дефектов.

Идентификация характеристик дефектов в специализированных конструкциях ответственного назначения, как, например, трубопроводы, имеет очень важное значение. Трубопроводы, изготовленные из армированного волокном полимера (FRP), в связи с их спецификой часто используются в экстремальных условиях: под землей или под водой. Это обуславливает появление специфических типов дефектов, вызванных как особенностями производственного процесса, так и внешними воздействиями.

Наблюдается значительный рост интереса к трубам FRP в нефтяной, газовой и водопроводной отраслях, что обусловлено их высокой коррозионной стойкостью, благоприятным соотношением веса и прочности, снижением затрат на техническое обслуживание и возможностью индивидуальной настройки под конкретные требования заказчика [95]. Однако сложные производственные процессы, а также особые требования к обработке и установке этих труб делают их уязвимыми к различным дефектам, которые могут существенно снижать их физико-механические свойства и приводить к преждевременному разрушению.

В контексте исследований, направленных на оценку дефектов в композитных трубах и их влияния на эксплуатационные характеристики, особенно актуально расширение анализа используемых материалов в свете развития новых технологий. В этом контексте значительный интерес представляет исследование возможностей наноматериалов и других инновационных структур для создания более устойчивых систем. В проведенном исследовании [96], посвящённом разработке материалов для устойчивого хранения энергии, рассматриваются наноматериалы, полимеры и металлоорганические каркасы как перспективные решения, способные улучшить существующие технологии за счёт их физических и химических свойств.

Подобные инновационные материалы могут найти применение и в области разработки композитных труб. Использование наноматериалов, может значительно повысить устойчивость трубопроводов к дефектам, возникающим в процессе эксплуатации. Внедрение современных методов структурного анализа, характеризационных техник на наноуровне и моделирования также открывает возможности для более глубокого понимания механизмов возникновения и развития дефектов, что потенциально позволит снизить риск разрушения композитных материалов в экстремальных условиях эксплуатации.

Несмотря на прогресс в данной области, в настоящее время всё ещё отсутствует комплексное понимание процессов развития дефектов в композитных трубах, затрудняющее их прогнозирование и предотвращение. Этот пробел подчёркивает необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку эффективных методов обнаружения, оценки и устранения дефектов в композитных материалах.

1.4 Неразрушающий контроль композитных труб: современное состояние и перспективы

Современные методы неразрушающего контроля (NDT) композитных материалов позволяют оценивать их качество и безопасность без нанесения ущерба структуре. Эти методы особенно важны для материалов, эксплуатируемых в сложных условиях, где воздействие экстремальных температур, ветров и осадков может приводить к образованию дефектов. Основой NDT является использование международных стандартов ISO и ASTM, разрабатываемых с учётом исследований отраслевых ассоциаций, таких как UCNDT и Американское общество неразрушающего контроля [97]. В условиях арктического климата требуются материалы, обладающие высокой прочностью, морозостойкостью и устойчивостью к циклическим нагрузкам. К примеру, стеклопластик, доказал свою устойчивость к агрессивным климатическим воздействиям, что подтверждается исследованием его физико-механических свойств [98].

Также перспективным направлением является использование стеклобазальтопластиковых труб, которые продемонстрировали высокие механические характеристики при циклических нагрузках [99]. Применение углеродных нанотрубок в качестве усилителей композитов открывает новые возможности для улучшения их эксплуатационных характеристик, таких как прочность, долговечность и устойчивость к коррозии, что критично для арктических условий [100], [101], [102], [103]. Исследования подтверждают эффективность наноматериалов в повышении энергоэффективности конструкций и увеличении срока службы труб [104].

Другим перспективным направлением является использование стеклопластиковых стержней, армированных полимерами, для повышения прочности конструкций. Исследования показывают, что такие стержни обладают высокой прочностью на разрыв (1080–1338 МПа) и сжатие (405–520 МПа), а также демонстрируют отличные сцепные свойства с бетоном, что делает их привлекательными для строительных целей [105]. Например, прочность стеклопластиковой арматуры на 65% выше, чем у традиционной стальной арматуры, что подтверждает их пригодность для использования в условиях сложных климатических воздействий. В другом исследовании [106] также показано, что нанокompозиты демонстрируют снижение негативного экологического воздействия, что делает их предпочтительным выбором

для применения в агрессивных средах.

Основные требования к материалам, которые используются при строительстве в различных экстремальных условиях, включают:

- сохранение несущей способности при воздействии низких температур и значительных нагрузок;
- способность к воздействию многократным температурным перепадам без разрушения;
- устойчивость к влиянию влаги, солей, кислот, включая остальные агрессивные вещества, характерные для арктического климата;
- обеспечение эффективной теплоизоляции для минимизации теплопотерь и создания комфортных условий внутри помещений;
- сохранение эксплуатационных характеристик при длительном воздействии солнечного света, особенно в летний период.

Как отмечается в работах [107], [108], [109], [110] стеклопластиковые и стеклобазальтовые конструкции сохраняют свою структурную целостность даже при сильных ветрах и высоких нагрузках от снега, что особенно важно для строительства в арктических регионах.

Особое внимание также привлекает использование углеродных нанотрубок для улучшения механических и эксплуатационных свойств композитных труб. Как показано в исследовании [111], углеродные нанотрубки устойчивостью к коррозии и способностью адсорбировать загрязнители, что делает их перспективными для создания материалов, устойчивых к агрессивным средам. Эти свойства могут быть использованы для повышения химической стойкости композитных труб и их защиты от вредных веществ, таких как соли и кислоты, что особенно важно для трубопроводов в арктических условиях, где внешние факторы представляют значительную угрозу для долговечности конструкций.

В работе [104] были проведены эксперименты по исследованию механических свойств полимерных композитов, армированных углеродными нанотрубками и графеновыми нанопластинами. В результате использования метода вакуумного формования с различными долями наноматериалов (0.25% и 0.5% по весу), было выявлено, что добавление 0.25% углеродных нанотрубок и графеновых нанопластин значительно улучшает прочностные характеристики композитов, такие как твердость и прочность на растяжение. Эти результаты подтверждают перспективность применения поверхностно-модифицированных наноматериалов для улучшения свойств полимерных композитов, используемых в сложных эксплуатационных условиях, включая арктический климат.

Методы неразрушающего контроля (NDT) широко применяются для оценки текущего

состояния структуры и свойств композитных труб. Однако традиционные методы, разработанные для металлических конструкций, оказываются недостаточными при работе с композитными трубами из-за их неоднородной и анизотропной структуры [87]. После анализа существующих методов неразрушающего контроля композитных труб, также важно рассмотреть комплексные подходы в эксплуатации композитных трубопроводов, основанных на методах системного анализа и экспертных оценок.

Исследование [112] выявило ключевые критерии для оценки полимерных композитных трубопроводов. Важным аспектом является создание экономически выгодных условий для использования композитных материалов в агрессивных средах. Системный анализ рисков, связанных с эксплуатацией трубопроводов, позволяет обоснованно выбирать технологии контроля и управления качеством труб, снижая риск аварий и повышая долговечность конструкций.

Технологии самовосстанавливающихся полимеров также открывают новые возможности для повышения надёжности и долговечности композитных материалов. В исследовании [113] обсуждаются различные подходы к внедрению самовосстанавливающихся механизмов в полимерные системы, включая микроинкапсуляцию. Подобные технологии могут существенно увеличить срок службы композитных трубопроводов, снизить эксплуатационные расходы и повысить общую устойчивость к внешним воздействиям. Однако для их широкомасштабного внедрения требуется дальнейшее развитие технологий.

Необходимо переходить к проактивным подходам мониторинга, что позволит своевременно выявлять дефекты и предотвращать аварийные ситуации [87].

Современные методы NDT активно интегрируют новые материалы и технологии, что позволяет повысить надёжность и долговечность конструкций. Нанотехнологии открывают новые перспективы в создании высокоэффективных композитных материалов с улучшенными механическими характеристиками, такими как повышенная прочность, стойкость к коррозии и трещинообразованию. Важным направлением исследований является применение фрактальных структур для улучшения самовосстанавливающихся композитных материалов.

В работе [114] было показано, как именно фрактальные структуры способствуют более эффективному распределению внутренних напряжений и увеличивают устойчивость материалов к образованию микротрещин. Это имеет особое значение для композитных труб, используемых в условиях многократных температурных перепадов и циклических нагрузок, характерных для арктического климата. Применение фрактальных аспектов также открывает перспективы для разработки более долговечных и устойчивых к экстремальным условиям трубопроводных систем. Кроме того, использование нанотехнологий в сочетании с фрактальными структурами может способствовать созданию материалов с

самовосстанавливающимися свойствами, что увеличивает срок службы конструкций и снижает затраты на их обслуживание.

На Рисунке 1.4 представлены аппаратные средства, используемые в неразрушающих методах контроля композитных труб.

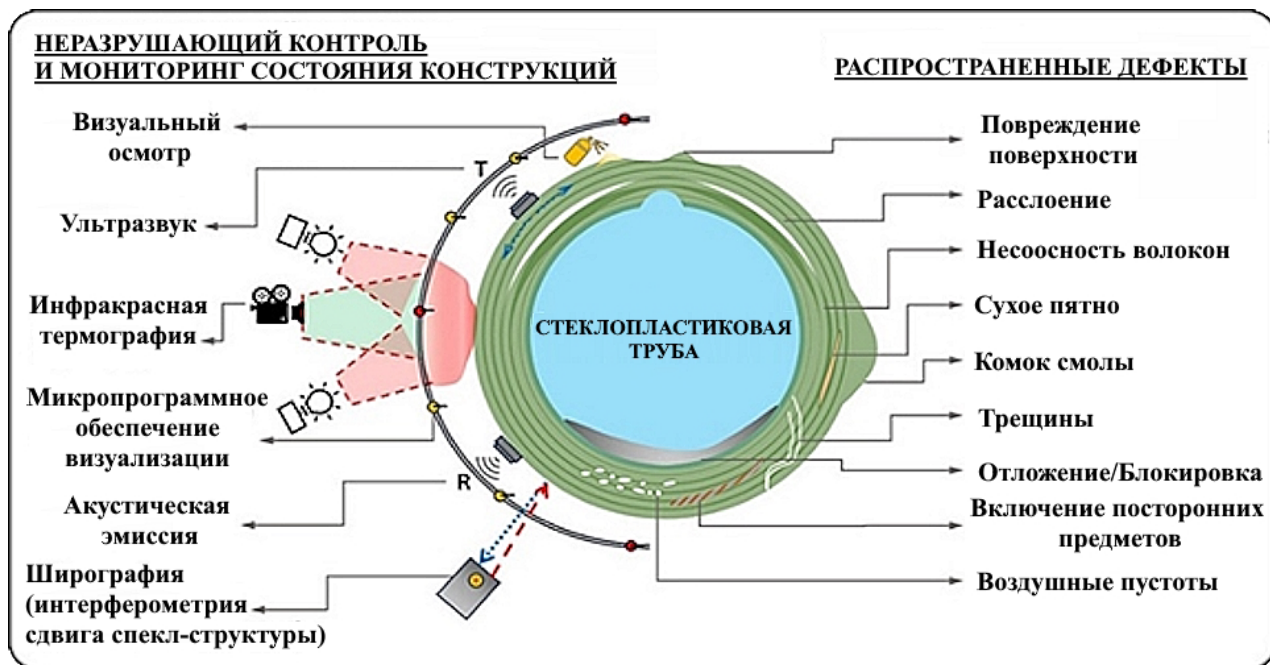


Рисунок 1.4 - Основные методы неразрушающего контроля композитов из стеклопластика и спектр дефектов, с категоризацией их по стадии возникновения [87]

Анализ существующих методов неразрушающего контроля композитных материалов и их достоинств позволил выявить направления для дальнейших исследований в области прогнозирования физических и механических свойств стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб, эксплуатируемых в том числе и в арктических регионах [115], [116] и [117].

В работе [115] исследования направлены на разработку инновационной системы неразрушающего контроля при помощи вихревых токов с целью мониторинга состояния полимерных канатов из углеродного волокна. Созданные специализированные датчики позволяют обнаруживать мельчайшие дефекты в процессе производства с высокой скоростью и точностью, обеспечивая надежность и безопасность эксплуатации.

В работе [116] изучается поведение композитов на основе базальта при ударных нагрузках с помощью инфракрасной термографии. Авторы исследовали влияние различных факторов, таких как добавление связующего агента и метод крепления образцов, на механизмы повреждения и прочность материалов.

Другое исследование [117] посвящено оценке механических свойств и стойкости к

давлению нанокompозитных труб, армированных волокном. Комплексный подход, включающий микроскопический анализ, механические испытания и численное моделирование, позволил оценить влияние добавления наночастиц кремния на прочность и долговечность композитов. Результаты исследования имеют практическое значение для разработки новых материалов с улучшенными характеристиками для нефтехимической промышленности.

Подытоживая вышесказанное, можно прийти к тому, что анализ существующих методов неразрушающего контроля выявил следующие ограничения:

1. Существующие методы, как правило, специализированы и не всегда подходят для комплексного исследования различных типов дефектов.
2. Приобретение и обслуживание оборудования для неразрушающего контроля часто требует значительных финансовых затрат.
3. Эффективное применение методов неразрушающего контроля требует высокой квалификации специалистов и длительной подготовки.
4. Многие методы не позволяют получить полную и достоверную информацию о состоянии объекта контроля и не могут обеспечить комплексное решение поставленных задач.

Отсутствие универсальных методов неразрушающего контроля стимулирует поиск новых методов, в том числе основанных на математическом моделировании. Неразрушающие методы контроля для конструкций осуществлять легче, так как они в основном доступны для осмотра. К примеру, состояние подземного трубопровода недоступно для осмотра. Для трубопроводов же важно прогнозировать герметичность стенки, контроль склонности к распространению трещин.

Стоит отметить, что для силовых строительных конструкций основными параметрами контроля являются изменения механических свойств стенки трубы. Поэтому целью диссертационной работы является разработка в разработке научно обоснованного метода оперативной оценки механических характеристик изделий из стеклобазальтопластика. В работе приведен обобщенный метод прогноза критериев качества труб, где показана целесообразность применения теории фракталов на примере механических свойств труб. Главным достоинством работы является то, что ее результаты можно обобщить на конкретные технологии производства и эксплуатации труб, и на конкретные свойства, которые будут являться ключевыми для выбранной технологии.

1.5 Фрактальная геометрия как инструмент оценки качества композитных труб

Как уже отмечалось в предыдущих разделах, рассматриваемые композитные трубы обладают остаточным ресурсом, который необходимо контролировать для обеспечения

надёжности их эксплуатации. Ключевым аспектом является контроль качества и прогнозирование их свойств как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации.

В настоящее время отсутствуют единые унифицированные методологические подходы, позволяющие оперативно прогнозировать критерии качества данных композитных материалов. Существующие экспресс-методы оценки структуры и свойств стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб имеют узкую направленность и не всегда способны эффективно решать задачи, возникающие в условиях современных вызовов и рисков. В связи с этим, всё большее распространение получают методы неразрушающего контроля, основанные на математическом моделировании. Это объясняется тем, что технология производства композитных материалов является сложной и многокритериальной, что затрудняет учёт одновременного влияния множества технологических параметров, состава и структуры материалов.

Дополнительно, неоднородная структура композитных материалов [87] создаёт определённые сложности при прогнозировании их свойств на основе анализа параметров структуры. В последние годы для количественной оценки таких структур активно применяется язык фрактальной геометрии [118].

Для описания многих процессов и объектов в окружающем мире используются модели, в которых геометрия исследуемых объектов играет ключевую роль. Это связано с тем, что геометрические представления позволяют оценить расстояние между двумя любыми точками на объекте исследования или же внутри его объёма. Если исследуемый объект описывать с помощью произвольной функции $Y = f(x_1, \dots, x_n, t)$, то, путем ввода в неё разных значений независимых переменных, можно определить значение функции, что, по сути, можно интерпретировать как прогноз. Подобная функция может отображать ту или иную качественную характеристику материала, а независимые переменные, распределение зерен в металле или в композитном материале, их размеры, форму и т. д. Определяя расстояние между зернами, фазами, всякого рода включениями, их размерами, формой, можно научиться прогнозировать по этим данным численные значения качественных характеристик материала, таких, как прочность, вязкость, хрупкость и т. д.

В материаловедении, как и во многих других прикладных научных дисциплинах, традиционно применяется евклидова геометрия, а также евклидова размерность d , которая может принимать четыре значения: $d = 0$ для точечных дефектов (межузельные атомы); $d = 2$ для планарных дефектов (двойники, границы зерен и т. п.) и $d = 3$ для трехмерных образований в объеме образца. При описании объектов в материаловедении обычно используется единая метрика, под которой подразумевается пространство, в котором определено расстояние между любой парой элементов. Выбор метрики является важным аспектом при моделировании,

поскольку он влияет на точность и адекватность описания исследуемых процессов. Например, введение манхэттенской метрики [119] на некотором пространстве в заданных ограничениях, за пределами города, где начинаются пустыри и пляжи, должны вводить совершенно другую метрику. Манхэттенская метрика получила своё название благодаря характеру расчёта кратчайшего пути в городской среде, напоминающему движение по прямоугольной сетке улиц Манхэттена.

Выбор евклидовой метрики в исследованиях часто является произвольным, что может приводить к существенным потерям в точности идентификации объектов со сложной геометрической конфигурацией [120]. При этом следует отметить, что евклидовы размерности, могут служить характеристиками, в основном, симметричных микроструктур, которые не часто образуются даже в материалах, получаемых в квазиравновесных термодинамических условиях [121].

Любую фигуру в пространстве Евклида, можно представлять как метрическое пространство. Применение геометрической терминологии дает возможность при исследовании весьма абстрактных объектов применять большой геометрический опыт, накопленный учеными при изучении целочисленного пространства $E^n (n = 1, 2, 3)$. Подобными объектами могут являться любые n - мерные поверхности и объемы, которые можно представить в виде геометрических образов как различных технологических процессов, так и всевозможных объектов либо явлений .

Предположим, что объектом идентификации является качественная характеристика некоторого материала, например, шлифовки его поверхности. Внутренняя метрика структуры шлифа отражает закономерности, заложенные в материале. Определение этой метрики позволяет установить взаимно однозначное соответствие между свойством материала (к примеру, прочностью, пластичностью либо текучестью) и его размерностью. Так как расстояние является мерой, которая определяется между любыми двумя элементами множества, то, его формальное описание должно учитывать физическую природу самого множества. Таким образом, выбор подходящей метрики играет решающую роль в корректной идентификации и прогнозировании свойств сложных объектов и материалов.

Природа чрезвычайно сложна и многогранна, что затрудняет аппроксимацию геометрических форм реальных объектов с помощью классических фигур Евклидовой геометрии, таких как окружности, кубы или треугольники. Такая аппроксимация может привести к потере важной информации и искажению модели, описывающей реальные объекты. Проблема заключается не в ограничениях рассматриваемых моделей, а в самой сложности и многообразии исследуемых природных и технологических процессов. Для адекватного понимания подобных объектов необходимо в первую очередь применять более сложные

характеристики, позволяющие наиболее точно отображать связь между самой моделью и реальностью.

В математике подобными сложными объектами являются, например, множества Кантора и кривые Пеано, которые долгое время считались противоречивыми. В материаловедении аналогичные сложности возникают при исследовании микроструктуры многих материалов, таких как сталь, чугун, композиты, древесина и полимеры.

Классические математические фракталы, которые характеризуются фрактальной размерностью, демонстрируют, как сложные геометрические структуры могут быть описаны с помощью дробных величин (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 - Традиционные математические фракталы

В попытке идентификации явлений и объектов, которые не поддаются описанию с помощью традиционной Евклидовой геометрии, учёные обнаружили геометрические свойства, выходящие за рамки привычных понятий. Однако до 1970-х годов этот факт не привлекал особого внимания со стороны представителей естественных наук.

Поворотным моментом стало издание фундаментальной работы Бенуа Мандельброта [118], где описывались объекты, обладающие свойствами, которые теперь известны как фрактальные структуры. Эти структуры характеризуются дробной размерностью и являются основой для описания множества природных явлений. Последователи Мандельброта продолжили его исследования и открыли множество новых фракталов, таких как фрактальное броуновское движение, используемое при моделировании древесных и горных ландшафтов, флуктуаций уровня рек, биения сердца и других сложных природных процессов.

Понятие фрактальной размерности тесно связано со способом вычисления расстояния между точками внутри или на поверхности фрактальной структуры. Если длину L произвольной кривой определить в виде числа $N(\delta)$ прямолинейных отрезков длины δ , необходимых для ее покрытия, тогда:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} (N(\delta) \cdot \delta) = L, \quad (1.1)$$

где в пределе при $\delta \rightarrow 0$ мера L становится асимптотически равной длине кривой и не зависит от δ .

Фрактальные методы при описании множеств различной природы имеет важную роль при интерпретации и предсказании экспериментальных результатов в научных дисциплинах, таких как космология, физика полимеров, химия, материаловедение, и др.

Определение фракталов пока не является строгим и окончательным. Согласно Бенуа Мандельброту под фракталом следует понимать множество, размерность которого является строго больше его топологической размерности [118]. Со временем Мандельброт уточнил своё определение фрактальной структуры в виде структуры, состоящей из частей подобных целому.

Метод вычисления фрактальной размерности впервые был введен Хаусдорфом в 1919 году. С тех пор разработаны различные подходы к вычислению фрактальной размерности, но все они базируются на идее Хаусдорфа. В этих методах исследуемое множество в n -мерном пространстве, покрывается n -мерными кубиками со стороной δ . Затем подсчитывается число кубиков $N(\delta)$ или некоторая другая характеристика, связанная с $\delta: N(\delta)$. Далее исследуется характер зависимости $N(\delta)$. Если зависимость $N(\delta)$ имеет степенной характер, то по показателю степени определяется размерность d , а коэффициент при этой степенной зависимости можно рассматривать как d -мерный объем фрактала.

Для изучения размерности множества точек необходимо обобщить понятие меры величины множества. В классическом подходе для оценки меры множества точек в рассматриваемом пространстве применяется пробная функция вида $N(\delta) = \gamma(d) \cdot \delta^d$, где отрезки прямой, квадраты либо окружности, сферы либо кубы покрывают исследуемое множество, а мера M_d вычисляется в виде суммы $M_d = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma(d) \cdot \delta^d$. Геометрические коэффициенты γ для линий, окружностей или сфер принимают следующие значения: для линий $\gamma(d) = 1$, для окружностей $\gamma(d) = \frac{\pi}{4}$, для сфер $\gamma(d) = \frac{\pi}{6}$ [122].

В общем случае, при $\delta \rightarrow 0$ мера M_d может стремиться либо к 0 или к ∞ в зависимости от выбранной *размерности меры* d . Для оценки фрактальной размерности множества было введено понятие так называемой критической размерности (размерности Хаусдорфа – Безиковича).

Согласно Е. Федеру [122] размерность Хаусдорфа – Безиковича D представляет собою

критическую размерность, где мера M_d изменяет свое значение с 0 на ∞ (1.2):

$$M_d = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma(d) \cdot \delta^d = \gamma(d) \cdot N(\delta) \cdot \delta^d; \quad (1.2)$$

$M_d \rightarrow 0$ при $d > D$; $M_d \rightarrow \infty$ при $d < D$.

При достижении равенства $d = D$ значение M_d может быть либо конечным, нулевым или бесконечным.

Размерность Хаусдорфа-Безиковича определяет свойства исследуемого множества точек при бесконечно малом размере показателя пробной функции - δ и является локальной характеристикой множества. Множества, для которых размерность Хаусдорфа-Безиковича не является целым числом, называются фрактальными [122].

Многие реальные физические системы обладают фрактальными свойствами в определенных масштабах, что выражается дробной размерностью. Например, учитывая недостаточность удовлетворительных математических описаний процессов структурообразования, можно предположить, что такие сложные системы, как бетон, имеют дробную размерность, что свидетельствует о их фрактальной природе. Понятие фрактала связано с такими характеристиками физических объектов, как шероховатость поверхности, объем, плотность и другие [123,124].

Фрактальные свойства рассматриваемых объектов проявляются в том, что если выбрать одну из связанных частиц в качестве центра сферы с радиусом R , значительно превышающим размеры отдельной частицы, то масса вещества m , сосредоточенная внутри этой сферы, будет зависеть от радиуса согласно следующему закону:

$$m(R) \cong R^D, \quad (1.3)$$

где D — фрактальная размерность объекта [118]. Эта размерность описывает, как масса распределяется в зависимости от размера сферы.

Формула (1.3) позволяет связать массу отдельного кластера с его размером R . При увеличении размера фрактального кластера плотность вещества внутри него уменьшается согласно закону R^{D-3} что, в свою очередь, снижает прочность кластера.

Для пространства размерностью 3 (например, для шара с радиусом R), фрактальная размерность вычисляется по следующей формуле (1.4):

$$n = \frac{\left(\frac{R}{r_0}\right)^D}{4 \cdot \pi \cdot \frac{R_0^3}{3}}. \quad (1.4)$$

Тогда из (1.4) следует, что

$$D = \frac{\ln\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{R_0^3}{3} \cdot n\right)}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}, \quad (1.5)$$

где R_0 – расстояние между частицами радиуса R ; r_0 – размеры первичных ядер частиц, n – средняя плотность (число частиц в кластере).

Фрактальные кластеры (Рисунок 1.6) представляют собой ключевые структурообразующие элементы в ряде макроскопических систем, формирующихся в результате физико-химических процессов и явлений. Фрактальная форма субатомных частиц обеспечивает понимание структурного представления материи и определяет совокупность физических неопределенностей.

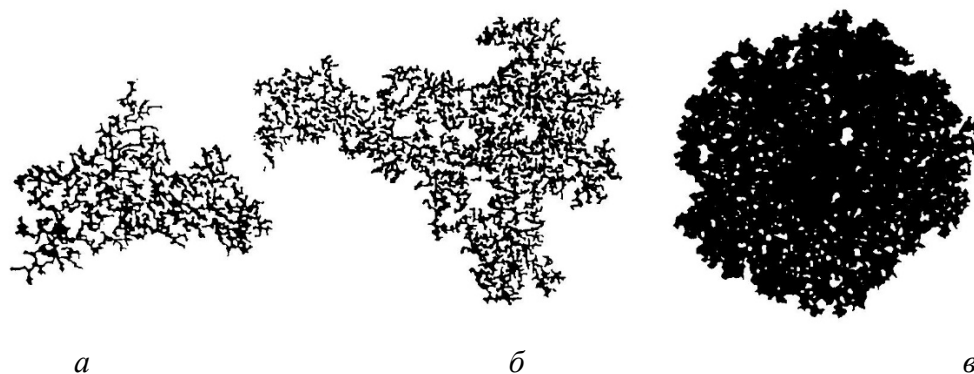


Рисунок 1.6 - Компактность заполнения двумерного пространства древовидными кластерами (скоплениями частиц, связанных определенным типом связи), полученными с помощью компьютерного моделирования: *а* – фрактальная размерность кластера равна $D = 1.3$; *б* – $D = 1.5$; *в* – $D = 1.8$ [125]

В ходе проведенного анализа можно отметить, что многие объекты в природе, включая структуры материалов, имеют фрактальные свойства и характеризуются дробной (фрактальной) размерностью. Одной из причин этого явления могут быть неравновесные условия

формирования структур в открытых системах. Как показано в многочисленных исследованиях, фрактальная размерность структуры связана с рядом физико-механических свойств материалов, что стимулирует разработку математических моделей для установления новых взаимосвязей между структурой и свойствами.

Для определения принадлежности микроструктуры стеклобазальтопластиковых труб к фракталам (Рисунок 1.7), фрактальная размерность D была вычислена по формуле Хаусдорфа-Безиковича (1.6):

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \left(\frac{\ln(N(\delta))}{\ln(\delta)} \right) \quad (1.6)$$

где $\ln(N(\delta))$ - число клеток, покрывших объект; $\ln(\delta)$ - размер клетки.

Анализ фотоснимков исследуемых структур, представленных на Рисунок 1.7, подтверждает гипотезу о наличии фрактальной размерности у всех образцов. Фрактальная размерность волокон варьировалась от 1.72 до 1.94. Поскольку евклидова размерность плоскости равна 2, полученные дробные размерности свидетельствуют о фрактальной природе этих структур. Следовательно, структуры такого типа относятся к классу фракталов, и к ним применимы элементы фрактального моделирования, обсуждаемые в Разделе 4.

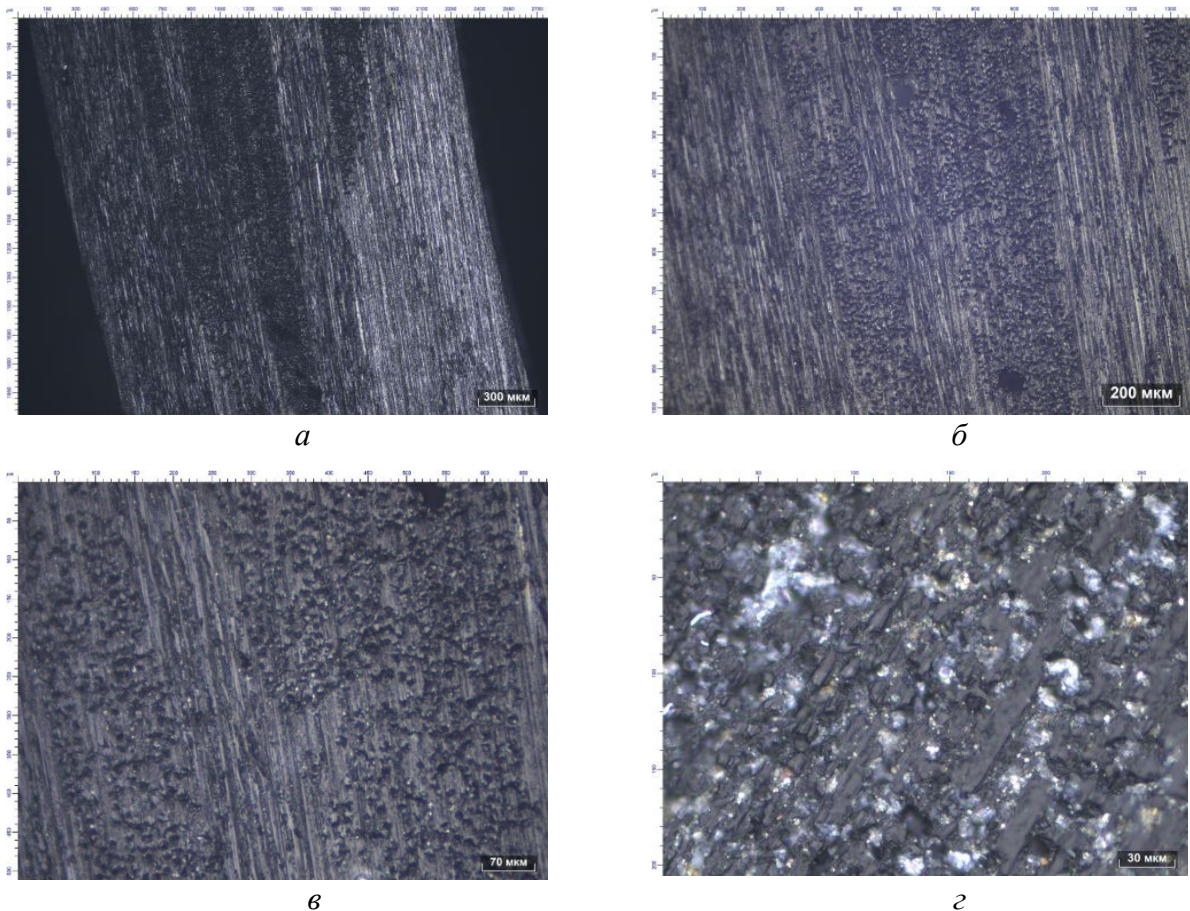


Рисунок 1.7 - Микроструктура стеклобазальтопластиковых композитных труб

- a – фрактальная размерность волокон для образца 1 составляет 1.72;
- b – для образца 2 составляет 1.86;
- c – для образца 3 составляет 1.88;
- d – для образца 4 составляет 1.94.

Структура стеклопластиковых труб также демонстрирует фрактальные свойства, о чем свидетельствуют показатели ее фрактальной размерности, вычисленные по методу Хаусдорфа (1.6), и приведенные на Рисунке 1.8.

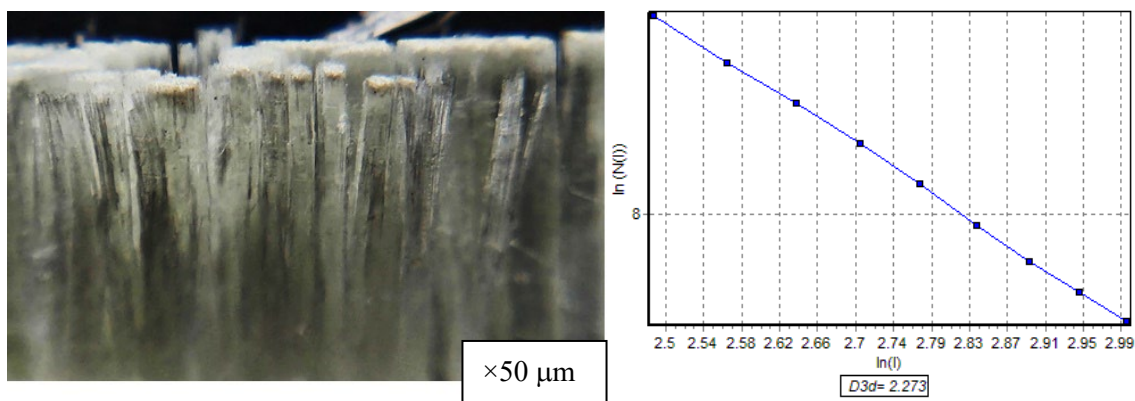


Рисунок 1.8 - Отдельные вытянутые волокна стеклоткани с фрактальной размерностью 2.273

Основываясь на многочисленных публикациях и рассмотренных примерах, в данной работе предлагается исследовать влияние фрактальной размерности элементов структуры гибридных стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб на их механические свойства. Также предполагается изучение возможностей применения фрактальной размерности микроструктуры труб для количественной оценки зон разрушения, что может способствовать более эффективному экспресс-мониторингу их состояния в процессе эксплуатации.

1.6 Выводы по главе 1

В данной главе проведен комплексный анализ основных характеристик композитных материалов на основе стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб. Проведен анализ методов их неразрушающего контроля. Показано, что эти материалы обладают сочетанием прочности, коррозионной стойкости и малого удельного веса, что делает их перспективными для широкого применения в строительстве. Благодаря повышенным эксплуатационным характеристикам и малому удельному весу композитные трубы являются реальной альтернативой стальным.

Потребность в научно обоснованном и экспериментально подтвержденном методе управления свойствами стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов становится особенно актуальной в связи с возможностью расширения их функциональности и повышения экономической эффективности применения.

Цель исследования заключается в разработке научно обоснованного метода оперативной оценки механических характеристик изделий из стеклобазальтопластика.

Данный метод направлен также на сокращение объема испытаний за счёт применения теории фракталов.

В итоге были сформулированы следующие задачи:

- обоснование метода подбора входных параметров при производстве изделий, позволяющих испытать изделие (стеклобазальтопластиковые трубы) с заданным сочетанием свойств и определение областей требуемых свойств;
- разработка метода (с применением теории фракталов) для прогнозирования механических свойств стеклобазальтопластиковых труб, включающего определение чувствительности к спектру механических свойств и к спектру фрактальных размерностей и обеспечивающего сокращение объема испытаний;
- применение метода, основанного на теории фракталов для мониторинга зон разрушения труб с использованием фрактальной размерности в качестве индикатора трансформаций деформационного рельефа;
- апробация и внедрение полученных результатов.

Глава 2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Стеклобазальтопластиковые композитные трубы

В ходе проведенного исследования были изучены механические свойства и микроструктура стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб. Трубы изготавливались методом непрерывной намотки волокна. При изготовлении труб использовалась кольцевая намотка. Исследуемые образцы: стеклобазальтопластиковые трубы. Рисунок 2.1. демонстрирует общий вид стеклобазальтопластиковых труб.



Рисунок 2.1 - Общий вид стеклобазальтопластиковых труб

Микроструктура стеклобазальтопластиковых труб при различных масштабах увеличения представлена на Рисунке 2.2.

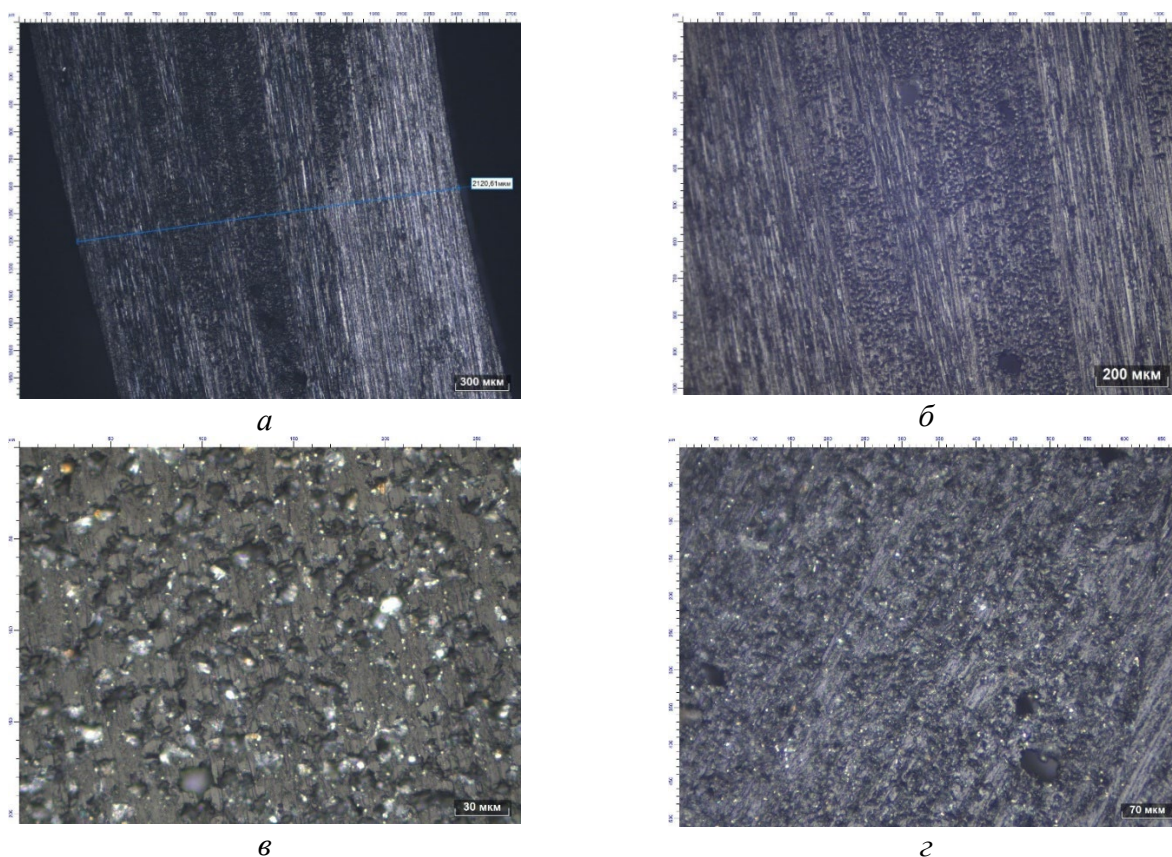


Рисунок 2.2 - Микроструктура исследуемых труб

В изготовлении труб использовались следующие материалы:

- стеклоровинг (волокно) 1200 текс, марка стекла Е;
- эпоксидная смола KER 828 (аналог ЭД-20);
- отвердитель ИЗОМТГФА;
- ускоритель Алкофен.

Основным армирующим компонентом служил стеклоровинг марки Е с текстильностью 1200 текс. В качестве матрицы использовалась эпоксидная смола KER 828 с отвердителем ИЗОМТГФА и ускорителем Алкофен. Примерное соотношение компонентов по массе составляло: 70% стеклоровинг, 30% связующее. В связующем соотношение смолы к ИЗОМТГФА по весу — 100/80.

Образцы пластинки для испытаний изготавливались согласно ГОСТ 32661—2014.

Внешний вид трубы с основными параметрами приведен на Рисунке 2.3, где указаны основные замеры.

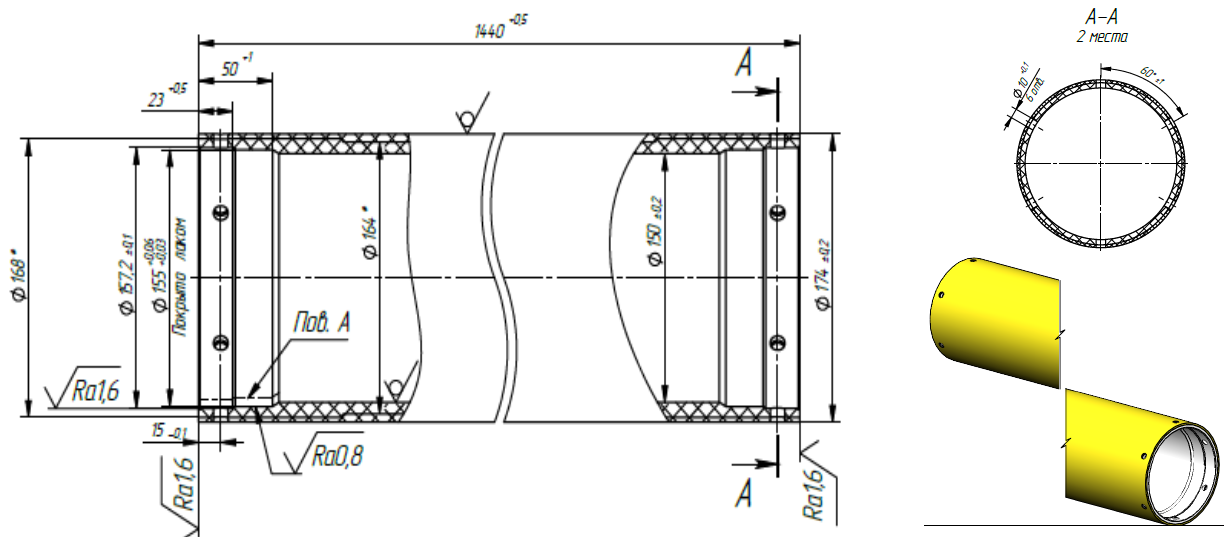


Рисунок 2.3 - Конечный вид изделия после всех этапов изготовления

Процесс изготовления труб включал следующие этапы:

- изготовление многослойной заготовки из композиционного материала на основе стеклоровинга и эпоксидной смолы.
- протачивание наружных поверхностей трубы и обрезка торцов полученной заготовки.
- прецизионная обработка внутренних диаметров торцов трубы и нанесение защитного покрытия из эпоксидной смолы на поверхность трубы А (Рисунок 2.3).
- покрытие наружной поверхности трубы слоем полиуретана.

На каждом этапе производства проводился тщательный контроль качества изделий. Особое внимание уделялось оценке качества поверхности А, на которую наносилось

защитное эпоксидное покрытие. Толщина покрытия составляла 0.01–0.02 мм, а шероховатость поверхности не превышала Ra0.4.

2.2 Стеклопластиковые композитные трубы

Исследуемые образцы: стеклопластиковые трубы с внутренним диаметром ~70 мм (Рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 - Общий вид сегмента трубы

Определение механических свойств проводилось с учётом требований ГОСТ Р 54924-2017 метод А. Из изделия были изготовлены образцы для испытаний прямоугольной формы габаритных размеров ~280×10 мм (1×bg). Резка образцов проводилась на ленточной пиле.

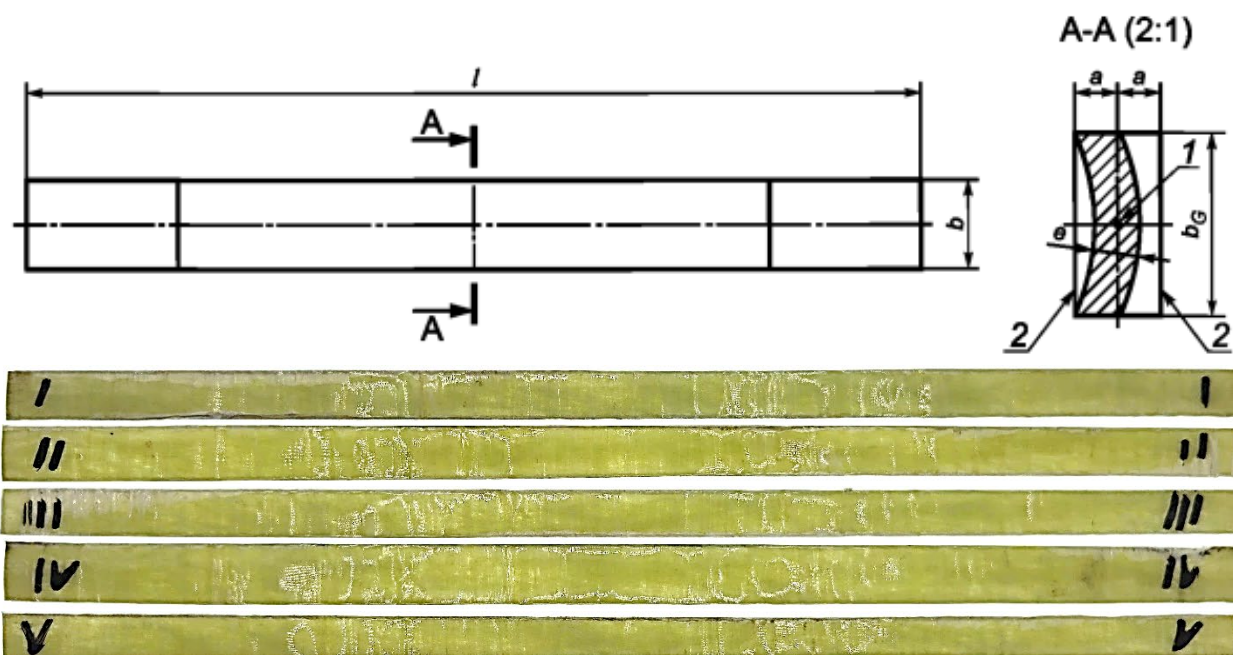


Рисунок 2.5 - Внешний вид образцов для испытаний

Исследования включали оценку внешнего вида изделия, проведение механических испытаний на растяжение с последующим изучением зоны разрушения образцов.

2.3 Механические испытания стеклобазальтопластиковых труб

Образцы для испытаний были изготовлены следующие: кольца и полосы, вырезанные в осевом (средняя площадь поперечного сечения составила $15 \times 15 = 225 \text{ мм}^2$) направлениях из трубы Ду 297×15. Образцы испытывались согласно ГОСТ Р 54924–2012 (в осевом и окружном направлении).

Испытания стеклобазальтопластиковых труб на прочностные характеристики проводились на стандартном оборудовании (Рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 - Внешний вид труб после разрушения

Проведены натурные испытания и определены механические свойства труб (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Результаты натурных испытаний

Исследуемая характеристика	Нормативные документы	Механические свойства после проведения испытаний	Механические свойства, полученные с применением теории фракталов
Прочность на растяжение в окружном направлении	ГОСТ 32661-2014	345-460 МПа	440-470 МПа
Прочность на сжатие	–	260-370 МПа	250-380 МПа
Осевой модуль упругости на растяжение	ГОСТ Р 54924-2012	14-19.2 ГПа	14.0-20.0 ГПа

2.4 Механические испытания стеклопластиковых труб

Механические испытания проводились на разрывной машине Zwick//Roell Z050 (Рисунок 2.7). Испытания проводились при скорости перемещения траверсы 2 мм/мин. В результате испытаний были получены значения осевой прочности, модуля упругости при растяжении и относительного удлинения.



Рисунок 2.8 - Разрывная машина Zwick//Roell Z050

В качестве выходных данных для натурных экспериментов приводились осевая прочность σ (2.1), модуль упругости при растяжении образцов и величина их относительного удлинения.

$$\sigma = \frac{F}{a}, \quad (2)$$

где F – максимальная растягивающая сила, Н;

a – площадь поперечного сечения, мм².

Полученные результаты показали, что осевая прочность, модуль упругости и относительное удлинение составили в среднем ~206 МПа, 9 ГПа и 2 % соответственно, что представлено в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Результаты механических испытаний

Образец, №	Осевая прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Величина относительного удлинения, %
I	205	9	2
II	218	10	2
III	204	9	3
IV	186	9	3
V	219	10	2
Среднее	206	9.4	2.4

В ходе испытаний разрушение образцов происходило в рабочей зоне (Рисунок 2.8). V-образный характер разрушения у некоторых образцов, вероятно, связан с особенностями технологии их изготовления (Рисунок 2.9).

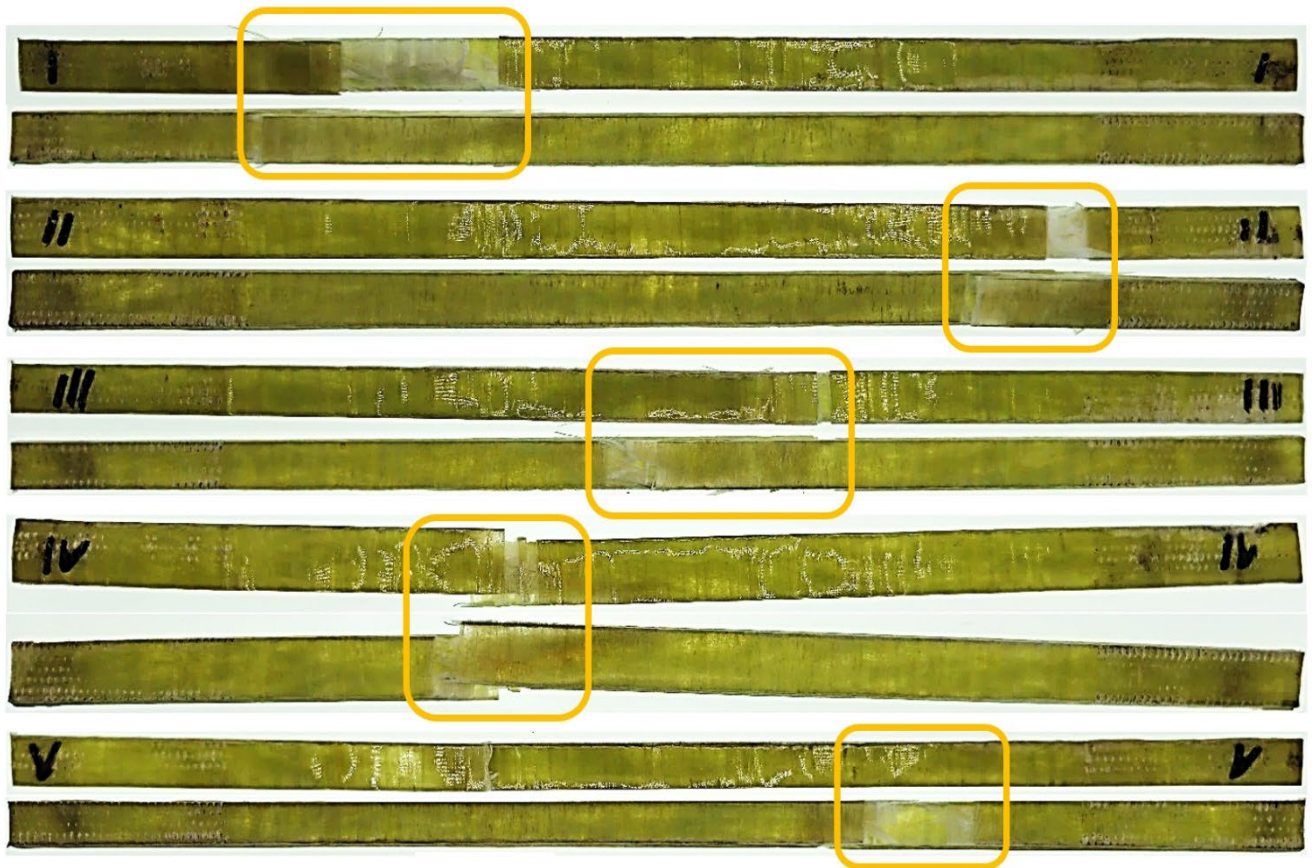


Рисунок 2.8 - Общий вид образцов после испытаний

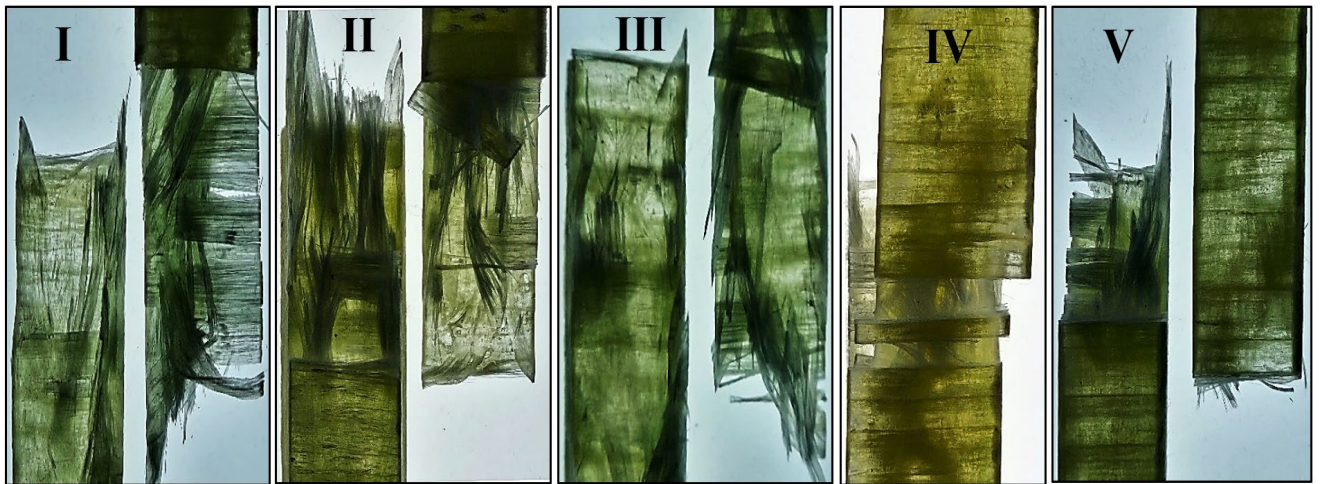


Рисунок 2.9 - Зоны разрушения образцов

При обработке результатов были также вычислены модули деформации E для стеклопластиковых труб в зависимости от приложенного давления [126–128]. Для вычисления использовались формулы, соответствующие ГОСТ 20276.1–2020.

Зависимость модуля деформации от коэффициента армирования представлена в Таблице 2.3 [126–128].

Таблица 2.3 - Зависимость модуля деформаций от коэффициента армирования [126–128]

Свойство	Коэффициент армирования стеклопластиковых труб					
	0	0.23	0.27	0.33	0.51	0.72
Модуль деформации E, МПа	3.69	5.79	6.80	11.59	16.27	21.69

Результаты показывают увеличение жесткости материалов по мере повышения коэффициента армирования. При давлении в 300 кПа деформации в армированных образцах уменьшались по сравнению с неармированными на 3%, 12%, 37%, 63% и 72% для коэффициентов армирования 0.23, 0.27, 0.33, 0.51 и 0.72 соответственно.

Свойства стеклопластиковых труб представлены в Таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Свойства стеклопластиковых труб

Характеристика	Стеклопластик
Плотность	1.6-1.9
Модуль упругости, ГПа	17-22
Предел прочности при изгибе, МПа	690-1240
Коэфф. линейного термического расширения, $10^{-6}/K$	0.45-8.30
Теплопроводность, Вт/К·м	0.30-0.75

2.5 Экспериментальные исследования стеклобазальтопластиковых труб

Результаты испытаний приведены в Таблице 2.5 (Протокол испытаний №1133 от 09.11.2015 г., производитель ООО «ТД «Базальтовые трубы» (Приложения А-В).

Таблица 2.5 - Контрольные испытания на растяжение стеклобазальтопластиковых труб Ду 297×15 производства ООО ТД «Базальтовые трубы»

Вид нагрузки	Нормативные документы	Результаты испытаний	Примечания
Максимальное напряжение при растяжении в окружном направлении (в МПа), при температуре испытаний 22 ⁰ С и нагрузке 100 кН	ГОСТ Р 54925-2012	Все 222	Расслоение и разрушение отсутствуют
Максимальное напряжение при растяжении в окружном направлении (в МПа), при температуре испытаний 50 ⁰ С и нагрузке 100 кН	ГОСТ Р 54925-2012	Все 222	Расслоение и разрушение отсутствуют
Предел прочности на растяжение в осевом направлении (в МПа), при температуре испытаний 22 ⁰ С	ГОСТ Р 54924-2012	277; 268; 280; 287; 278	Образцы разрушились
Предел прочности на растяжение в осевом направлении (в МПа), при температуре испытаний 50 ⁰ С	ГОСТ Р 54924-2012	277; 268; 280; 287; 278	Образцы разрушились

2.6 Экспериментальные исследования стеклопластиковых труб

В процессе испытаний образцов труб на растяжение, при напряжении в ~ 40 МПа и до момента разрушения, были слышимы регулярные щелчки, сопровождающиеся незначительным снижением напряжения и соответствующем образованием «зубьев» на графике «напряжение-время» (Рисунок 2.10, №1). С приближением к осевой прочности материала труб частота щелчков снижалась (Рисунок 2.10, №2).

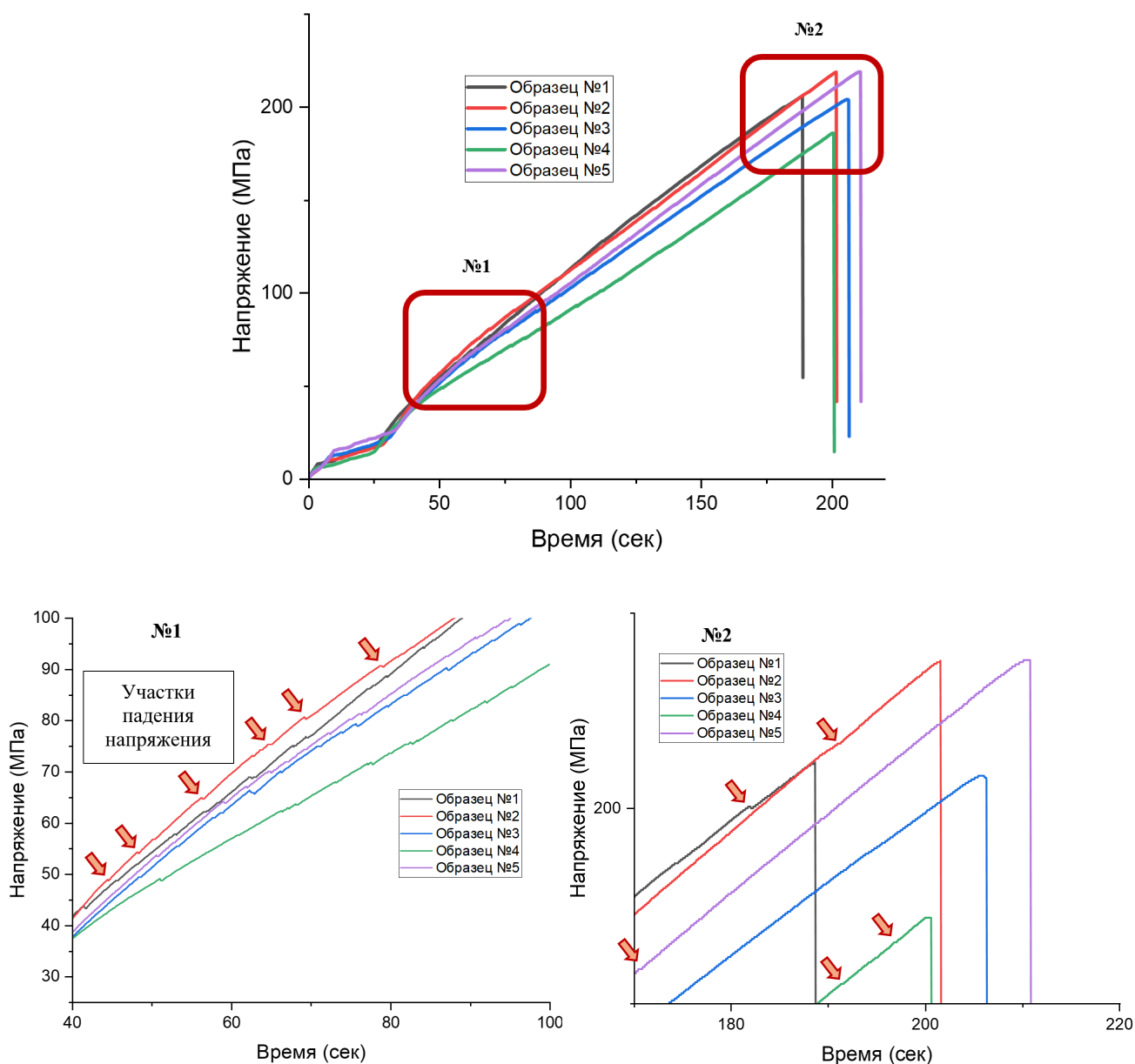


Рисунок 2.10 - Скачкообразные падения напряжения в процессе растяжения

Формирование «зуба» связано с образованием поперечной трещины на поверхности, которая распространялась, вероятно, до следующего слоя (Рисунок 2.11). Являясь концентратором напряжений, по достижению критического напряжения, трещина начинала расти в продольном направлении, приводя сначала к расслоению, а затем разрушению

внутренних армирующих слоёв (Рисунок 2.12).

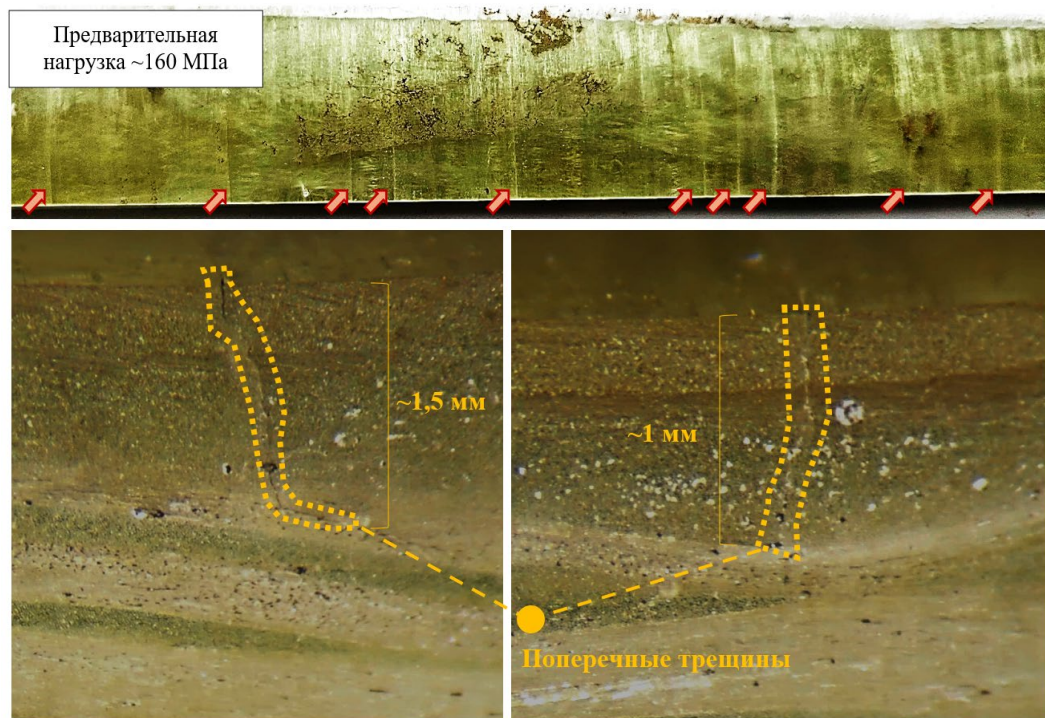


Рисунок 2.11 - Поперечные трещины в рабочей зоне

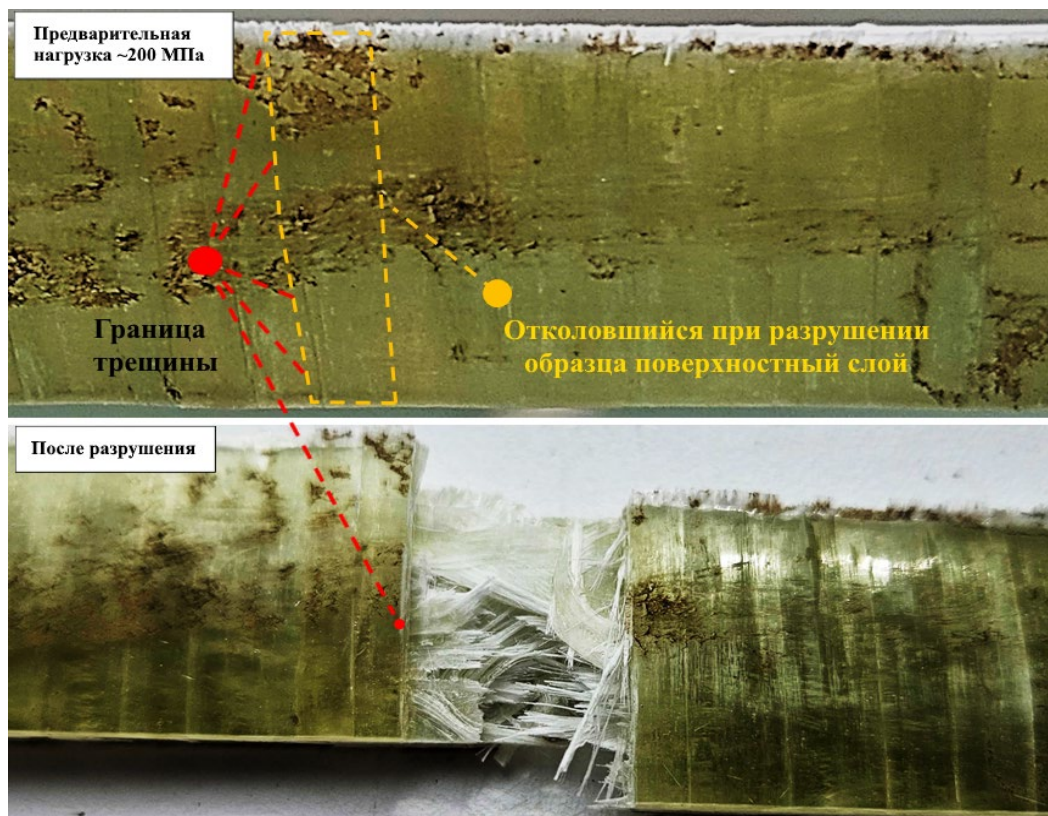


Рисунок 2.12 - Зона разрушения образца

В изделии присутствовали остаточные напряжения, приводившие к видимому загибанию отрезанных образцов во внешнюю сторону (Рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 - Изгиб готового образца для испытаний

Матрица обладает частичной светопропускаемостью (Рисунок 2.14). При просвечивании образцов различались видимые области внутренних слоёв, которые в том числе могли являться областями с меньшей межслойной адгезией (Рисунок 2.15).

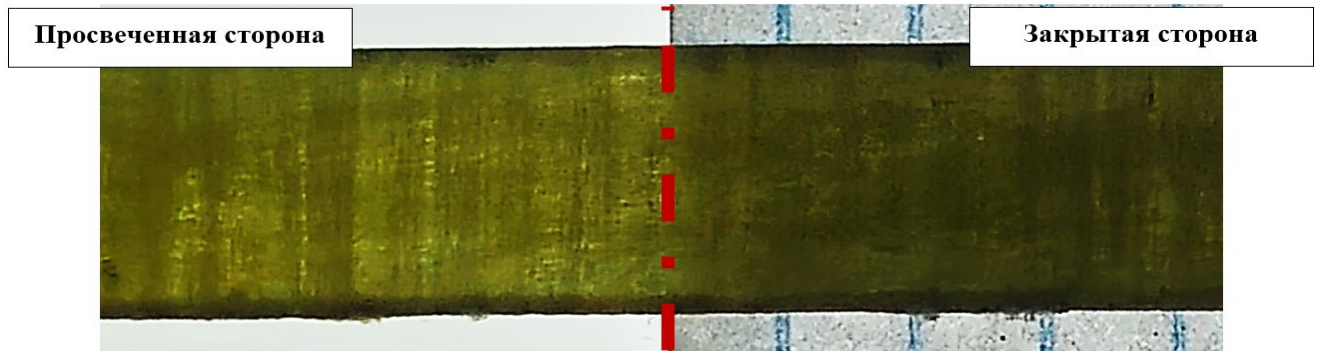


Рисунок 2.14 - Оценка светопроницаемости изделия просвечиванием образца

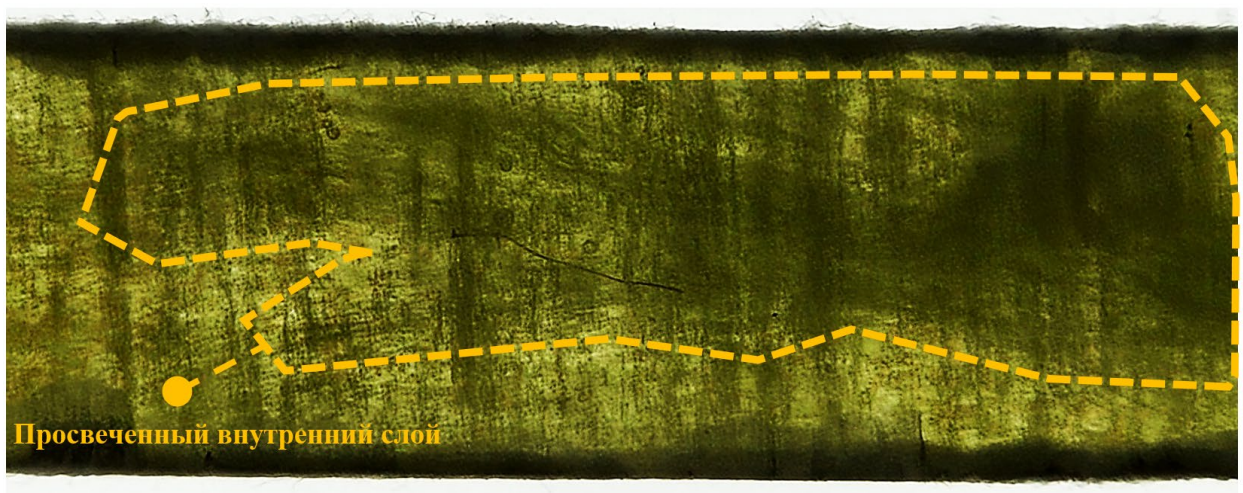


Рисунок 2.15 - Границы засвеченного внутреннего слоя в образце

В поверхностных слоях обеих сторон труб присутствовали скопления газовых пузырей, видимых как невооруженным глазом, так и различимых при макроувеличении (Рисунок 2.16).

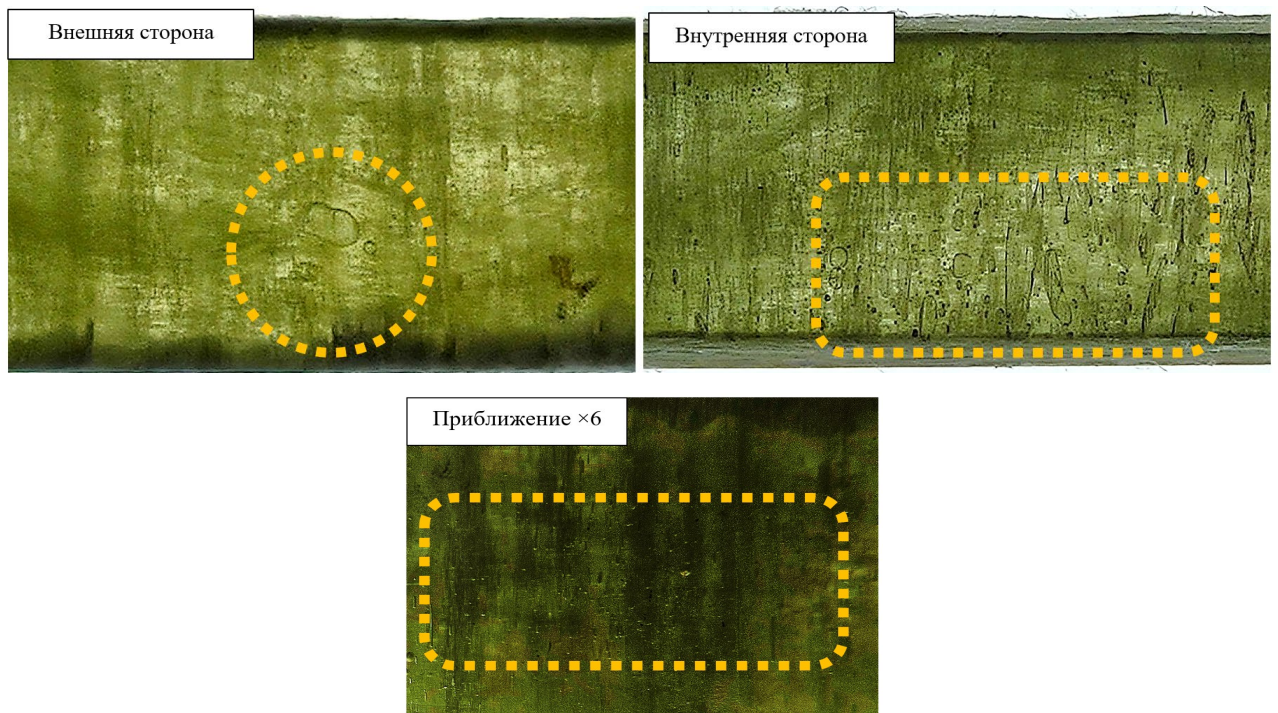


Рисунок 2.16 - Скопления газовых пузырей в поверхностных слоях образцов

В продольном сечении различались поперечно и продольно направленные волокна (Рисунок 2.17).

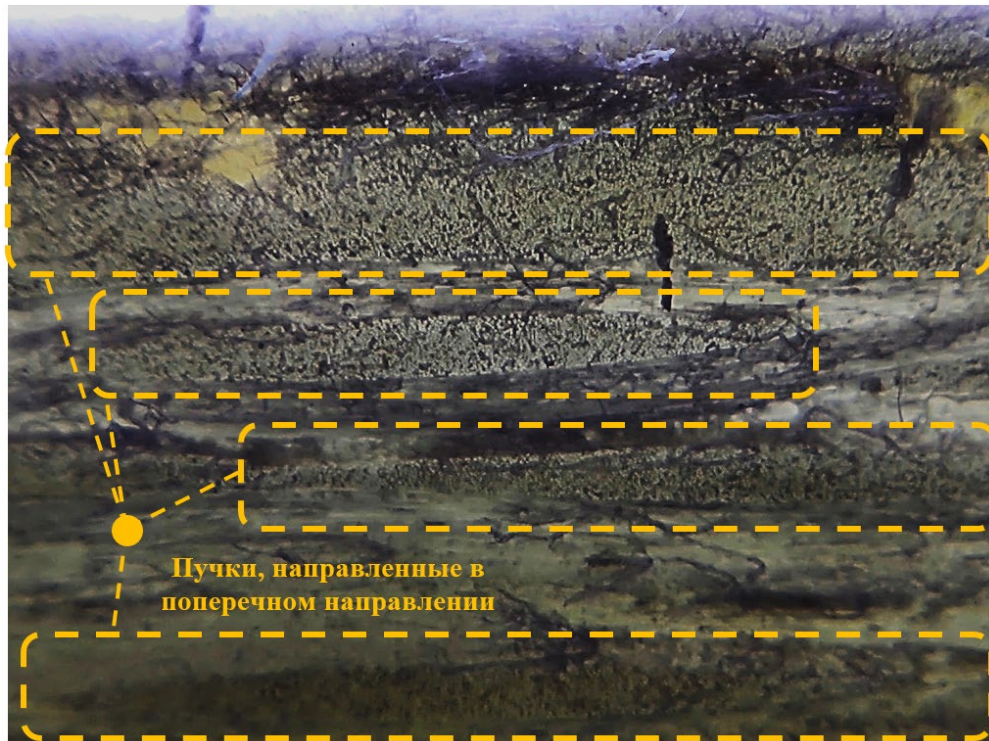


Рисунок 2.17 - Продольное сечение исходного образца, ×50

В материале отмечалось четыре типа разрушения: хрупкое разрушение поверхностных слоёв, горизонтальное разрушение продольно направленных волокон, продольное разрушение поперечно ориентированных волокон, боковое разрушение слоёв, ориентированных под углом.

2.7 Выводы по главе 2

В ходе проведенного исследования были изучены механические свойства и микроструктура стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Проведен выбор материала для исследований (стеклобазальтопластиковые и стеклопластиковые трубы).

2. Проведены механические испытания и определены механические свойства стеклобазальтопластиковых труб для прочности на растяжение в окружном направлении согласно ГОСТ 32661-2014; осевой модуль упругости на растяжение согласно ГОСТ Р 54924-2012:

- показатели предела прочности труб на растяжение σ_r в окружном направлении изменялись в пределах от 345 до 460 МПа;
- показатели прочности труб на сжатие σ_c изменялись в пределах от 260 до 370 МПа;
- показатели осевого модуля упругости на растяжение составили $E = 14.0\text{--}19.2$ ГПа.

Также были проведены микроструктурные исследования, результаты которых следующие:

- содержание ровинга (волокна) в материале составляет 65–80%;
- диаметр базальтового волокна варьируется от 3.0 до 15.0 мкм;
- содержание связующего в материале составляет 20.0–35.0%.

3. Получены механические свойства стеклопластиковых труб:

- показатели плотности труб зафиксированы в пределах 1.6...1.9 г/см³,
- показатели модуля упругости для труб составили 17...22 ГПа,
- показатели предела прочности при изгибе составили 690...1240 МПа,
- показатели коэффициента линейного термического расширения составили 0.45... 8.3·10⁻⁶/К,
- теплопроводность 0.30... 0.75 Вт/К·м.

4. Проведены исследования полимерных труб, армированных стекловолокном, с целью определения механических свойств и анализа характера разрушения материала. Основные выводы:

- среднее значение предела прочности при растяжении составляет 206 МПа;
- модуль упругости при растяжении составляет 9 ГПа;
- величина относительного удлинения составляет 2 %.

Внешний вид образцов:

- материал обладает некоторой светопропускаемостью. При просвечивании образца различались затемнённые участки внутренних слоёв, которые могут являться концентраторами напряжений ввиду их вероятной меньшей адгезии;
- осевое напряжение в 40 МПа приводит к образованию поперечных трещин в поверхностных слоях. Рост трещины в глубину вероятно происходит до следующего слоя. При достижении осевой прочности материала происходит рост трещины в продольном направлении с последующим разрушением образца. Рост разрушающей трещины проходил от поверхности в глубину;

5. В материалах отмечалось четыре типа разрушения:

- хрупкое разрушение поверхностных слоёв;
- горизонтальное разрушение продольно направленных волокон;
- продольное разрушение поперечно ориентированных волокон;
- боковое разрушение слоёв, ориентированных под углом.

Результаты экспериментов позволили разработать научно обоснованную и экспериментально подтвержденный метод управления свойствами стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов, что становится особенно актуальным в связи с возможностью расширения их функциональности и повышения экономической эффективности применения (Глава 3, Глава 4).

Глава 3. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗА СВОЙСТВ СТЕКЛОБАЗАЛЬНОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ

3.1 Постановка задачи по реализации основных этапов метода управления и прогноза свойств стеклобазальнопластиковых труб

Производственные процессы зачастую являются многопараметрическими системами, где множество переменных влияют на конечный результат. Применение большинства технологий осуществляется в так называемой рабочей области (РО) управляемых переменных. Рабочая область управляемых переменных определяется предприятием, реализовывающим эту технологию, которое в дальнейшем будет называться пользователем. Пользователь, определяя РО управляемых переменных, устанавливает их предельные значения, диапазон изменений, а также назначает критерии, которые считаются основными для осуществления данной технологии.

Учитывая многомерность пространства состояний многопараметрических технологий [129], а также их многокритериальность, предполагается, что существует вероятность наличия ранее неизвестной пользователю части рабочей области переменных. Неисследованная часть области может содержать значения управляемых переменных, при которых назначенные критерии могут принимать требуемые рациональные значения. Определение этой части рабочей области зачастую сопряжено с трудностями, так как прямые эксперименты на объекте идентификации могут быть сложными или даже невозможными.

Применение имитационного или другого метода моделирования исключается из-за недостаточной точности таких моделей. Математические модели, используемые для прогнозирования свойств на основании анализа структуры, требуют изоморфизма метрик объекта и его модели. Однако при подобном моделировании изоморфизм метрик практически не наблюдается.

Кроме того, многие многопараметрические технологии направлены на создание материалов с заранее заданными свойствами. Некоторые из этих свойств могут противоречить друг другу. Например, увеличение твердости материала может вступать в противоречие с необходимостью повышения его пластичности и уменьшения хрупкости. В связи с этим возникает задача определения области, в пределах которой существующие противоречия между различными по сути свойствами находятся в допустимых границах [130]. Область можно интерпретировать как область рецептурно-технологических факторов для прогноза критериев качества.

Следовательно, при постановке задачи выявления область рецептурно-технологических факторов для прогноза критериев качества следует учитывать требования по выявлению области возможных параметров с повышенными численными значениями решений, поскольку эта область

может изменяться в зависимости от изменений критериев.

Область рецептурно-технологических факторов для прогноза критериев качества представляет собой пространство, в котором критерии достигают рационального (требуемого) сочетания. В этой области противоречия между критериями сведены к допустимому минимуму, поскольку известно, что противоположные характеристики могут взаимодействовать друг с другом только в условиях компромисса.

Таким образом, поставленная задача по разработке метода управления и прогноза свойствами стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов включает решение следующих подзадач:

1. Определение рабочей области параметров стеклобазальтопластиковых труб.
2. Установление ранее неисследованной части рабочей области, которая включает управляемые переменные и их численные значения, при которых выбранные свойства достигают рационального сочетания.
3. Определение область рецептурно-технологических факторов для прогноза критериев качества композитных труб.
4. Проведение экспресс-оценки критериев качества стеклобазальтопластиковых труб с использованием теории фракталов.

3.2 Определение рабочей области параметров стеклобазальтопластиковых труб

На начальном этапе разработки метода устанавливается первоначальная рабочая область (РО) параметров, основанная на теоретических расчетах, экспертных оценках и доступных данных. В процессе эксплуатации технологии границы РО уточняются путем анализа исторических данных. Процесс, называемый пассивным экспериментом, дает возможность определить режимы работы и установить ограничения, связанные с надежностью и эффективностью технологии [131].

С целью более точного определения РО могут реализовываться активные эксперименты. Тем не менее, проведение прямых экспериментов на реальном объекте может быть затруднено изменением нескольких параметров одновременно, что приведет к изменению критериев качества. В таких случаях эффективным решением является использование экспертной системы (ЭС). Эксперты, обладающие глубокими знаниями о технологии, оценивают эффективность различных режимов работы и выбирают наиболее безопасные для экспериментальной проверки. Это позволяет минимизировать риски и получить более точные результаты [130], [131].

При построении математических моделей прогноза критериев качества обычно сталкиваются с существенными трудностями, связанными с высокой размерностью пространства их состояний. Эксперты, оценивая такие модели, часто опираются на интуитивное представление

о пространстве, которое обычно является евклидовым. Однако реальное пространство состояний сложной системы может иметь неевклидовую геометрию.

Давая относительно малые приращения управляемым переменным, эксперты получают численные значения критериев, часто, близкие к истинным. В результате, при небольших изменениях управляемых переменных, они получают значения критериев, близкие к истинным, что происходит за счет линеаризации небольших участков пространства состояний многопараметрической технологии. Однако такое восприятие пространства может быть ошибочным, поскольку «...некоторые силы в природе следуют одной, другие своей особой геометрией» [120].

В различных областях науки большую часть исследований можно рассматривать как поиск метрики, которая присуща пространству состояний изучаемого объекта. Сложность задачи возрастает по мере углубления анализа, поскольку метрика для разных областей многомерного пространства состояний технологии может различаться. Выбор метрики экспертами часто носит произвольный характер, что может приводить к значительным погрешностям в процессе идентификации.

Если в экспериментах доказывается однородность и изотропность пространства состояний, то в свою очередь это может объясняться технологическими ограничениями, которые иницируют проведение исследований в относительно узком диапазоне параметров рабочей области. Вероятно, благодаря этому эксперименты, реализуемые на тех же объектах, но в новых незначительно отличающихся условиях, могут вступать в противоречие с выбранной моделью. В связи с этим экспертам рекомендуется, насколько это возможно, использовать существующую или хотя бы гипотетическую модель взаимодействия управляемых переменных и их влияния на численные значения критериев при определении этих значений.

Сложность аппроксимации связана с тем, что эксперты часто не могут представить себе пространство, где аксиомы Евклида не действуют, и ошибочно применяют евклидову геометрию, обычно ограниченную тремя измерениями. Однако факты, относящиеся к трехмерному пространству, не следует автоматически переносить на пространства с более высокой размерностью. При идентификации многопараметрических технологий рассматривается многомерное пространство состояний, метрика которого неочевидна. Факты, относящиеся к трехмерному пространству, не могут быть бездумно перенесены на многомерное пространство. Многомерные геометрические представления систематически применяются для наглядного решения систем линейных уравнений, задач линейной алгебры, линейного программирования и других задач, в которых учитывается более трех независимых переменных.

3.3 Определение рабочей области рецептурно-технологических факторов для прогноза критериев качества стеклобазальтопластиковых труб

При решении третьей подзадачи, связанной с выявлением области рецептурно-

технологических факторов для прогноза критериев качества в рабочей области параметров технологии, следует отметить, что критерии, характеризующие работоспособность и эффективность технологии, часто ограничены узкими допустимыми интервалами.

3.4 Влияние рецептурных факторов и структуры на свойства стеклобазальтопластиковых труб

Для оценки влияния элементов структуры гибридных стеклобазальтопластиковых композитных труб на их свойства предлагается использовать теорию фракталов, которая позволяет оценить сложность структуры различных материалов и материалов с неоднородной структурой. Мультифрактальный анализ, основанный на спектре статистических размерностей Реньи [132], является особенно перспективным инструментом для исследования таких материалов.

В материаловедении одной из главных задач является получение необходимых физических, технологических, механических либо других свойств изделий – $Y_i, i = 1, 2, \dots, n$, которая достигается путем варьирования технологическими параметрами или элементами состава. Каждому критерию качества готового изделия из множества известных критериев, соответствует такой критерий $Y_{i,r}^*, r = 1, 2, \dots, s \in Y_i$, по которому можно оценить технологичность либо экономичность его производства.

Предполагается, что имеющееся множество качественно неоднородных критериев – $Y_i^* (i = 1, \dots, n)$ может включать в себя подмножество $\{Y_{i,r}^* (r = 1, \dots, s)\}$ качественно однородных критериев композитных труб. Например, критерий качества композитов Y_1 может являться одним из показателей его механических характеристик, таких как прочность – $Y_{1,1}^*$, пластичность $Y_{1,2}^*$ и т. д., тогда как такой показатель Y_2 в свою очередь может отображать экономические показатели композитов, к примеру, прибыль $Y_{2,1}^*$, самоокупаемость $Y_{2,2}^*$ и другие). Величина критерия обычно интерпретируется как оценка степени достижения определённой цели.

При исследовании свойств композитных труб часто возникает необходимость минимизировать затраты на проведение экспериментов. Для этого совмещают априорную информацию (известные данные о материале) с экспертными оценками, полученными, например, в результате компьютерного моделирования, что позволяет эффективно определить рабочую область параметров, в которой будут проводиться экспериментальные исследования.

Для оценки критериев качества труб в определенной области параметров проводится пассивный эксперимент. Он основан на анализе существующих данных и экспертных оценок, а не на проведении новых экспериментов. В данном исследовании для пассивного эксперимента была собрана информация о стеклобазальтопластиковых трубах различных производителей. На

основании анализа данных производственных предприятий РФ по стеклобазальтопластиковым и стеклопластиковым трубам была получена схема с рабочими параметрами исследуемых композитных труб по их составу и фрактальным размерностям элементов структуры для реализации пассивного эксперимента (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Рабочая область параметров гибридных стеклобазальтопластиковых композитных труб

Предел прочности на растяжение в окружном направлении	Прочность на сжатие	Осевой модуль упругости на растяжение	Ровинг (волокно)	Диаметр базальтового волокна	Связующее	Фрактальная размерность волокна	Фрактальная размерность связующего
σ_p , МПа	σ_c , МПа	E , ГПа	R , %	d , мкм	S , %	D_R	D_s
345-460	260-370	14.0-19.2	65-80	3.0-15.0	20.0-35.0	1.500-2.000	1.600-2.000

Для выявления области возможных параметров с повышенными численными значениями решений проведен анализ параметров состава и структуры гибридных стеклобазальтопластиковых композитных труб, результаты которого приведены на Рисунке 3.1. Согласно данной схеме, число управляемых переменных, обозначаемых вектором X , равно – 5, а количество выбранных экспертами критериев, обозначаемых вектором Y , равно 3 [132].

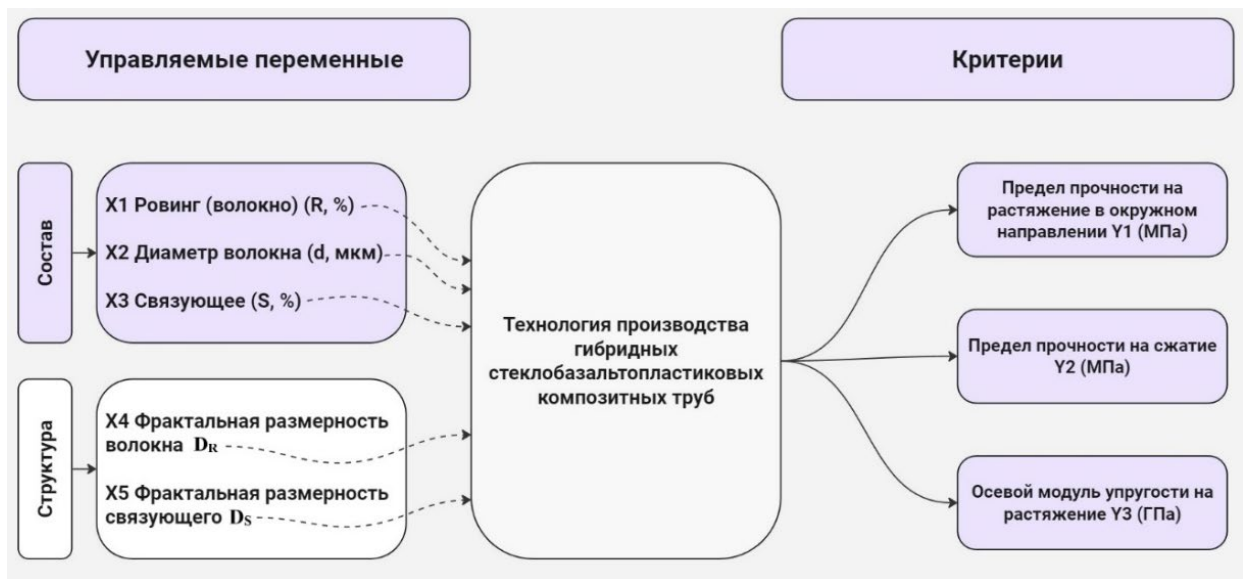


Рисунок 3.1 - Параметры состава и структуры для оценки критериев качества стеклобазальтопластиковых композитных труб

Репрезентативная выборка, охватывающая приблизительно 20-летний период эксплуатации данной технологии, позволила собрать данные для проведения пассивного эксперимента и формирования системы линейных уравнений (3.1-3.3), описывающих взаимосвязи управляемых переменных и выбранных критериев. Эти уравнения определяют рабочую область параметров

технологии.

1). Предел прочности на растяжение в окружном направлении Y_1 {МПа}:

$$Y_1 = -615.250 \cdot X_0 + 7.250 \cdot X_1 + 4.625 \cdot X_2 + 2.018 \cdot X_3 + 21.322 \cdot X_4 - 30.245 \cdot X_5, \quad R^2=0.94 \quad (3.1)$$

Модель адекватна согласно критерию Фишера $F_{\text{набл}}=1.216$ при $F_{\text{крит}}=2.400$.

Модель адекватна согласно критерию Кохрена $F_{\text{набл}}=0.388$ при $F_{\text{крит}}=0.547$.

2). Предел прочности на сжатие Y_2 {МПа}:

$$Y_2 = -302.488 \cdot X_0 + 5.217 \cdot X_1 + 4.827 \cdot X_2 + 0.213 \cdot X_3 + 3.126 \cdot X_4 - 1.178 \cdot X_5 \quad R^2=0.90 \quad (3.2)$$

Модель адекватна согласно критерию Фишера $F_{\text{набл}}=1.012$ при $F_{\text{крит}}=2.400$.

Модель адекватна согласно критерию Кохрена $F_{\text{набл}}=0.326$ при $F_{\text{крит}}=0.547$.

3). Осевого модуль упругости на растяжение Y_3 {ГПа}:

$$Y_3 = -18.452 \cdot X_0 + 0.927 \cdot X_1 + 0.560 \cdot X_2 + 0.118 \cdot X_3 + 1.125 \cdot X_4 - 0.746 \cdot X_5 \quad R^2=0.88 \quad (3.3)$$

Модель адекватна согласно критерию Фишера $F_{\text{набл}}=1.014$ при $F_{\text{крит}}=2.400$.

Модель адекватна согласно критерию Кохрена $F_{\text{набл}}=0.342$ при $F_{\text{крит}}=0.547$,

где X_0 – безразмерный коэффициент уравнения;

X_1 – содержание ровинга (волокна), %

X_2 - Диаметр базальтового волокна, мкм

X_3 – Содержание связующего, %

X_4 – Фрактальная размерность волокна,

X_5 – Фрактальная размерность связующего.

Средняя относительная погрешность между экспериментальными и расчетными значениями составила: для предела прочности на растяжение (Y_1) — 4.70%; для предела прочности на сжатие (Y_2) – 6.82%; модуля упругости (Y_3) – 5.46%.

Математические модели (3.4) – (3.6) без учета фрактальной размерности структуры.

Предел прочности на растяжение:

$$Y_1 = 198.745 + 6.349 \cdot X_1 - 4.933 \cdot X_2 - 8.468 \cdot X_3 \quad R^2=0.96 \quad (3.4)$$

Предел прочности на сжатие:

$$Y_2 = -79.133 + 6.615 \cdot X_1 - 3.789 \cdot X_2 - 79.133 \cdot X_3 \quad R^2=0.84 \quad (3.5)$$

Модуль упругости:

$$Y_3 = 22.862 + 0.101 \cdot X_1 - 0.159 \cdot X_2 - 0.479 \cdot X_3 \quad R^2=0.88 \quad (3.6)$$

Несмотря на то, что фрактальные размерности элементов возможно в некоторой степени косвенно зависят от расходов этих компонентов и диаметра ровинга, в данном случае оказывают не столь существенное влияние на свойства. Однако точность моделей с применением фрактальной размерности (3.1) - (3.3) выше, исходя из показателей коэффициентов парной корреляции моделей без фрактальной размерности (3.4) - (3.6), что свидетельствует о влиянии размерностного фактора на физико-механические свойства труб.

Математические модели (3.1-3.3) позволяют прогнозировать механические свойства стеклобазальтопластиковых труб в заданной рабочей области параметров состава и структуры без проведения натурных испытаний. На основании анализа коэффициентов уравнений (3.1–3.3) в нормируемых единицах произведена оценка влияния выбранных параметров $X_1...X_5$ на функцию цели. Гистограммы на Рисунках 3.2-3.3 демонстрируют степень влияния каждого параметра на механические свойства труб.

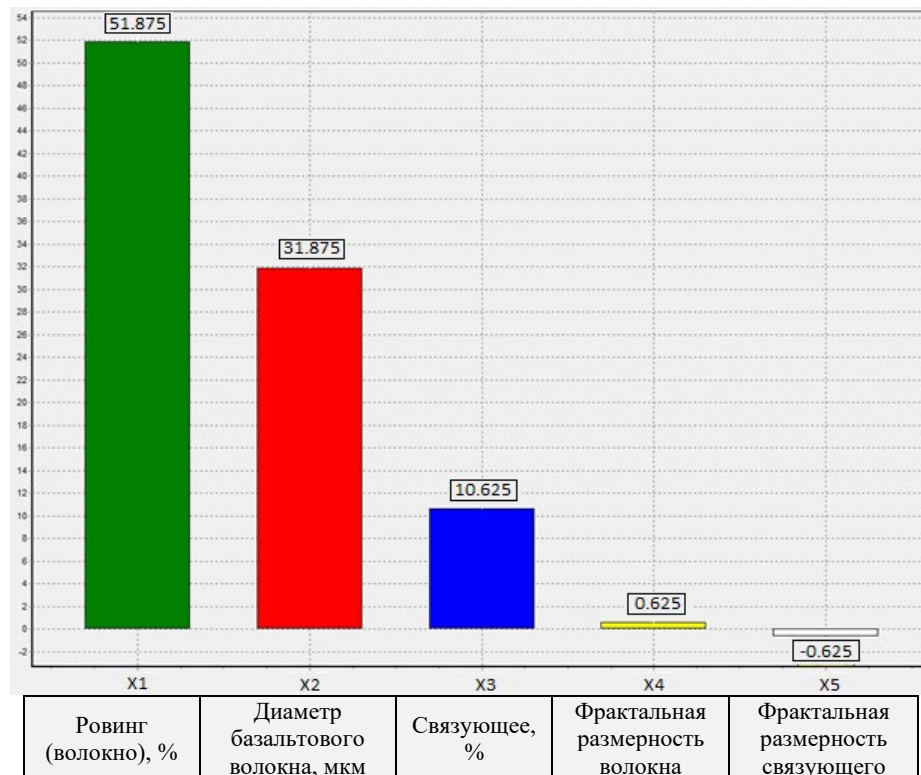


Рисунок 3.2 - Вес элементов состава и фрактальной размерности структуры при оценке их влияния на прочность при сжатии

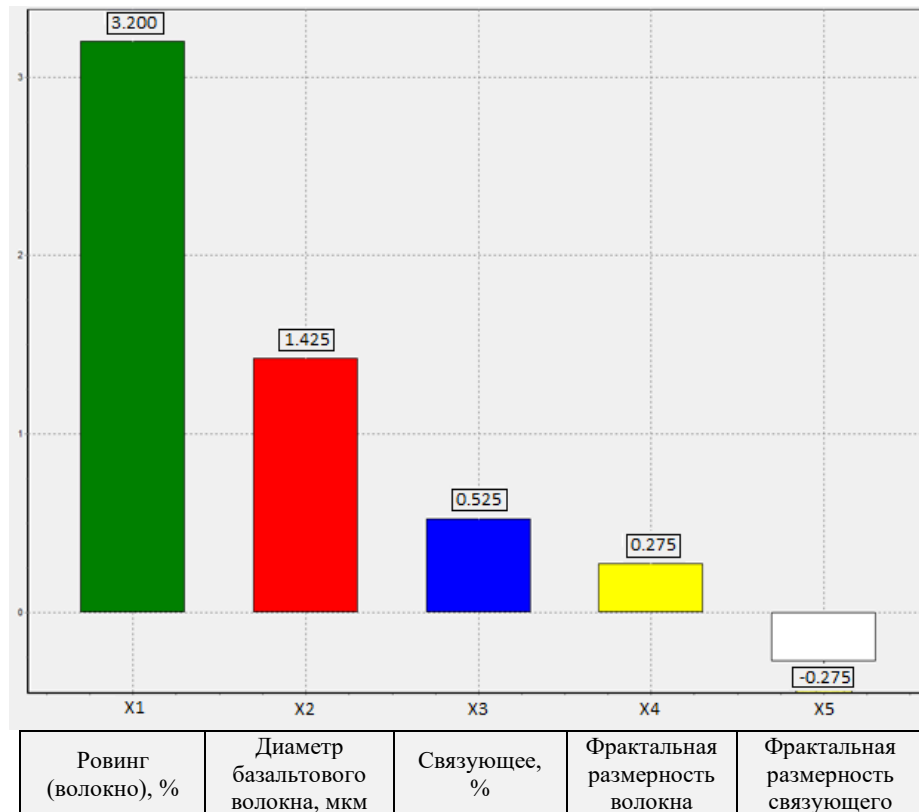


Рисунок 3.3 - Вес элементов состава и фрактальной размерности структуры при оценке их модуля упругости (модуля Юнга)

Наибольшее влияние на показатели прочности и модуля упругости оказывают следующие факторы (Рисунки 3.2-3.3):

1. Процентное содержание ровинга X_1 , как основного материала труб (матрица композита), который обладает высокими механическими характеристиками. Его вклад в механические свойства составляет 87.5 единиц, что значительно превышает вклад других параметров X ;
2. Диаметр волокон X_2 также существенно влияет на рассматриваемые свойства. Его воздействие на прочность при растяжении оценивается в 41.250 единицы;
3. Суммарный вклад компонентов связующего оценивается в 13.750 единиц.

Структурные параметры, такие как фрактальная размерность волокон матрицы (X_4) и связующего (X_5), вносят вклад в 15.0 единиц, разделяясь поровну между собой (по 7.5 единиц каждый).

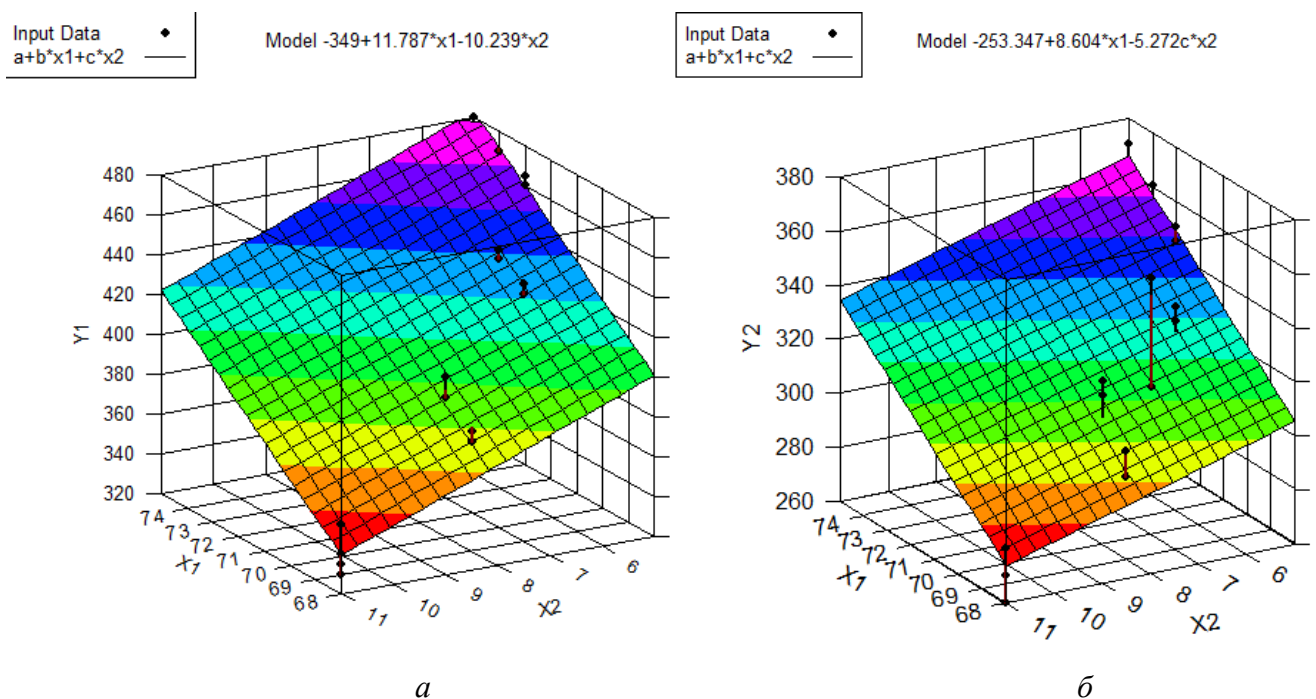
Таблица 3.2 отражает экспертные оценки того, как изменение содержания каждого компонента в составе труб влияет на их прочность и модуль упругости. Данные получены на основе опыта специалистов в области строительных материалов и изделий. Результаты, представленные в Таблице 3.2, могут использоваться для планирования новых экспериментов, направленных на более точное определение зависимости свойств труб от их состава.

Таблица 3.2 - Влияние состава и структуры композитных труб на механические свойства при изменении содержания конкретного элемента состава на 1%

Влияние управляемой переменной на механические свойства гибридных стеклобазальтопластиковых композитных труб	σ_p , МПа	σ_c , МПа	E, ГПа
X₁ В трубах с исходным наружным диаметром 164 мм (из стенки 7 мм - внешний силовой слой с кольцевой намоткой, которая отвечает за прочность в окружном направлении, в т. ч. от сминающего давления. В таблице показано влияние ровинга в пределах 65-80 % на механические свойства труб. Повышение его содержания приводит к повышению свойств	+0.9÷1,3 МПа	+0.5÷0.7 МПа	+0.03÷0.04 ГПа
X₂ Диаметр волокон композитных труб X₂ также в значительной степени влияет на изучаемые свойства. При увеличении диаметра волокон до 15 мкм он укрепляет матрицу композита, что приводит к возрастанию показателей прочности и модуля упругости (модуля Юнга)	+1.1÷1.4 МПа	+0.9÷1.1 МПа	+0.04÷0.05 ГПа
X₃ Возрастание содержания связующего (X₃) в составе труб в пределах от 20% до 35% приводит к повышению показателей прочности благодаря увеличению протяженности переходной зоны матрица-связующее	+0.9÷1,3 МПа	+0.5÷0,7 МПа	+0.03÷0.04 ГПа
X₄, X₅ Повышение фрактальной размерности волокон матрицы (X₄) и эпоксидного связующего (X₅) приводит к возрастанию механических характеристик труб благодаря увеличению протяженности границы раздела матрица-связующее, что приводит к повышению когезионных свойств и прочности	+1.3÷1,5 МПа	+ 1.0÷1,1 МПа	+ 1.1÷1.2 ГПа

Примечание. Знаки обозначают: «+» — повышение, «-» — понижение.

Рисунок 3.4 иллюстрирует зависимость прочности и модуля упругости композитных труб от содержания и диаметра базальтовых волокон. Из графиков следует, что увеличение содержания волокна и их диаметра приводит к возрастанию показателей прочности и модуля упругости.



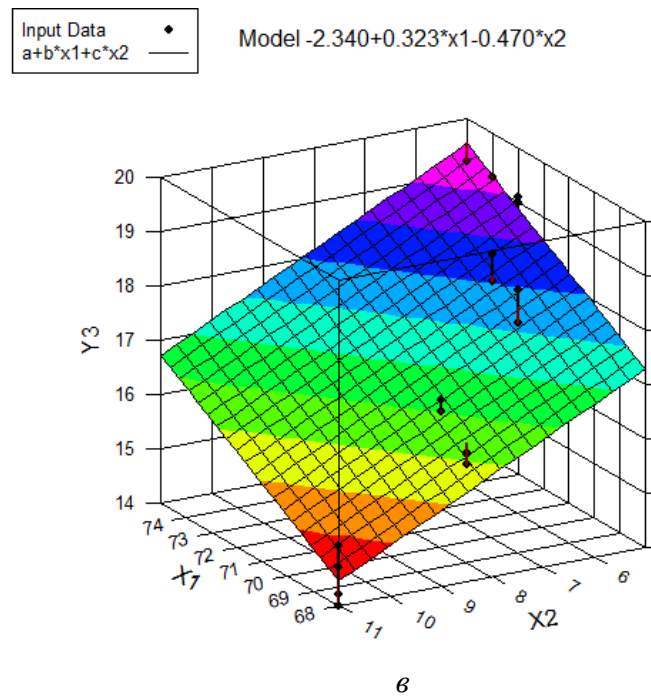


Рисунок 3.4 - Зависимость предела прочности на растяжение (а), предела прочности на сжатие (б), модуля упругости (в) от содержания ровинга – X_1 (%), диаметра базальтового волокна – X_2 (мкм)

При определении численных показателей критериев в матрице планирования (Таблица 3.3) эксперты опирались на существующие в данной области закономерности, которые объясняют влияние управляемых параметров на данные критерии. Поскольку реализация прямого эксперимента на реальных объектах не всегда возможна в силу экономических ограничений, для решения задачи был применен экспертный логико-технологический анализ.

Для оценки степени влияния назначенных переменных на механические свойства стеклобазальтопластиковых композитных труб использовалась матрица планирования активного эксперимента (Таблица 3.3), которая представляет собой дробную реплику 2^{5-1} от полного факторного эксперимента. В рамках данного эксперимента экспертами проведен анализ, основанный на предполагаемых взаимоотношениях переменных и целевой функции (Таблица 3.2). Результаты этого анализа представлены в матрице в столбцах 8, 10, 12, где, соответственно, $Y_{1э}$, $Y_{2э}$ и $Y_{3э}$ – экспертные оценки показателей прочности на растяжение в окружном направлении и прочности на сжатие, а также показателей осевого модуля упругости соответственно.

В результате анализа были получены уравнения (3.4-3.6), позволяющие прогнозировать механические свойства стеклобазальтопластиковых композитных труб $Y_{рас1}$, $Y_{рас2}$, $Y_{рас3}$ в неизвестной ранее части РО, которым соответствуют столбцы матрицы для значений 9, 11 и 13.

Для реализации матрицы планирования были выбраны следующие уровни значений аргументов:

НУ – нижний уровень значений аргументов;

ВУ – верхний уровень значений аргументов;

ОУ – средний уровень, рассчитываемый как $(НУ+ВУ/2)$;

ИВ – интервал варьирования, равный разности между ВУ и ОУ $(ВУ - ОУ)$.

Показатели прогноза механических свойств стеклобазальтопластиковых труб, рассчитанные по моделям (3.7-3.9), приведены в столбцах матрицы 9, 11 и 13.

1). Предел прочности на растяжение в окружном направлении Y_1 {МПа}:

$$Y_1 = -585.745 \cdot X_0 + 12.500 \cdot X_1 + 6.875 \cdot X_2 + 1.964 \cdot X_3 + 23.962 \cdot X_4 - 25.685 \cdot X_5, R^2 = 0.98 \quad (3.7)$$

Для выбранного уровня значимости $\alpha=0.05$ имеем доверительный интервал с вероятностью 0.95:

- модель адекватна согласно критерию Фишера: $F_{\text{набл}}=1.013$, $F_{\text{крит}}=2.400$.

При дисперсионном анализе выявлено, что вероятность того, что коэффициенты при всех переменных равны нулю (т.е. вероятность (по Фишеру) $=0$), что свидетельствует об адекватности модели.

- модель адекватна согласно критерию Кохрена: $F_{\text{набл}}=0.334$; $F_{\text{крит}}=0.547$.

Частные коэффициенты r_{xy} определялись по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)}, \text{ где } \bar{x} \text{ и } \bar{y} - \text{средние значения аргумента и функции; } \sigma(x), \sigma(y) - \text{их дисперсии}$$

соответственно.

Значения частных коэффициентов корреляции, свидетельствуют о существовании корреляции между функцией цели Y_1 и аргументами функции $X_1 \dots X_5$.

r_{YX1}	r_{YX2}	r_{YX3}	r_{YX4}	r_{YX5}
0.97	0.97	0.99	0.99	0.99

2). Предел прочности на сжатие Y_2 {МПа}:

$$Y_2 = -295.241 \cdot X_0 + 7.411 \cdot X_1 + 5.313 \cdot X_2 + 1.518 \cdot X_3 + 1.997 \cdot X_4 - 2.140 \cdot X_5, R^2 = 0.92 \quad (3.8)$$

Для выбранного уровня значимости $\alpha=0.05$ имеем доверительный интервал с вероятностью 0.95:

- модель адекватна согласно критерию Фишера: $F_{\text{набл}}=1.114$, $F_{\text{крит}}=2.400$.

При дисперсионном анализе выявлено, что вероятность того, что коэффициенты при всех переменных равны нулю (т.е. вероятность (по Фишеру) $=0$), что свидетельствует об адекватности модели.

- Модель адекватна согласно критерию Кохрена: $F_{\text{набл}}=0.349$; $F_{\text{крит}}=0.547$.

Значения частных коэффициентов корреляции, свидетельствуют о существовании корреляции между функцией цели Y_2 и аргументами функции $X_1 \dots X_5$.

r_{YX1}	r_{YX2}	r_{YX3}	r_{YX4}	r_{YX5}
0.93	0.91	0.91	0.93	0.94

3). Осевой модуль упругости на растяжение Y_3 {ГПа}:

$$Y_3 = -19.295 \cdot X_0 + 0.457 \cdot X_1 + 0.237 \cdot X_2 + 0.075 \cdot X_3 + 0.879 \cdot X_4 - 0.942 \cdot X_5, R^2 = 0.95 \quad (3.9)$$

Для выбранного уровня значимости $\alpha = 0.05$ имеем доверительный интервал с вероятностью 0.95:

- модель адекватна согласно критерию Фишера: $F_{\text{набл}} = 1.002$, $F_{\text{крит}} = 2.400$.

При дисперсионном анализе выявлено, что вероятность того, что коэффициенты при всех переменных равны нулю (т.е. вероятность (по Фишеру) = 0), что свидетельствует об адекватности модели.

- Модель адекватна согласно критерию Кохрена: $F_{\text{набл}} = 0.336$; $F_{\text{крит}} = 0.547$

Значения частных коэффициентов корреляции, свидетельствуют о существовании корреляции между функцией цели Y_3 и аргументами функции $X_1 \dots X_5$.

r_{YX1}	r_{YX2}	r_{YX3}	r_{YX4}	r_{YX5}
0.96	0.97	0.99	0.99	1.00

Таблица 3.3 представляет собой дробную реплику матрицы планирования активного эксперимента для оценки механических свойств гибридных стеклобазальтопластиковых труб.

Таблица 3.3 - Дробная реплика матрицы планирования активного эксперимента для оценки механических свойств гибридных стеклобазальтопластиковых труб

ОУ		63	8.0	25.5	1.709	1.836	Предел прочности на растяжение в окружном направлении σ_r , МПа		Прочность на сжатие σ_c , МПа		Осевой модуль упругости на растяжение E , ГПа	
ИВ		3.0	3.0	3.5	0.157	0.146						
НУ		60	5.0	22.0	1.552	1.690						
ВУ		66	11.0	29.0	1.865	1.982						
№	X_0	X_1 (R)	X_2 (d)	X_3 (S)	X_4 (D_R)	X_5 (D_S)	$Y_{1\text{экс}}$	$Y_{1\text{рас}}$	$Y_{2\text{экс}}$	$Y_{2\text{рас}}$	$Y_{3\text{экс}}$	$Y_{3\text{рас}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	+	+	+	+	+	+	480	486	370	363	19.2	19.8
2	+	+	+	+	+	+	470	471	360	362	19.2	19.3
3	+	+	+	-	+	-	465	472	350	353	19.1	19.3

ОУ		63	8.0	25.5	1.709	1.836	Предел прочности на растяжение в окружном направлении σ_p , МПа		Прочность на сжатие σ_c , МПа		Осевой модуль упругости на растяжение E, ГПа	
ИВ		3.0	3.0	3.5	0.157	0.146						
НУ		60	5.0	22.0	1.552	1.690						
ВУ		66	11.0	29.0	1.865	1.982						
№	X ₀	X ₁ (R)	X ₂ (d)	X ₃ (S)	X ₄ (D _R)	X ₅ (D _S)	Y _{1экc}	Y _{1pac}	Y _{2экc}	Y _{2pac}	Y _{3экc}	Y _{3pac}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4	+	+	+	-	+	-	460	457	345	351	19.0	18.8
5	+	+	-	+	-	-	440	444	300	331	18.5	18.4
6	+	+	-	+	-	-	435	429	340	330	18.0	19.9
7	+	+	-	-	-	+	430	431	335	321	18.1	17.9
8	+	+	-	-	-	+	425	416	330	319	17.5	17.3
9	+	-	+	+	-	-	400	398	320	311	16.7	16.6
10	+	-	+	+	-	-	390	383	315	310	16.5	16.1
11	+	-	+	-	-	+	380	384	300	301	16.0	16.1
12	+	-	+	-	-	+	375	369	290	299	15.8	15.6
13	+	-	-	+	+	-	355	357	280	279	15.1	15.2
14	+	-	-	+	+	-	340	342	280	278	14.7	14.7
15	+	-	-	-	+	+	335	343	270	269	14.2	14.7
16	+	-	-	-	+	+	330	328	260	268	14.0	14.1

	Экспериментальные данные
	Экспертные оценки, с учетом литературных данных

Большинство характеристик производимых труб имеют строго ограниченные допустимые значения, обусловленные технологическими требованиями. Для определения наилучшего сочетания этих характеристик был применен метод «восхождения по градиенту» [133].

При построении области рецептурно-технологических факторов для прогноза критериев качества механических свойств стеклобазальтопластиковых труб использовались как экспериментальные данные, так и математические модели прогнозирования (3.7) – (3.9). В этом процессе один аргумент изменялся от минимального до максимального значений в пределах заданной рабочей области параметра, в то время как остальные критерии качества фиксировались на среднем уровне. Затем на основании анализа полученных экспериментальных данных строилась математическая модель. В отличие от традиционных методов, в котором область точек описывается линией тренда (Рисунок 3.5 а), графоаналитическим методом исследуемая область представлена как диапазон численных значений параметров (Рисунок 3.5 б).

При обработке экспериментальных данных и построении зависимостей не все точки ложатся на аппроксимирующую функцию, что свидетельствует о сложности технологии и

множестве факторов, влияющих на конечный критерий качества.

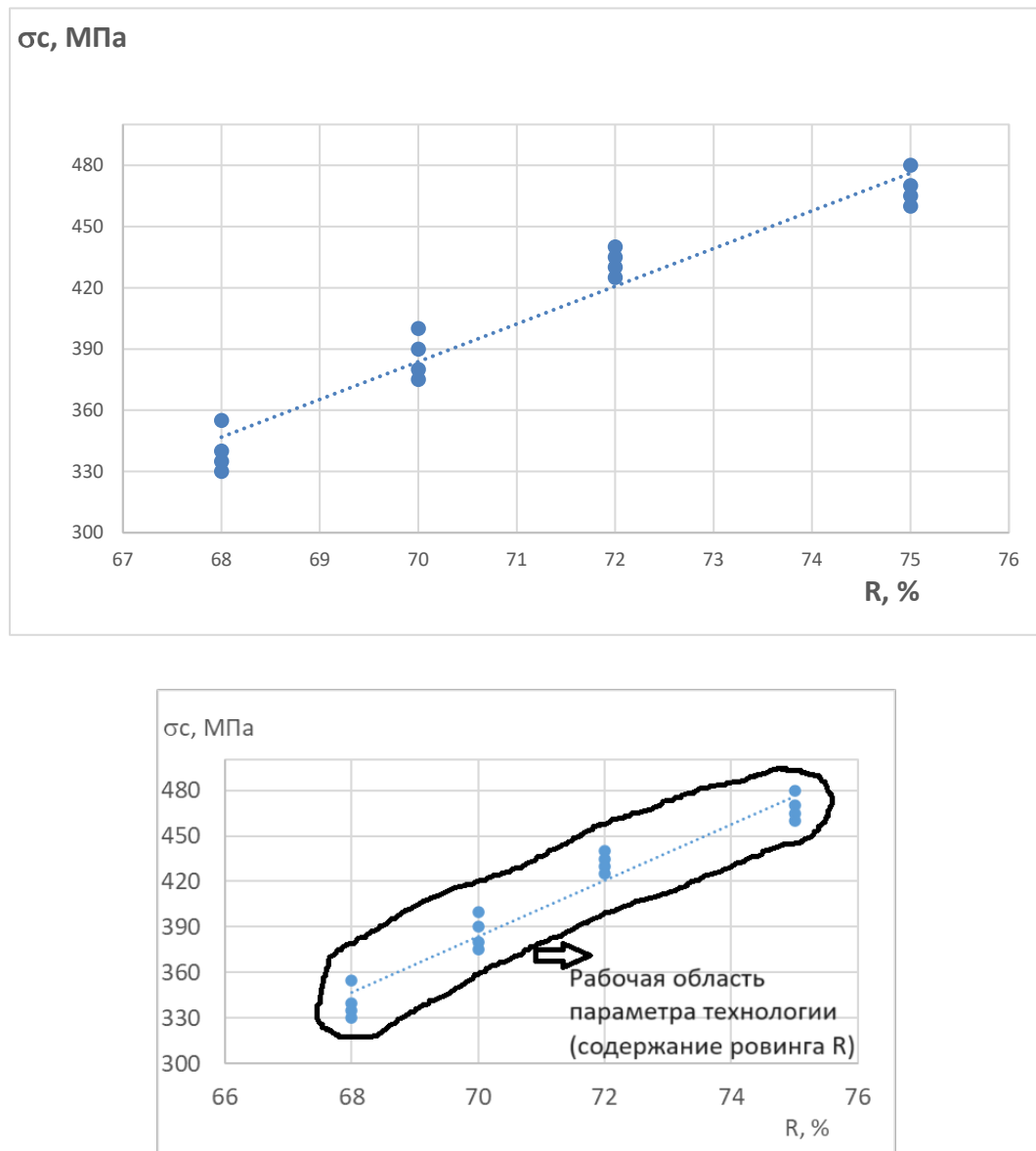


Рисунок 3.5 - Построение рабочей области технологических параметров

На основании анализа результатов активного и пассивного экспериментов с применением графоаналитического метода, определена область свойств стеклобазальтопластиковых труб, которая представляет собой зону наложения рабочих областей рецептурно-технологических факторов, в которой можно одновременно прогнозировать значения исследуемых свойств (Рисунок 3.6). Если есть необходимость предпочтения на конкретное свойство, то путем варьирования рецептурно-технологическими факторами (выбранными параметрами), например опустив вниз перпендикуляр на ось абсцисс ОХ, можно получать его рациональные значения и оценивать при этом остальные свойства.

С целью повышения точности прогноза свойств целесообразно рекомендовать внесение в существующий ГОСТ Р 55068 диапазона исследованных значений толщины волокон 5-18 мкм.

Проведенное исследование позволило систематизировать и углубить знания о влиянии состава и структуры на механические свойства стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб.

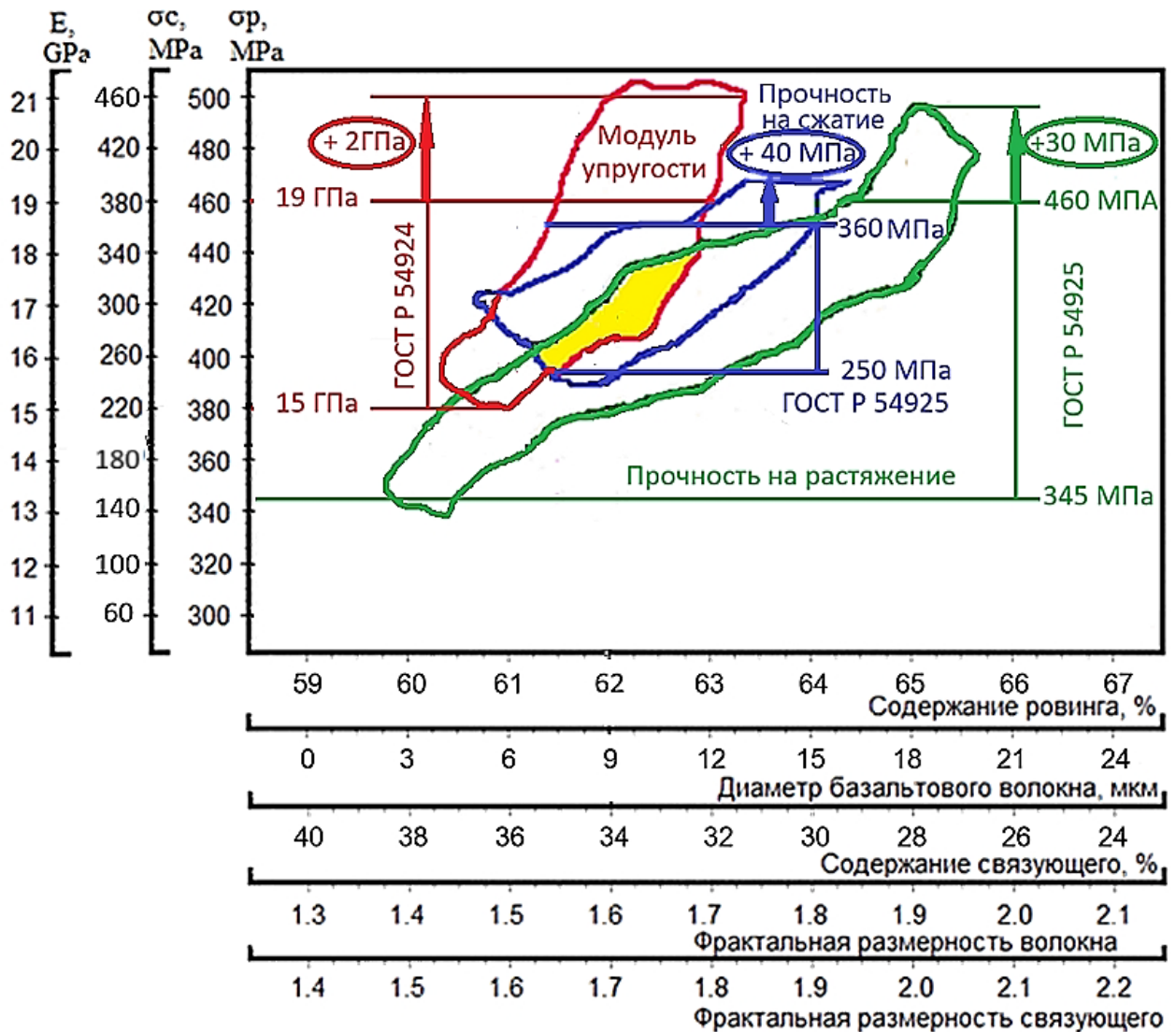


Рисунок 3.6 - Установление границ варьирования рецептурно-технологическими факторами для получения композитных труб с повышенными механическими свойствами

Реализация разработанного метода с применением теории фракталов позволила прогнозировать повышение механических свойств стеклобазальтопластиковых труб путем подбора рецептурных факторов, которые безусловно отражаются на измерении структуры и, соответственно, на изменении фрактальной размерности ее элементов:

- Прочность на растяжение в окружном направлении на 30 МПа;
- Прочность на сжатие на 40 МПа;
- Осевой модуль упругости на растяжение на 2 ГПа.

Практическое применение данной рабочей области существования механических свойств стеклобазальтопластиковых труб охватывает возможности выбора ключевого критерия, продиктованного заказчиком, и обеспечении его необходимых численных значений с помощью управления выбранными параметрами.

3.5 Проверка на адекватность разрабатываемого метода на примере реализованных экспериментов с полиуретановой смолой

В данном разделе проводилась проверка описанного выше метода поиска рабочей области параметров композитных материалов с рациональными свойствами. Исследования проводились с полиуретановой смолой, которая использовалась в качестве примера из литературных источников для проверки на адекватность разрабатываемого метода [134]. Получены модели, описывающие влияние состава полиуретановой смолы на механические характеристики: средние значения предельной прочности, предела текучести и модуля упругости смолы для каждого коэффициента объемного расширения. Результаты данных исследований подтверждают работоспособность описанного выше метода.

Для реализации матрицы планирования экспериментов использовались следующие параметры:

- НУ** – нижний уровень значений аргументов;
- ВУ** – верхний уровень значений аргументов;
- ОУ** – средний уровень $(НУ+ВУ/2)$;
- ИВ** – интервал варьирования $(ВУ-ОУ)$;
- X_0** – безразмерный коэффициент уравнения;
- X_1** – Коэффициент расширения смолы в фиксированном объеме трубки;
- X_2** – Плотность смолы, г/см³;
- X_3** – Общее количество использованной смолы, г.;
- X_4** – Количество компонента А смолы, г.;
- X_5** – Количество компонента Б смолы, г.;
- $Y_{\text{экс}}$** – экспериментальные данные;
- $Y_{\text{рас}}$** – расчётные данные, полученные по математической модели.

Таблица 3.4 представляет рабочую область параметров полиуретановой смолы, использованных в проведенных экспериментах.

Таблица 3.4 - Рабочая область параметров полиуретановой смолы

Критерии качества (функция цели)				Состав, параметры производства (аргументы функции)					
№ п/п	Коэф. расширения смолы в фиксированном объеме трубки	Плотность смолы	Общее количество использованной смолы	Кол-во компонента смолы	Кол-во компонента смолы	Время реакции	Среднее значение предела текучести	Среднее значение предельной прочности	Модуль упругости
	γ	ρ , г/см ³	m, г	A, г	B, г	τ , сек	σ_T , МПа	σ_p , МПа	E, МПа
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	Y ₁	Y ₂	Y ₃
1	3	0.349	416	277	139	4	5.145	6.756	104
2	4	0.255	312	208	104	4	2.886	3.943	73
3	6	0.184	208	139	69	5	1.597	1.933	44
4	8	0.128	156	104	52	6	1.020	1.150	30
5	10	0.088	125	83	42	8	0.558	0.636	18
6	12.5	0.066	100	67	33	12	0.407	0.447	14
7	13	0.060	92	62	31	20	0.262	0.295	11
8	15	0.056	84	56	28	29	0.236	0.275	9

Получены математические модели прогноза механических свойств полиуретановой смолы в рабочей области параметров (3.10-3.12):

$$Y_1 = -4.927 \cdot X_0 + 0.364 \cdot X_1 + 31.000 \cdot X_2 - 0.147 \cdot X_3 - 0.006 \cdot X_4 + 0.442 \cdot X_5 - 0.058 \cdot X_6, \quad (3.10)$$

$$R^2 = 0.99.$$

$$Y_2 = -5.962 \cdot X_0 + 0.380 \cdot X_1 + 22.523 \cdot X_2 - 0.145 \cdot X_3 + 0.027 \cdot X_4 + 0.410 \cdot X_5 - 0.052 \cdot X_6, \quad (3.11)$$

$$R^2 = 0.97.$$

$$Y_3 = -24.954 \cdot X_0 + 0.843 \cdot X_1 + 89.437 \cdot X_2 - 0.294 \cdot X_3 + 1.157 \cdot X_4 - 0.738 \cdot X_5 - 0.109 \cdot X_6, \quad (3.12)$$

$$R^2 = 0.94.$$

Результаты определения части рабочей области параметров, включающей выявление управляемых переменных и их численных значений, при которых получены рациональные критерии качества смолы приведены в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Дробная реплика матрицы планирования экспериментов для оценки механических свойств полиуретановой смолы

ОУ		3.5	0.302	364	242	122	0.50	Среднее значение предела текучести		Среднее значение предельной прочности		Модуль упругости	
ИВ		0.5	0.047	52	34	18	0.25						
НУ		3	0.255	312	208	104	4.0						
ВУ		4	0.349	416	277	139	4.5						
№	X ₀	X ₁ (γ)	X ₂ (ρ)	X ₃ (m)	X ₄ (A)	X ₅ (B)	X ₆ (τ)	Y _{1экс}	Y _{1рас}	Y _{2экс}	Y _{2рас}	Y _{3экс}	Y _{3рас}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	+	+	+	+	-	+	-	5.145	5.156	6.756	6.760	104	104
2	+	-	+	+	+	+	-	5.000	4.976	6.125	6.116	100	99

Окончание Таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3	+	+	+	-	-	-	+	4.580	4.580	5.758	5.758	94	94
4	+	-	+	-	+	-	+	4.250	4.273	5.227	5.235	88	89
5	+	+	-	+	-	-	-	3.720	3.711	4.995	4.992	85	84
6	+	-	-	+	+	-	-	3.460	3.460	4.524	4.524	81	80
7	+	+	-	-	-	+	+	3.022	3.025	4.112	4.113	77	77
8	+	-	-	-	+	+	+	2.886	2.882	3.943	3.941	73	73

	Экспериментальные данные
	Экспертные оценки, с учетом литературных данных

В результате проведенного анализа были разработаны математические модели прогноза механических свойств полиуретановой смолы, охватывающие рабочую область параметров, для которых получены рациональные значения свойств, как указано в Таблице 3.5 (3.13-315).

Модели представлены следующими уравнениями:

$$Y_1 = -4.818 \cdot X_0 - 4.142 \cdot X_1 + 7.789 \cdot X_2 - 0.036 \cdot X_3 + 0.015 \cdot X_4 + 0.510 \cdot X_5 + 3.413 \cdot X_6, \quad (3.13)$$

$$R^2 = 0.99$$

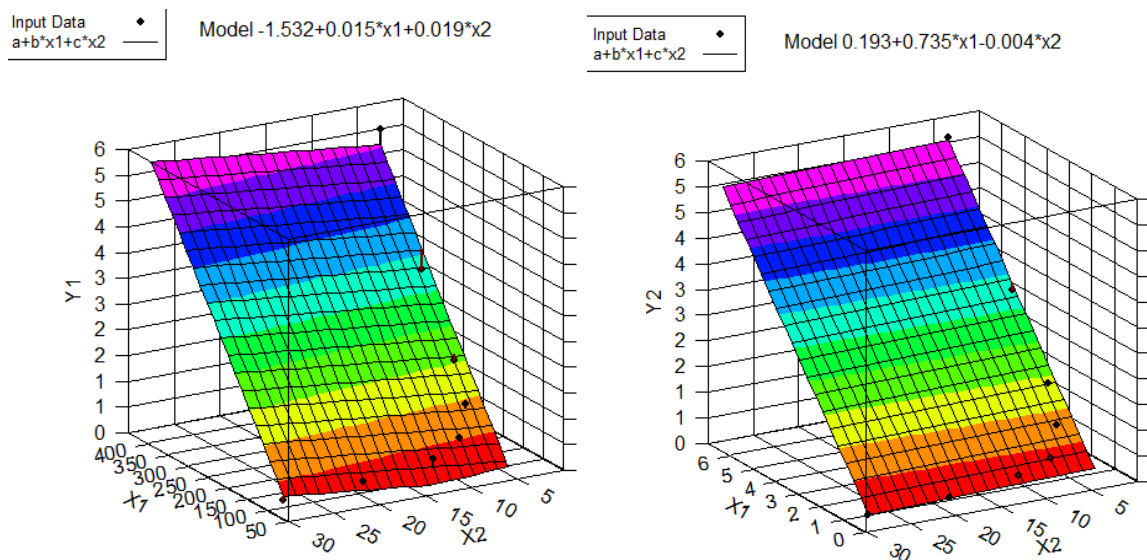
$$Y_2 = 18.274 \cdot X_0 + 2.028 \cdot X_1 + 21.495 \cdot X_2 + 0.026 \cdot X_3 - 0.047 \cdot X_4 + 0.011 \cdot X_5 - 6.057 \cdot X_6, \quad (3.14)$$

$$R^2 = 0.96$$

$$Y_3 = 276.807 \cdot X_0 + 19.944 \cdot X_1 + 239.633 \cdot X_2 + 0.343 \cdot X_3 + 0.052 \cdot X_4 - 1.322 \cdot X_5 - 72.222 \cdot X_6, \quad (3.15)$$

$$R^2 = 0.97$$

На Рисунке 3.7 приведены зависимости, описывающие влияние состава полиуретановой смолы на критерии ее качества.



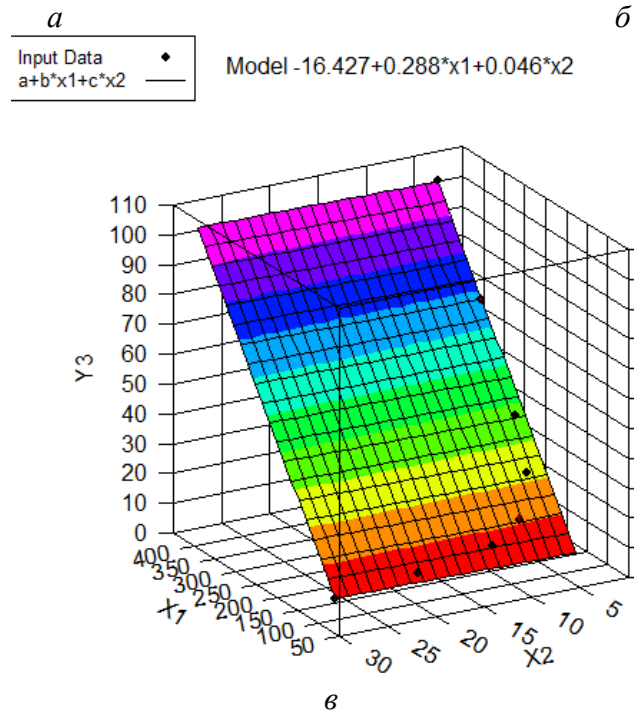


Рисунок 3.7 - Зависимость предела текучести (а), предела прочности на растяжение (б), модуля упругости (в) от общего количества использованной смолы – X_1 (г) и время реакции – X_2 (сек)

Результаты определения части рабочей области параметров полиуретановой смолы, при которых достигаются наилучшие значения выбранных критериев (Таблица 3.5), приведены ниже:

- коэффициент расширения смолы в фиксированном объеме трубки $\gamma=69-72\%$;
- плотность смолы $\rho=0.255-0.349$ г/см³;
- общее количество использованной смолы $m=312-416$ г;
- количество компонента смолы $A=208-277$ г;
- количество компонента смолы $B=104-139$ г;
- время реакции $\tau=4.0-4.5$ сек.

При данных параметрах были достигнуты следующие значения ключевых механических характеристик:

- предел текучести $\sigma_T=2.886-5.145$ МПа;
- предельная прочность $\sigma_p=3.943-6.756$ МПа;
- модуль упругости $E=73-104$ МПа.

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенного метода прогноза механических свойств полиуретановой смолы.

3.6 Выводы по главе 3

Проведенное исследование позволило систематизировать и углубить знания о критериях качества стеклобазальтопластиковых труб. Основные результаты по итогам третьей главы

представлены далее.

1. Выбор и обоснование параметров технологии. На основе анализа литературных данных, экспертных оценок и производственной практики были определены ключевые механические характеристики труб и соответствующие им технологические параметры. В качестве управляемых переменных были выбраны состав и структура материала, что позволило создать основу для целенаправленного управления свойствами конечного продукта.

2. Определение рабочей области параметров. Была установлена область допустимых значений технологических параметров, обеспечивающих получение труб с требуемыми характеристиками. Границы этой области были определены с помощью статистического анализа данных производственных предприятий и нормативных документов. Разработанные математические модели позволяют прогнозировать свойства труб при изменении технологических параметров в пределах установленной области.

3. Идентификация области рациональных критериев качества. Впервые была определена часть рабочей области параметров, в которой наблюдается сочетание прочностных характеристик труб. Для этой области были разработаны математические модели, позволяющие оценить влияние различных факторов на качество продукции. Полученные результаты расширяют возможности для создания труб с повышенными эксплуатационными характеристиками.

4. Определение области рецептурно-технологических факторов для прогноза критериев качества. Для стеклобазальтопластиковых труб была определена область, в которой наблюдается рациональное сочетание прочности на растяжение, сжатие и модуля упругости при следующих значениях технологических параметров: содержание ровинга 68–74%, диаметр базальтового волокна 7–12 мкм, содержание эпоксидного связующего 21–27%.

5. Разработка метода управления и прогноза свойств стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов. Был разработан метод, позволяющий оперативно и точно прогнозировать прочностные характеристики труб на основе измеренных технологических параметров. Адекватность и сходимость разработанных моделей были подтверждены статистическими критериями:

- модель прогноза прочности на растяжение в окружном направлении адекватна согласно критерию Кохрена и составила $F_{\text{набл}}=0.334$ при $F_{\text{крит}}=0.547$, сходимость результатов подтверждается критерием Фишера $F_{\text{набл}}=1.013$ при $F_{\text{крит}}=2.400$;
- модель прогноза прочности на сжатие адекватна согласно критерию Кохрена: $F_{\text{набл}}=0.349$ при $F_{\text{крит}}=0.547$ и сходимость результатов подтверждается критерием Фишера $F_{\text{набл}}=1.114$ при $F_{\text{крит}}=2.400$;
- модель прогноза осевого модуля упругости на растяжение адекватна согласно критерию Кохрена: $F_{\text{набл}}=0.336$ при $F_{\text{крит}}=0.547$ и сходимость результатов подтверждается критерием

Фишера $F_{\text{набл}}=1.002$ при $F_{\text{крит}}=2.400$.

6. Апробация разработанного метода на примере применения к прогнозу свойств полиуретановой смолы (при коэффициентах корреляции моделей $R^2=0.97\dots 0.99$) подтверждает его работоспособность и эффективность.

Глава 4. УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ

4.1 Организация фрактального моделирования композитных материалов

Строение стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых композитных труб (Раздел 2) отличается неоднородностью. Аппроксимация элементов их структуры фигурами Евклида (например, кубами, окружностями, прямыми линиями) приводит к погрешностям в моделях, описывающих связь между структурой и свойствами материала. Для анализа таких неоднородных структур с элементами сложной геометрической конфигурации применяется теория фракталов, основанная на промежуточной асимптотике [135]. Фрактальная размерность отражает компактность заполнения пространства исследуемым материалом. Поскольку структура материала определяет его свойства, а фрактальная размерность предоставляет количественную оценку структуры, она должна каким-то образом отражать свойства материала.

Создание математических моделей фрактального типа сталкивается с трудностями, связанными с задачами, для решения которых традиционные методы математического моделирования оказываются недостаточными. Для преодоления этих трудностей исследования часто проводятся с использованием экспертного и эмпирико-технологического анализа. Для выполнения фрактального анализа сложных систем, таких как композитные трубы, необходимо провести ряд процедур. Поскольку на сегодняшний день не существует единой стратегии фрактального моделирования, были предложены и реализованы отдельные элементы этого процесса с учетом следующих условий:

1. Математическая модель фрактального типа должна основываться на природе фракталов. Под фракталами понимаются сложные объекты со структурой, элементы которой, согласно Б. Мандельброту, подобны друг другу.

2. Определяется фундаментальное свойство фрактала — геометрическая регулярность, характеризующая инвариантность по отношению к масштабу или самоподобие.

3. Фрактальная размерность D исследуемой структуры определяется согласно следующему соотношению:

$$D = \frac{\log n}{\log\left(\frac{1}{r}\right)},$$

где n — число самоподобных частей фигуры, фиксируемых при возрастании линейных размеров исследуемой фигуры в r раз;

4. Оцениваются ключевые параметры, описывающие функциональное состояние объекта и влияющие на его работоспособность с учетом переменных и их предельными численными

показателями.

5. Устанавливается масштаб представления исходной фрактальной структуры.

6. Оценивается однородность пространства состояний модели фрактала. Если объект является неоднородным (мультифракталом), спектр его размерностей вычисляется по формуле Реньи [132]. Мультифракталы [136] выражаются не в первичных геометрических формах, а в алгоритмах:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta} \quad (4.1)$$

где δ — линейный размер ячейки квадратной сетки, используемой для покрытия неоднородного объекта с целью вычисления его размерности, p_i — вероятность того, что точка на исследуемом объекте попадет в i -ю ячейку сетки с размером δ , $\sum_{i=1}^N p_i^q$ — обобщенная статистическая сумма, которая характеризуется показателем степени q , принимающим значения в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$.

Анализируя значения размерностей, полученных по формуле (4.1) из мультифрактального спектра, можно подытожить следующее:

D_0 — однородный фрактал при $q = 0$ и характеризуется размерностью Хаусдорфа–Безиковича.

D_1 — информационная размерность при $q = 1$, описывающая информационную энтропию, характеризующую скорость роста количества информации и определяющая местоположение точки объекта при уменьшении δ .

D_2 — корреляционная размерность при $q = 2$, описывающая вероятность нахождения двух точек в одной квадратной ячейке.

D_∞ — размерность, описывающая наиболее разреженное пространство.

$D_{-\infty}$ — размерность, характеризующая наиболее концентрированное пространство в данном объекте.

Таким образом, для определения принадлежности конкретной структуры к мультифракталу достаточно вычислить спектр её размерностей с использованием формулы (4.1).

7. Определяется чувствительность между определяющим параметром и выбранными переменными для построения математической модели фрактального типа (4.2) [137]:

$$K = \frac{|Y_i - Y_{i+1}|}{|X_i - X_{i+1}|}, \quad (4.2)$$

где X_i и X_{i+1} – два числа характеризующих заданное свойство материала в произвольно выбранных точках $i, i+1$; Y_i и Y_{i+1} – численные значения фрактальных размерностей элементов структуры материала, полученных в этих же точках.

8. На основе полученных данных осуществляется выбор метода для формирования математической модели (например, линейной, полиномиальной, экспоненциальной и т. д.).

9. При наличии дополнительных сведений о физико-химических свойствах системы, математическая модель может быть усовершенствована путем включения дополнительных параметров или изменения функциональной зависимости.

Задачи фрактального моделирования охватывают широкий спектр масштабов: от микрообъектов (внутреннее строение материалов) до макрообъектов (технологические процессы, природные явления). Для оценки структуры микрообъектов предлагается следующий алгоритм, основанный на теории фракталов:

- **Компенсация недостатка информации.** Использование теории фракталов для повышения точности идентификации микроструктуры, особенно в случаях ограниченных данных от традиционных методов.
- Для **оценки критериев качества** без натурных испытаний, в моделях описывающих связи между структурой и исследуемыми свойствами, можно применять фрактальное моделирование, анализ которого включает:
 - a. оценка границ самоподобия исследуемой структуры или ее отдельных компонентов;
 - b. расчет фрактальной размерности компонентов структуры;
 - c. анализ рассчитанных статистических размерностей из мультифрактального спектра;
 - d. определение чувствительности между свойствами материала и спектром размерностей;
 - e. создание математической модели фрактального типа по полученным экспериментальным данным;
 - f. оценка точности прогноза исследуемых свойств на основании влияния размерностей;
 - g. корректировка модели по новым данным.

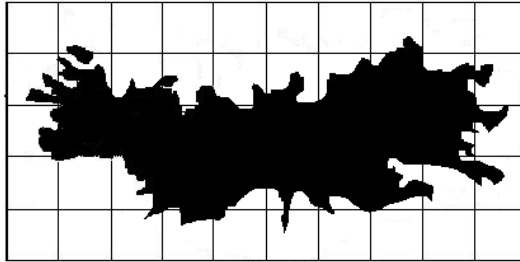
В Главе 4 представлен метод оценки качества материалов на основе фрактальной геометрии. Многочисленные исследования [138–140], подтвердили, что фрактальная размерность структуры тесно связана с физическими, химическими и механическими свойствами материалов, что позволяет использовать фрактальный анализ для прогнозирования свойств. На основании этого были разработаны основы фрактального моделирования структуры и свойств исследуемых композитных материалов, изложенные в Разделе 4.1.

Фрактальная геометрия с ее концепцией дробной размерности и самоподобия,

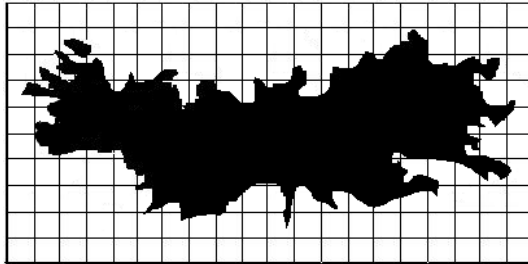
предоставляет инструмент для описания сложных, нерегулярных структур, характерных для многих материалов. Например, в материаловедении фрактальный анализ успешно применяется для оценки неметаллических включений в стали [141], прогнозирования механических свойств бетонов [142] и исследования поведения композитов под нагрузкой [143], [144].

4.2 Метод вычисления фрактальной размерности структуры

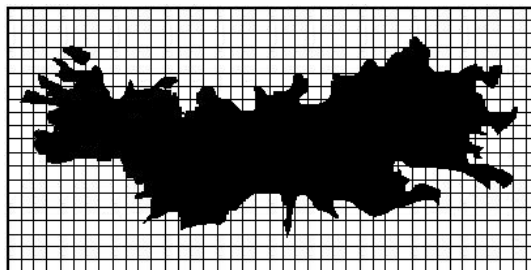
Для вычисления фрактальной размерности микроструктуры исследуемых труб была использована метод, основанная на сравнении клеточной и точечной размерностей объекта. В основе метода вычисления фрактальной размерности по Хаусдорфу (1.6) [145] предполагается покрытие исследуемого множества, будь то прямая, плоскость или объем, элементами, соответствующими его размерности: прямолинейными отрезками, квадратами или кубами с заданным размером δ . После этого подсчитывается количество клеток $N(\delta)$, охвативших исследуемый объект (Рисунок 4.1).



a – Размер клетки $\delta = 8$. Количество клеток, покрывших объект равно $N(\delta) = 38$



б – Размер клетки $\delta = 4$, $N(\delta) = 117$



в – Размер клетки $\delta = 2$, $N(\delta) = 387$

Рисунок 4.1 - Клеточный способ расчета фрактальной размерности объекта

При подсчете фрактальной размерности учитываются все клетки, в которые попадает хотя бы одна точка объекта. Процесс покрытия объекта клетками повторяется несколько раз с разными значениями размера клетки. После этого значения δ и $N(\delta)$ переводятся в логарифмические координаты, используя основание логарифма, которое может быть обычным $\log$, десятичным $\lg$ или натуральным $\ln$.

Точечный метод имеет отличие от клеточного метода, которое заключается в том, что в первом варианте рассчитывается количество точек в клетке, во втором варианте – количество клеток, используемых для покрытия фрактального множества. Размер квадратной клетки L принимается как количество ячеек по каждой стороне фрактала и используются только нечетные значения L , чтобы центральная ячейка клетки была равноудалена от всех сторон.

На первом этапе расчета фрактальной размерности определяется вероятность $P(m, L)$ того, что клетка с линейным размером L содержит в себе m точек (ячеек) фрактального множества. При этом, вокруг каждой такой ячейки фрактала, которая рассматривается в качестве центральной, создается клетка с линейным размером L и проводится подсчет того количества точек (ячеек), которые попадают в нее. Если принять, что фрактальное множество содержит M точек, то вероятность $P(m, L)$ вычисляется в виде отношения числа клеток, в которых находится m точек ($m = 1, \dots, M$), к общему количеству точек M . При этом сумма всех вероятностей будет равна:

$$\sum_{m=1}^M P(m, L) = 1.$$

Количество клеток N с линейным размером L , которые содержат в себе m точек, будет выражаться как $(M / m) \cdot P(m, L)$. Подсчет числа клеток $N(L)$, покрывающих всё изображение будет оцениваться по формуле:

$$N(L) = \sum_{m=1}^K (M / m) \cdot P(m, L) = M \cdot \sum_{m=1}^K (1 / m) \cdot P(m, L),$$

где K – это максимальное количество точек в клетке размером L . Исходя из этого, среднее значение количества клеток $\tilde{N}(L)$ определяется из выражения (4.3):

$$\tilde{N}(L) = \sum_{m=1}^K (1 / m) \cdot P(m, L), \quad (4.3)$$

где $\tilde{N}(L)$ также пропорционально L^{-D} и применяется для оценки фрактальной размерности

исследуемого множества D . Для вычисления фрактальной размерности изображений применялся следующий процесс: изображение сначала переводилось в 256-цветную градацию серого (Рисунок 4.2а), после чего изменялся диапазон цвета для исследуемого объекта (Рисунок 4.2б).

Предложенный метод определения фрактальной размерности, основанный на анализе сходимости клеточного и точечного методов, выделяется среди других методов определения фрактальной размерности своей простотой программной реализации и повышенной точностью. В этом методе вместо покрытия изображения сеткой используется сканирование строк изображения с шагом, равным заданному интервалу измерения.

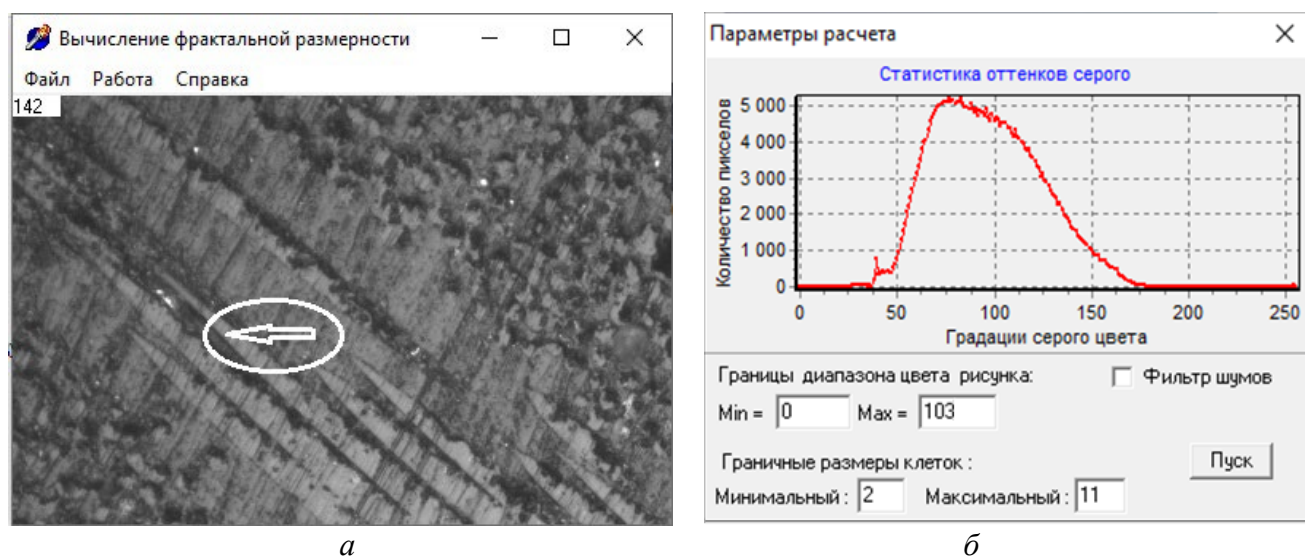


Рисунок 4.2 - Выбор параметров структуры стеклобазальтопластиковых труб для расчета фрактальной размерности обозначен выделенной окружностью. а – волокна труб; б – статистика оттенков серого цвета (256-цветный рисунок в формате bmp)

После серии сканирований с разными шагами программа обрабатывает численные данные, хранящиеся в памяти. Для этого определяются области цвета, соответствующие элементам, чью фрактальную размерность нужно вычислить. В цветовой гамме 0 соответствует черному, 255 — белому, а остальные значения — оттенкам серого. Программа автоматически определяет области цвета темных элементов, таких как эпоксидная смола и светлых волокон с помощью статистического анализа оттенков серого (Рисунок 4.2б). Также предусмотрена возможность ручного задания границ цветового диапазона. На Рисунке 4.2б показаны границы диапазона цвета для темных включений от 0 до 103. После задания размеров клеток программа автоматически вычисляет фрактальную размерность.

На Рисунке 4.3 представлены графики, показывающие изменение значений фрактальной размерности в зависимости от размера клетки и номера итерации. Синие и красные линии иллюстрируют изменения фрактальной размерности для темных объектов изображения,

вычисленные с использованием клеточного метода $D_{монK}$ и точечного метода $D_{монт}$. Аналогично, голубая и зеленая линии отображают результаты для светлых объектов изображения ($D_{фонK}$ и $D_{фонт}$).

Из графика на Рисунке 4.3 видно, что наилучшая сходимость между клеточным и точечным методами для фрактальной размерности эпоксидной смолы наблюдается при размере клетки 5 пикселей: $Dt = (D_{монK} + D_{монт})/2 = (1.842 + 1.816)/2 = 1.829$. На этом шаге вычислений клеточная размерность $D_{монK}$ соответствует значению 1.842, а точечная размерность $D_{монт}$ – значению 1.816.

Для фрактальной размерности светлых волокон наилучшая сходимость также зафиксирована при размере клетки в итерации 5 пикселей при клеточной размерности $D_{фонK} = 1.669$ и точечной размерности $D_{фонт} = 1.647$. Таким образом, $Df = (D_{фонK} + D_{фонт})/2 = (1.669 + 1.647)/2 = 1.658$.

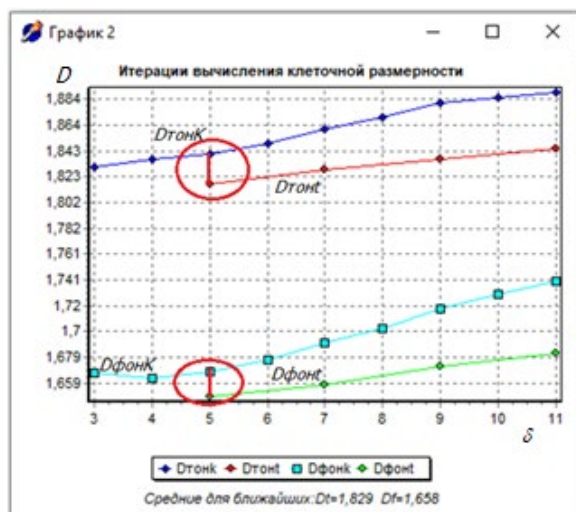


Рисунок 4.3 - Зависимость величины фрактальной размерности от размера клетки: Dt – фрактальная размерность эпоксидной вяжущей; Df – фрактальная размерность светлых волокон

Предложенный метод обладает следующими преимуществами:

- **Высокая скорость обработки** за счет адаптации алгоритма и использования эффективных вычислительных методов, где время, необходимое для определения фрактальной размерности изображения, значительно сокращается.
- **Простота аппаратной реализации**, так как метод может быть легко реализован на существующем компьютерном оборудовании, не требуя специализированных устройств.
- **Повышенная точность**, подразумевается, что благодаря более точному учету площади покрытия объекта, достигается высокая точность определения фрактальной размерности, особенно для изображений со сложной структурой.

4.3 Определение границ фрактальности (самоподобия) структуры и оценка степени неоднородности структуры исследуемых композитных труб с применением мультифрактального анализа

Мультифрактальный анализ позволяет оценить степень неоднородности структуры материалов и определить границы ее самоподобия. Самоподобие означает, что структура материала выглядит одинаково при разных масштабах наблюдения. Однако, для реальных материалов это свойство наблюдается лишь в определенном диапазоне масштабов.

Фрактальная размерность объекта является инвариантной относительно масштаба исследования. Однако при выборе масштабов, которые меньше или больше критического значения, фрактальная размерность начинает зависеть от методов экстраполяции или интерполяции. Критический масштаб определяется как величина, превышающая начальный масштаб и соизмеримая с размерами исследуемого объекта (Рисунок 4.4).

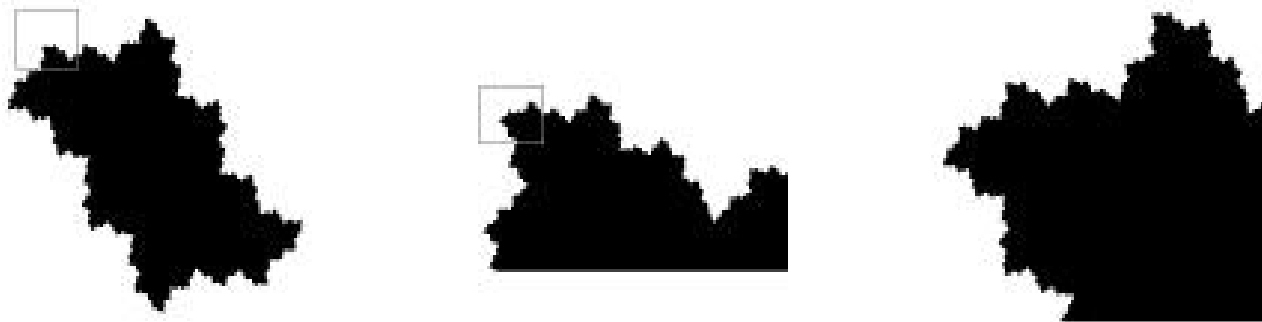


Рисунок 4.4 - Инвариантность фрактальной размерности объекта относительно масштаба [136]

При проведении фрактального анализа предполагается, что исследуемый объект обладает свойством самоподобия. Это означает, что независимо от того, насколько крупно или мелко рассматривается объект, его структура будет повторяться в меньшем масштабе. Однако, для реальных природных объектов, это свойство наблюдается лишь в определенном диапазоне масштабов.

Существует так называемый критический масштаб l , за пределами которого свойство самоподобия нарушается. Таким образом, для анализа фрактальных свойств материала необходимо ограничить исследование диапазоном масштабов, в котором самоподобие проявляется наиболее отчетливо (4.4):

$$l_{\min} \leq l \leq l_{\max}, \quad (4.4)$$

где $l_{\min}$ - минимальный масштаб анализа, $l_{\max}$ - максимальный масштаб анализа.

На каждом уровне масштабирования в результате исследования выявляются новые

особенности структуры материала, которые характеризуют его различные свойства. Следовательно, для определения фрактальной размерности зеренной структуры композитного материала, необходимо сначала установить интервал масштабов, в пределах которого сохраняется самоподобие фрактального множества. На следующем этапе в пределах этого интервала выбирается подходящий масштаб, при котором вычисление фрактальной размерности множества будет наиболее точным.

Для определения подходящего масштаба представления фрактала эмпирически выбирается шаг изменения масштаба, который обозначим как Δl , в диапазоне изменения масштаба от минимального $l_{\min}$ до максимального $l_{\max}$. В пределах этого интервала (4.5) определяются численные значения фрактальных размерностей исследуемого множества для каждого масштаба:

$$l_{\min} + (l_{\min} + \Delta l) + (l_{\min} + 2 \cdot \Delta l) + \dots + (l_{\min} + n \cdot \Delta l), \quad (4.5)$$

где $n = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{\Delta l}$.

За подходящий масштаб будет выбираться такой масштаб представления исследуемой структуры, при котором численные значения фрактальных размерностей, вычисленные как минимум двух соседних точек из рассматриваемого ряда масштабов (4.5), минимально различаются. Это будет свидетельствовать о наиболее точном соблюдении свойства самоподобия фрактальной структуры.

На Рисунке 4.5 приведен расчёт подходящего масштаба представления структуры базальтопластиковых волокон D_f и эпоксидной составляющей D_t в диапазоне от 30 до 300 мкм.

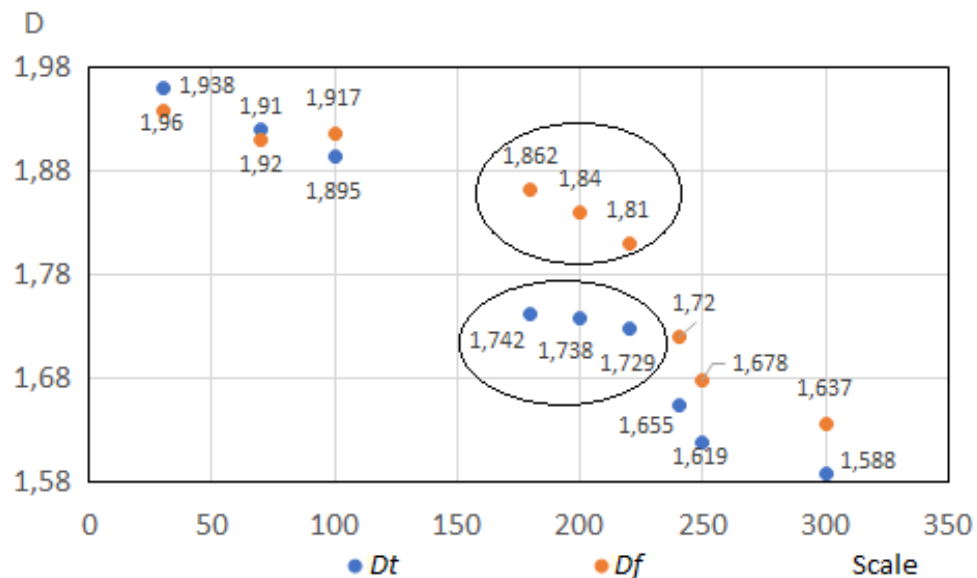


Рисунок 4.5 - Поиск подходящего масштаба представления структуры гибридных стеклобазальтопластиковых труб

Визуальный анализ свидетельствует о том, что самоподобие микроструктуры сохраняется в интервале масштабов от 30 до 300 мкм. За подходящий масштаб представления был выбран масштаб 200 мкм, поскольку в двух соседних масштабах 180 мкм и 220 мкм фрактальные размерности базальтовых волокон минимально различались между собой: 1.862 и 1.810 соответственно (Рисунок 4.5). Для фрактальной размерности эпоксидной составляющей D_t численные значения составили 1.742 при масштабе представления 180 мкм и 1.729 – при масштабе 220 мкм.

Самоподобие структурных элементов стеклобазальтопластиковых труб можно проверить не только визуально, но и аналитически. С этой целью можно выбрать одну или несколько характерных геометрических участков или фигур на фотоснимке микроструктуры и оценить их геометрическое подобие. На Рисунке 4.6 рассмотрен участок структуры А.

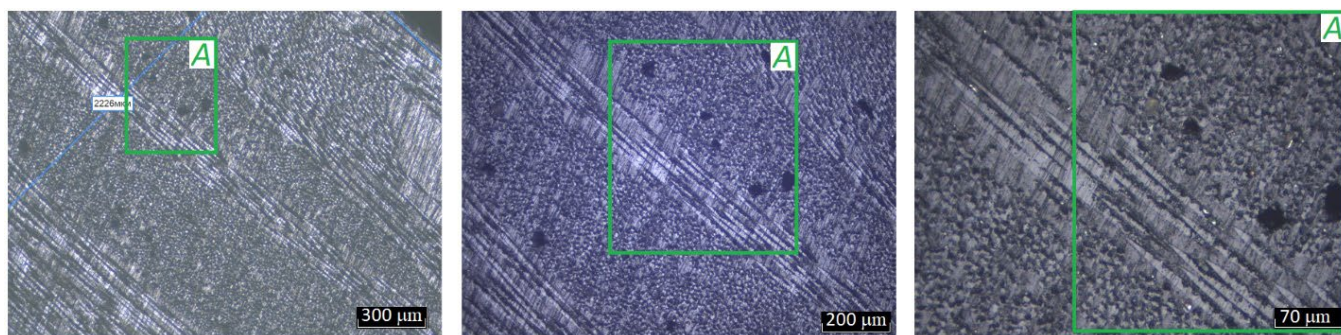


Рисунок 4.6 - Оценка областей самоподобия структуры гибридных стеклобазальтопластиковых труб

Соотношение линейных размеров границ данного участка и заключенных в нем элементов структуры сохраняется на всех рассмотренных масштабных уровнях, что таким образом подтверждает наличие самоподобия и, следовательно, фрактальности структуры стеклобазальтопластиковых труб.

Структура композитных материалов часто характеризуется неоднородностью, которая обусловлена изменениями количественного состава элементов в различных участках. Эти изменения могут быть следствием процессов формирования структуры, различных видов обработки или пластической деформации, что приводит к изменениям конфигурации структурных элементов. В результате разные участки структуры приобретают свои характерные особенности. На подготовленных образцах для микроисследований участки неоднородности заметно отличаются от других областей структуры цветом, что указывает на различия в их химическом составе и свойствах.

С точки зрения фрактальной геометрии наблюдается несоответствие вероятностей заполнения пространства геометрическими размерами соответствующих областей. Это особенно

выражено в композитах и металлах на различных масштабных уровнях. При этом фрактальная размерность структурных составляющих, имеющих схожую геометрическую конфигурацию, может быть одинаковой, несмотря на значительные различия в их составе и свойствах. Следовательно, вместе с геометрическими показателями, оцениваемыми фрактальной размерностью D , подобные фрактальные множества имеют и специфические статистические характеристики.

При оценке корреляции между фрактальной размерностью структуры материала с его критериями качества могут возникнуть сложности, обусловленные оценкой неоднородных фрактальных объектов. Данный аспект касается не только композитов, но и металлов и сплавов на их основе, поскольку они тоже характеризуются неоднородностью структуры. В аналогичных случаях структура может характеризоваться спектром фрактальных размерностей, потому что подобные материалы могут располагать и геометрическими, и статистическими свойствами.

Сложность идентификации реальных структур связана с тем, что оценка фрактальной размерности осуществляется с некоторой степенью приближения. В итоге вместо детерминированной модели часто приходится применять вероятностную модель оценки фрактальной размерности. В контексте рассмотренного неоднородную структуру, которая формируется за счет присутствия различных фаз либо структурных компонентов, каждому из которых присуща собственная фрактальная размерность, следует описывать с помощью мультифрактального подхода. В спектр фрактальных размерностей могут входить размерности всех структурных составляющих, например, композитные матрицы, фазы, включения и т.д.

Данное определение мультифрактала согласуется с общепринятыми фрактальными основами, поскольку при мультифрактальном исследовании спектр статистических размерностей $D(q)$ (4.1) обычно меняется в зависимости от значения показателя степени q , принимающему численные значения в широком интервале от $-\infty$ до $+\infty$, который назначается исследователем эвристическим путем. В соответствии с этим, в данном интервале могут исследоваться любые элементы структуры, принимающие участие в генерации спектра размерностей [132].

Спектр размерностей в уравнении (4.1) обозначим через $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$, в котором каждая размерность имеет свой физический смысл:

- D_0 — фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича при $q = 0$, характерная для однородного фрактала.
- D_1 — информационная размерность из мультифрактального спектра $D(q)$ при показателе степени q равным 1, описывающая скорость роста информации (информационная энтропия). Размерность D_1 характеризует возрастание количества информации, которое необходимо для оценки местоположения точки (пикселя для ЭВМ) на рассматриваемом фрактальном

множестве (в данном случае, структуре) при стремлении размера ячейки $\delta \rightarrow 0$:

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} P_i \cdot \ln p_i}{\ln \delta}. \quad (4.6)$$

- D_2 — корреляционная размерность из мультифрактального спектра $D(q)$ при показателе степени q равным 2, которая описывает вероятность нахождения двух точек в одной ячейке сетки покрытия фрактального множества:

$$D_2 = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} P_i \cdot \ln p_i^2}{\ln \delta}. \quad (4.7)$$

- D_∞ — размерность из мультифрактального спектра $D(q)$ при показателе степени q равным ∞ , характеризующая наиболее разреженные области фрактального множества.
- $D_{-\infty}$ — размерность из мультифрактального спектра $D(q)$ при показателе степени q равным $-\infty$, характеризующая наиболее концентрированные области фрактального множества.

Эти предельные значения обозначаются как $D_{\min} = D_\infty$ и $D_{\max} = D_{-\infty}$.

Оценка обобщенных фрактальных размерностей $D(q)$ структурных составляющих исследуемых композитных материалов осуществлялась с привлечением разработанного алгоритма, базирующегося на основе мультифрактального подхода [136]. В основе данного алгоритма положена генерация меры, которая заключается в разбиении пространства, в котором находится объект исследования (носитель меры), на отрезки, квадраты либо окружности, кубики либо окружности размером δ . Для осуществления предложенного алгоритма использовался разработанный программный продукт.

Алгоритм основан на закономерностях (4.8) - (4.10) и состоит из следующих этапов:

Этап 1. Генерация меры выполнялась по светлым и темным областям исследуемой структуры композита. Использовалось 100% покрытие площади фотоснимка структуры квадратными ячейками.

Этап 2. Рассчитывалась обобщенная статистическая сумма $Z(q, \delta)$, описывающая распределения вероятностей по всем точкам фрактального множества. Статистическая сумма оценивалась по следующему соотношению:

$$Z(q, \delta) = \sum_{i=1}^N p_i^q \propto \delta^{-\tau(q)}, \quad (4.8)$$

где p_i — вероятность нахождения точки объекта в i -ой ячейке квадратной сетки с линейным размером δ , а показатель степени q может принимать значения в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$. В

данном исследовании q варьировался в пределах от $q_{\min} = -200$ до $q_{\max} = 200$.

Этап 3. Массовый показатель степени $\tau(q)$ (4.9) вычисляется путем аппроксимации $\log Z(q, \varepsilon) - \log \varepsilon$. Его физический смысл заключается в плотности заполнения исследуемой структуры светлыми либо темными точками (пикселями):

$$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln Z(q, \delta)}{\ln \delta}. \quad (4.9)$$

Этап 4. Для оценки неоднородности структурных составляющих использовался канонический спектр сингулярностей $f(a)$ [136]. Данный спектр представляет собой набор фрактальных размерностей однородных подмножеств исследуемого множества, дающих наибольший вклад в статистическую сумму $Z(q, \delta)$ (4.8) при заданных значениях степени q . Спектр сингулярностей описывается одинаковыми вероятностями заселенности точками ячеек $p_i(\delta) \approx \delta^\alpha$. Для структурной составляющей на микрофотоснимке спектр $f(a)$ определяли с использованием преобразований Лежандра функции $\tau(q)$ согласно уравнениям (4.7):

$$\begin{cases} \alpha = \frac{d\tau}{dq}, \\ f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \end{cases} \quad (4.10)$$

При вычислении спектра $f(a)$ исследуемую структуру покрывали квадратной сеткой и и проводили расчет размерностных оценок D_{-200} и D_{200} (Рисунок 4.7).

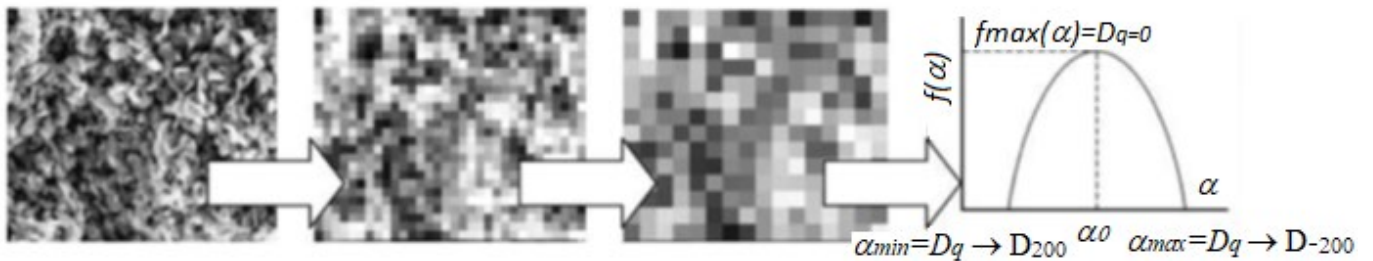


Рисунок 4.7 - Пример исходной микрофотографии и последовательность ее цифровой обработки для мультифрактального анализа

Этап 5. При оценке канонического спектра $f(a)$ рассчитывались следующие статистические характеристики структуры:

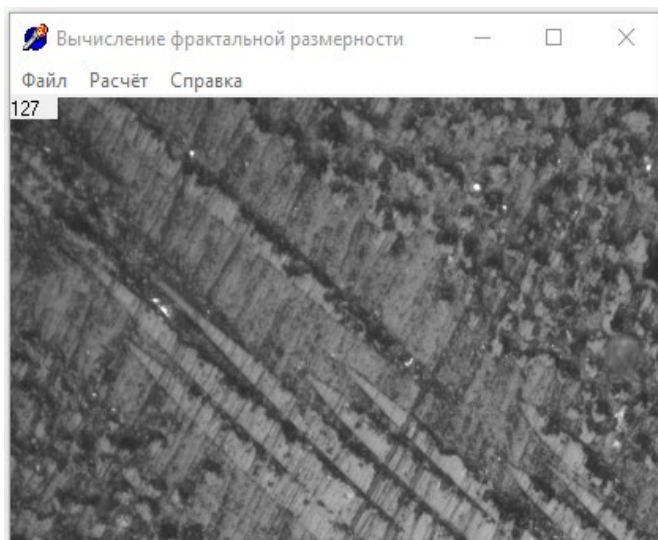
- **Однородность.** Это параметр, определяющий локальную дефектность структурных элементов, шероховатость либо пористость. Степень однородности определяется численным значением функции $f(a)$ при показателе степени $q = 200$. Возрастание $f(a)$ указывает на

повышение однородности структуры. Если структура является однородной, то спектр сингулярностей $f(a)$ вырождается в точку. Неоднородность структуры описывает неравномерное распределение точек (пикселей) по областям структуры, когда геометрически одинаковые элементы структуры содержат точки с различной вероятностью.

• **Упорядоченность и регулярность.** Данные параметры определяют степень нарушения симметрии структуры или степень неравновесности системы. Упорядоченность характеризуется разностью $\Delta = f(a)_{q=1} - f(a)_{q=200}$, где возрастание показателя Δ указывает на наличие скрытой периодичности и упорядоченности структуры. Регулярность описывается как $K = f(a)_{q=-200} - f(a)_{q=200}$, где возрастание показателя K указывает на присутствие периодических составляющих (повторяющихся структурных элементов одной фазы) и на возрастание степени упорядоченности фрактальной структуры.

Следовательно, для установления принадлежности исследуемой структуры к мультифракталам, необходимо определить спектр ее статистических размерностей по формуле (4.1).

На Рисунке 4.8 (а) приведена микроструктура гибридных стеклобазальтопластиковых труб, а на Рисунке 4.8 (б) представлен спектр обобщенных статистических размерностей Реньи данной структуры, рассчитанной по формуле (4.1) в интервале значений $-200 < q < 200$ (Таблица 4.1).



а



б

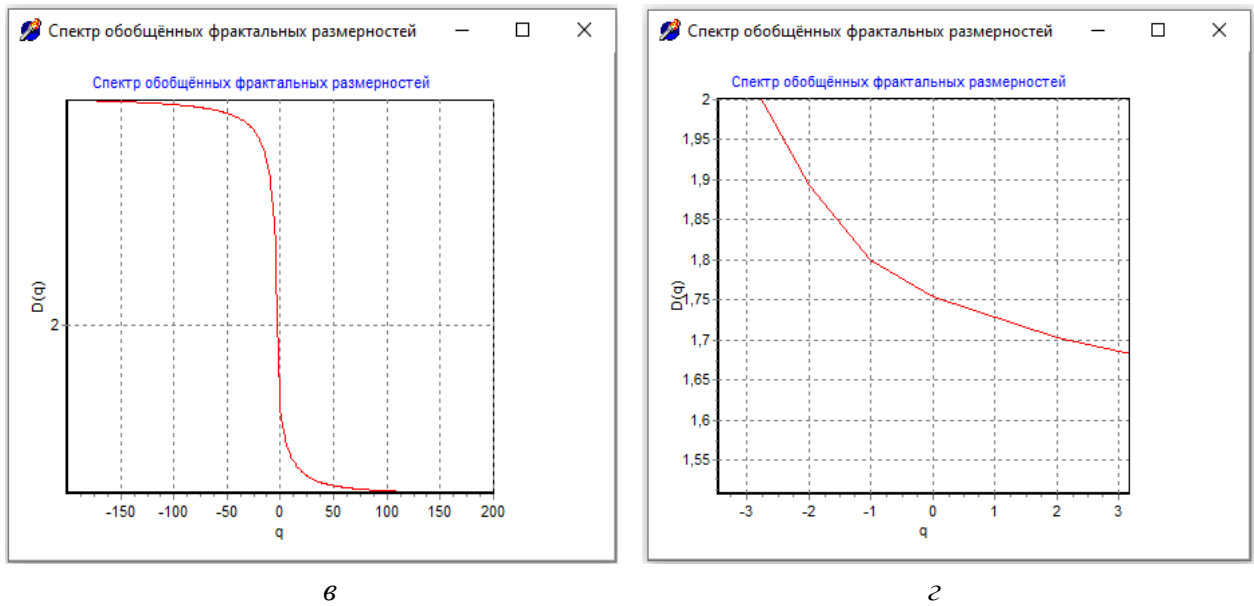


Рисунок 4.8 – а – микроструктура гибридных стеклобазальтопластиковых труб; б – выбор оттенков цвета структурного элемента для оценки спектра статистических размерностей; в – спектр фрактальных размерностей при показателях степени $-200 < q < 200$, г – фрагмент спектра размерностей на интервале $-3 < q < 3$

Таблица 4.1 - Спектр статистических размерностей микроструктуры (получен из Рисунок 4.8 а)

Размерность максимальной разреженности структурных элементов, D_{200}	Корреляционная размерность, D_2	Информационная размерность, D_1	Фрактальная размерность, D_0	Размерность максимальной концентрации структурных элементов, D_{-200}
1.500	1.704	1.729	1.751	2.670

Физическое значение приведенного примера заключается в следующем: размерность, соответствующая максимальной разреженности мультифрактального множества, относится к углеродным волокнам, представленным светлыми участками на фотоснимке (Рисунок 4.8а). В то же время, размерность, соответствующая наибольшей концентрации, относится к эпоксидной составляющей, изображенной темными участками на том же фотоснимке.

Статистические характеристики углеродных волокон были вычислены на основе анализа спектра $f(a)$ (Рисунок 4.8 б). Упорядоченность составила $\Delta_{\text{углер.волокон}} = 1.729 - 1.500 = 0.229$, а регулярность равна: $K_{\text{углер.волокон}} = 2.670 - 1.500 = 1.170$.

На Рисунок 4.9 приведены примеры функции $f(a)$ для фотоснимков структуры стеклобазальтопластиковых труб, показанных на Рисунок 4.6. Анализ спектра $f(a)$ (Рисунок 4.9 б) для углеродных волокон в этих образцах дал следующие результаты: для образца 1 показатели однородности составили $f_{\text{углер.волокон}} = 0.16$, для образца 2 – $f_{\text{углер.волокон}} = 0$, для образца 3 – $f_{\text{углер.волокон}} = 0.05$, для образца 4 – $f_{\text{углер.волокон}} = 0.37$.

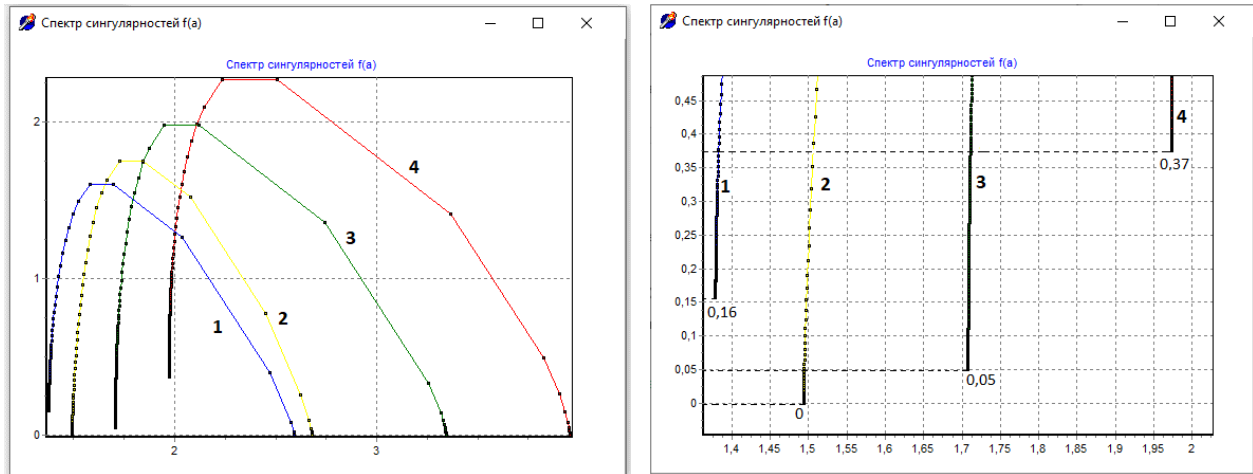


Рисунок 4.9 - Общий вид функций $f(a)$ для фотоснимков структуры образцов 1-4 из стеклобазальтопластиковых труб, приведенных на рис.3.1 (а); увеличенный фрагмент участка $f(a)$ (б)

Результаты анализа структуры гибридных стеклобазальтопластиковых труб, представленные на Рисунке 4.9, указывают на ее неоднородность, особенно в отношении светлых волокон матрицы труб. Эта неоднородность количественно подтверждается значениями фрактальных размерностей спектра Реньи, которые варьируются от 1.500 до 2.670 в интервале $-200 < q < 200$. Графики, показанные на Рисунке 4.9, также демонстрируют эти изменения, что подтверждает принадлежность исследуемых структур к мультифракталам.

4.4 Установление чувствительности между структурой и свойствами труб

На начальном этапе исследования определяется насколько фрактальная размерность материала связана с его характеристиками, которые необходимо идентифицировать. Фрактальная размерность может изменяться в очень узком диапазоне, что может снизить ее чувствительность к изменениям характеристик материала.

Для количественной оценки этой связи был использован критерий чувствительности K_i . Этот критерий показывает, насколько сильно изменение фрактальной размерности влияет на изменения исследуемых характеристик материала. Для определения чувствительности между фрактальной размерностью и выбранными переменными была использована математическая модель фрактального типа (4.2):

Результаты расчета показателей чувствительности K между фрактальной размерностью эпоксидной матрицы, базальтовыми волокнами труб и их механическими характеристиками приведены на Рисунках 4.10 и 4.11.

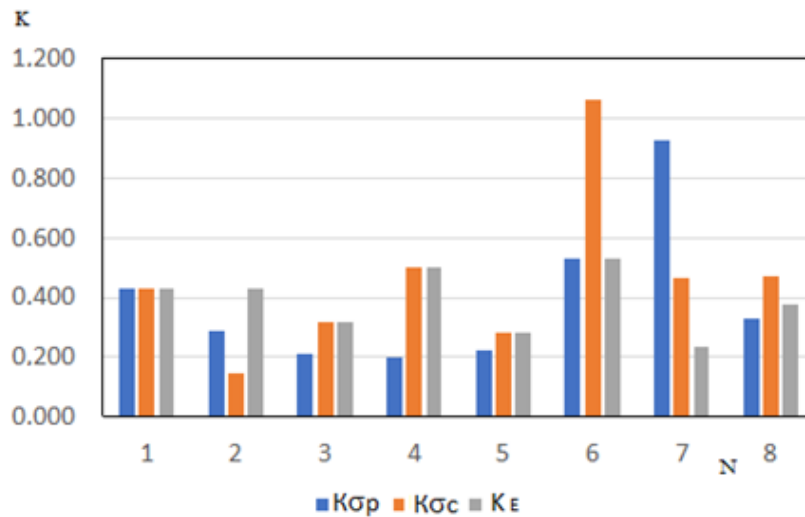


Рисунок 4.10 - Коэффициенты чувствительности между пределом прочности на растяжение $K_{\sigma p}$, сжатие $K_{\sigma c}$, модулем упругости K_E и фрактальной размерностью эпоксидной составляющей D_f

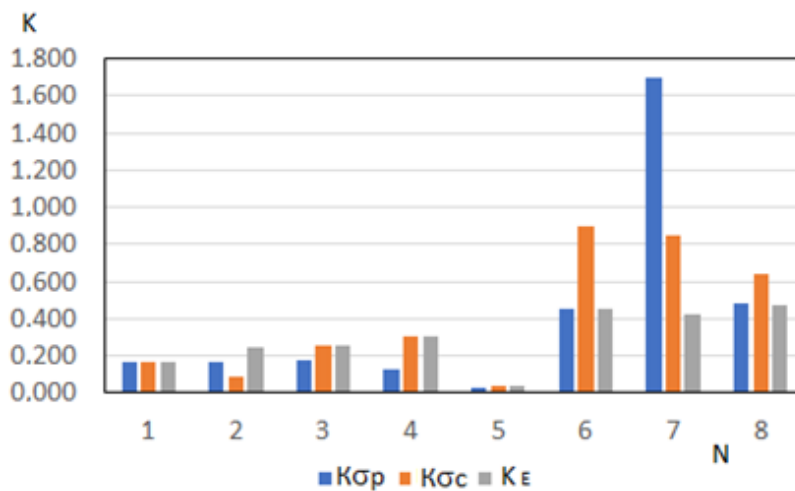


Рисунок 4.11 - Коэффициенты чувствительности между пределом прочности на растяжение $K_{\sigma p}$, сжатие $K_{\sigma c}$, модулем упругости K_E и фрактальной размерностью стеклобазальтовых волокон D_f

Коэффициенты чувствительности между фрактальной размерностью эпоксидной составляющей гибридных стеклобазальтопластиковых труб и их механическими свойствами варьировались в диапазоне от 0.143 до 1.065, где наибольшее значение наблюдалось для прочности на сжатие. Для фрактальной размерности светлых волокон диапазон изменялся от 0.083 (прочность на сжатие) до 1.700 (прочность на растяжение). Этот подход позволил формализовать взаимосвязи между наиболее чувствительными механическими свойствами труб и фрактальными размерностями конкретных элементов микроструктуры.

Таким образом, предложенный метод вычисления коэффициентов чувствительности позволяет отсеивать малочувствительные параметры и эффективно прогнозировать механические свойства гибридных стеклобазальтопластиковых труб, опираясь на наиболее чувствительные

показатели и обеспечивая быструю оценку.

На Рисунке 4.12 приведен пример расчета спектра фрактальных размерностей Реньи для Образца 7, представленного на Рисунке 4.6. Показатель степени q варьировался от -200 до 200 , так как при более широком диапазоне (от -1000 до 1000) значения фрактальных размерностей изменялись незначительно (на 4-6%). Граничные размеры ячеек были установлены в диапазоне от 20 до 60 пикселей с шагом 5 пикселей (Рисунок 4.12 б).

Спектры рассчитывались для различных размеров ячеек: 60 пикселей (спектр 1), 55 пикселей (спектр 2), 50 пикселей (спектр 3), 45 пикселей (спектр 4), 40 пикселей (спектр 5), 35 пикселей (спектр 6), 30 пикселей (спектр 7) и 25 пикселей (спектр 8). Для дальнейших расчетов фрактальных размерностей был выбран спектр 6 с размером ячейки 50 пикселей, что соответствует линейным размерам элементов структуры (волокон матрицы и компонентам эпоксидной составляющей).

Рисунок 4.12 показывает график распределения цвета в 256 градациях серого для фотоснимка образца 7, где также представлены распределения цвета в серых градациях для всех восьми фотоснимков микроструктуры труб. После этой процедуры задавался диапазон цвета в градациях серого для исследуемой структурной составляющей, как показано на Рисунке 4.13.

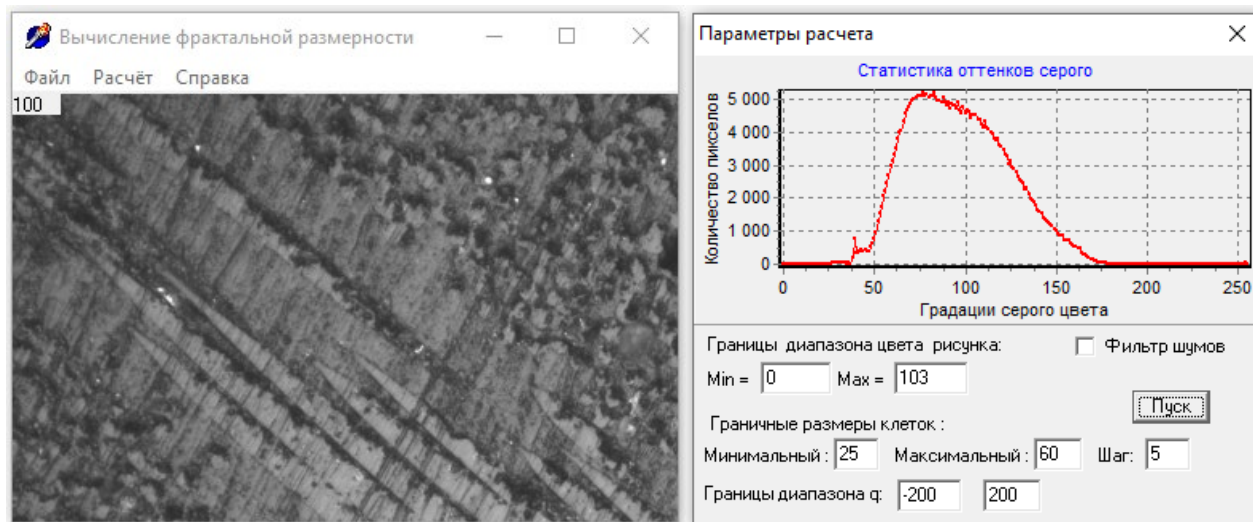


Рисунок 4.12 - График распределения цвета в 256 градациях серого для фотоснимка Образца 7

Рисунок 4.13 демонстрирует спектр фрактальных размерностей Реньи для светлых волокон матрицы Образца 7.

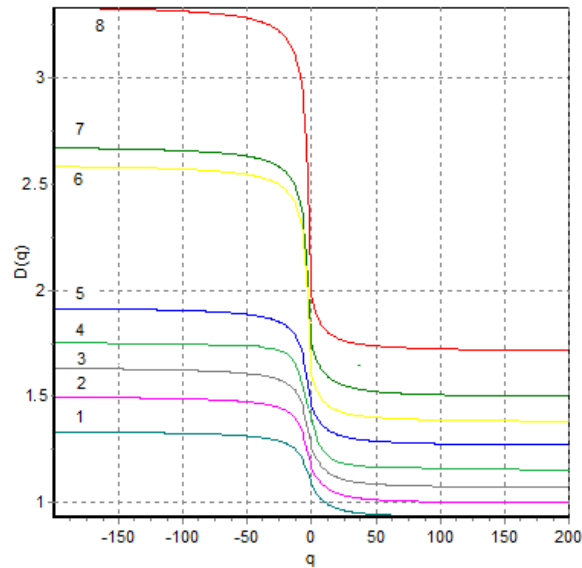


Рисунок 4.13 - Спектр фрактальных размерностей Реньи для светлых волокон матрицы Образца 7

Для анализа микроструктуры труб, распределение цвета в 256 градациях серого было проведено для каждого образца. После этого был установлен диапазон градаций серого для исследуемой структурной составляющей, как показано на Рисунке 4.12.

В рамках мультифрактального анализа микроструктуры труб была проведена оценка спектра статистических размерностей Реньи. Результаты этого анализа представлены в Таблице 4.2, которая отображает основные данные эксперимента, включая фрактальные размерности и характеристики прочности на растяжение.

Таблица 4.2 - Спектр размерностей структуры и показатели предела прочности на растяжение в окружном направлении σ_p

Образец №	D_{-200}	D_0	D_1	D_2	D_{200}	σ_p , МПа
1	3.200	1.922	1.900	1.879	1.705	460
2	2.885	1.905	1.880	1.860	1.690	450
3	2.830	1.880	1.855	1.840	1.660	435
4	2.525	1.854	1.830	1.810	1.620	420
5	2.334	1.823	1.799	1.770	1.600	395
6	2.400	1.830	1.805	1.780	1.610	370
7	2.670	1.740	1.720	1.680	1.500	350
8	2.580	1.605	1.581	1.558	1.385	345

Для оценки влияния спектра фрактальных размерностей Реньи на прочность при растяжении был рассчитан коэффициент чувствительности K_i по формуле (4.2). Результаты анализа коэффициентов чувствительности для труб представлены на Рисунке 4.14.

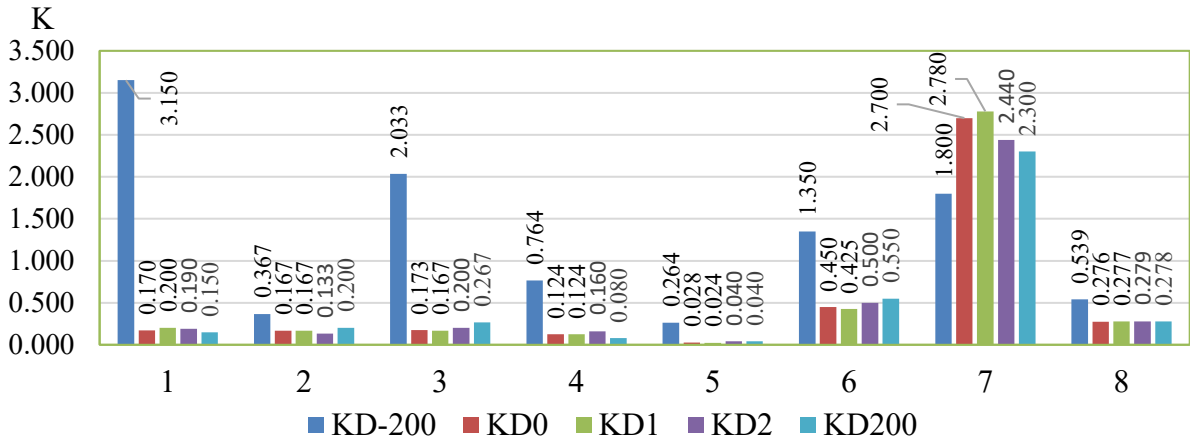


Рисунок 4.14 - Ранжирование фрактальных размерностей по степени их влияния на прочность при растяжении.

Высокие показатели чувствительности прочности были зафиксированы для фрактальных размерностей D_{200} образцов. В то же время, для других образцов показатели чувствительности прочности к фрактальным размерностям варьировались следующим образом: 0.033...0.367 для D_0 ; 0.100...2.033 для D_1 ; 0.044...0.768 для D_2 ; 0.016...0.264 для D_{200} .

Численные значения неоднородности для волокон матрицы f_{200} ($\alpha_{\min}=D_q \rightarrow D_{200}$) изменяются в более широком диапазоне 0.06...0.63 (Рисунок 4.15 а), по сравнению с неоднородностью эпоксидной составляющей f_{200} ($\alpha_{\max}=D_q \rightarrow D_{200}$), которая изменяется от 0.17 до 0.44 (Рисунок 4.15 б).

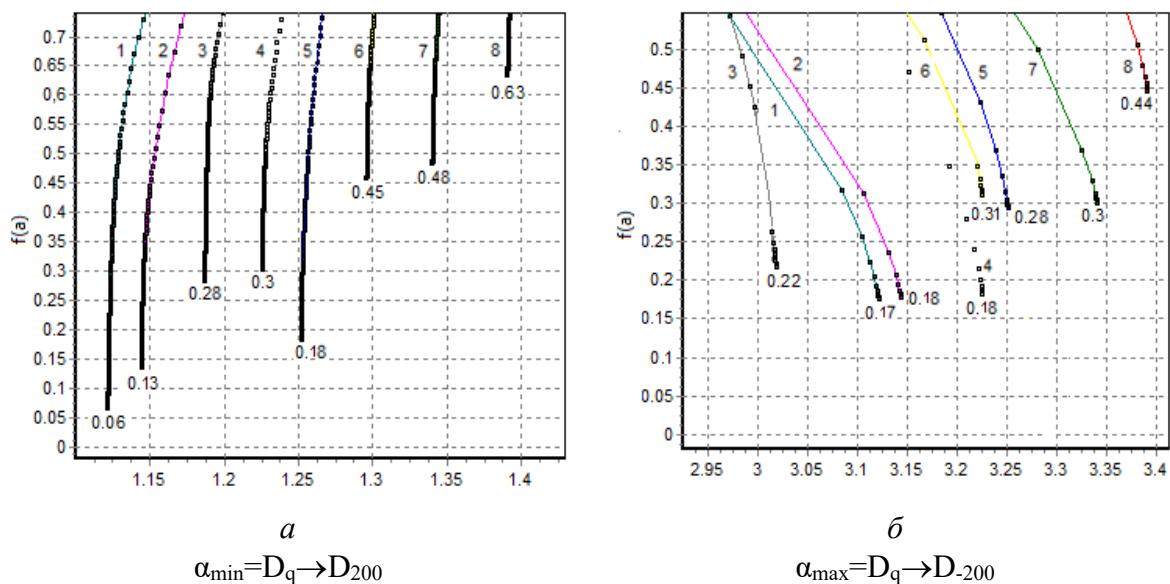


Рисунок 4.15 - Участки спектра сингулярностей $f(\alpha)$, вычисленные для волокон матрицы f_{200} ($\alpha_{\min}=D_q \rightarrow D_{200}$) и эпоксидной составляющей f_{200} ($\alpha_{\max}=D_q \rightarrow D_{200}$)

Для анализа влияния спектра фрактальных размерностей Реньи на показатели прочности на

сжатие вычислялись коэффициенты чувствительности K_i между данными характеристиками по формуле (4.2). Результаты анализа коэффициентов чувствительности приведены на Рисунке 4.16.

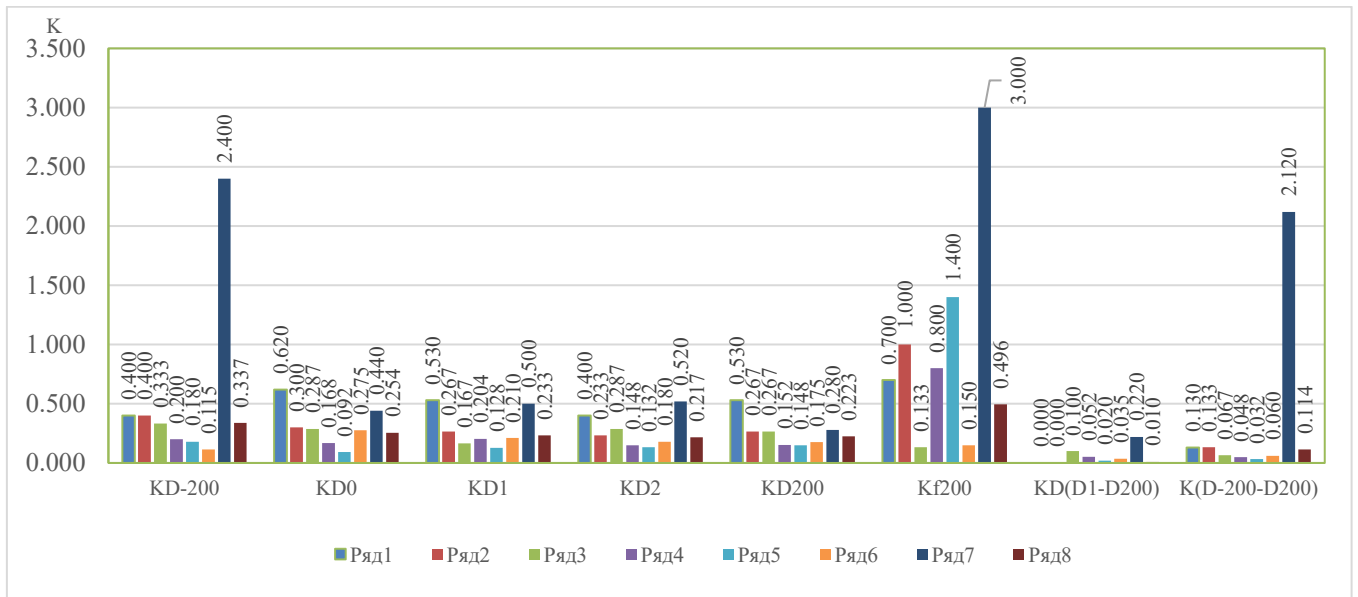


Рисунок 4.16 - Коэффициенты чувствительности прочности на сжатие исследуемых труб к фрактальным размерностям и показателям неоднородности их микроструктуры

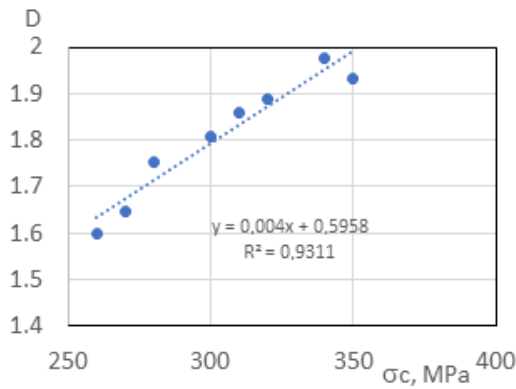
Показатели чувствительности прочности на сжатие к фрактальным размерностям структуры труб для образца 7 оказались наивысшими среди всех исследованных образцов. Конкретные значения составили: 2.400 для D_{200} ; 0.440 для D_0 ; 0.500 для D_1 ; 0.520 для D_2 ; 0.280 для D_{200} .

Показатели неоднородности для образца 7 также достигли максимальных значений в сравнение с другими образцами: 3.000 для K_{f-200} ; 0.220 для $K_{D(D1-D200)}$; 2.120 для $K_{D(D-200-D200)}$.

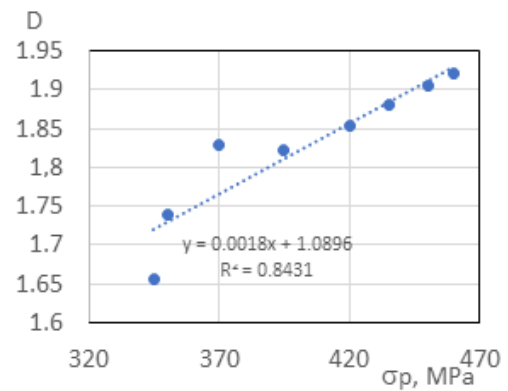
Высокие показатели чувствительности прочности можно объяснить тем, что изменения прочности вблизи реперной точки были минимальными, варьируясь от 2.6 до 2.7 МПа, в то время как фрактальные размерности изменялись до 4%. Эти небольшие колебания прочности при значительных изменениях размерностей указывают на высокую чувствительность образца 7 к фрактальным характеристикам.

4.5 Установление взаимосвязи между размерностными оценками структуры и механическими свойствами

Исследование показало, что прочность на сжатие и растяжение композитных материалов тесно связана с их фрактальной размерностью. На Рисунке 4.17 представлены модели, демонстрирующие эту взаимосвязь: прочность на сжатие коррелирует с фрактальной размерностью эпоксидной составляющей, а прочность на разрыв – с фрактальной размерностью стеклобазальтовых волокон.



a



б

Рисунок 4.17 - Соотношения между показателями прочности на сжатие $K_{\sigma c}$ и значениями фрактальной размерности эпоксидной составляющей (а), между показателями прочности на разрыв $K_{\sigma p}$ и фрактальной размерностью стеклобазальтовых волокон (б)

Дальнейший анализ (Рисунок 4.18) выявил высокую корреляцию между пределом упругости и фрактальной размерностью как эпоксидной составляющей, так и стеклобазальтовых волокон. Обнаруженная зависимость объясняется тем, что фрактальная структура имеет большую площадь поверхности, что способствует увеличению адгезии между компонентами композита и, как следствие, повышению его прочности.

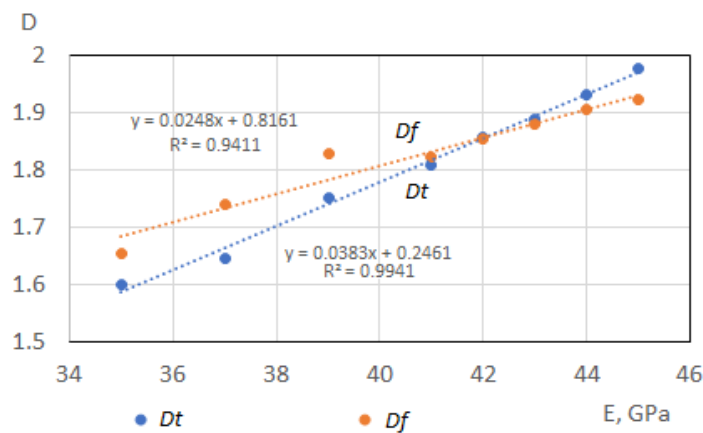


Рисунок 4.18 - Соотношения между пределом упругости E и фрактальными размерностями стеклобазальтовых волокон D_f и эпоксидной составляющей D_t

Композитные материалы с волокнистой структурой часто оцениваются с использованием теории фракталов. Установлено, что при увеличении фрактальной размерности волокнистой структуры с 1.69 до 1.88 прочность на разрыв возрастает с 190 до 290 МПа.

На Рисунок 4.19 размещены результаты влияния фрактальных размерностей на показатели модуля Юнга для стеклобазальтопластиковых труб. Аппроксимация экспериментальных результатов реализовывалась с использованием линейных моделей, а точность аппроксимации оценивалась по коэффициентам парной корреляции R^2 : D_0 (при показателе степени функции $q=0$)

0.95, для D_1 0.92, для D_2 0.90, для D_{200} 0.82, для D_{200} 0.94.

Несмотря на то, что коэффициент R^2 модели $E(f(\alpha))$, описывающей волокна матрицы, оказался ниже (0.68) по сравнению с остальными моделями, размерность D_{200} , характеризующая волокна матрицы, может использоваться для прогнозирования модуля Юнга с более высокой точностью. характеризующая волокна матрицы, может использоваться для прогнозирования модуля Юнга с высокой точностью. Размерность темных элементов структуры, соответствующих эпоксидной составляющей, описывается размерностью D_{200} .

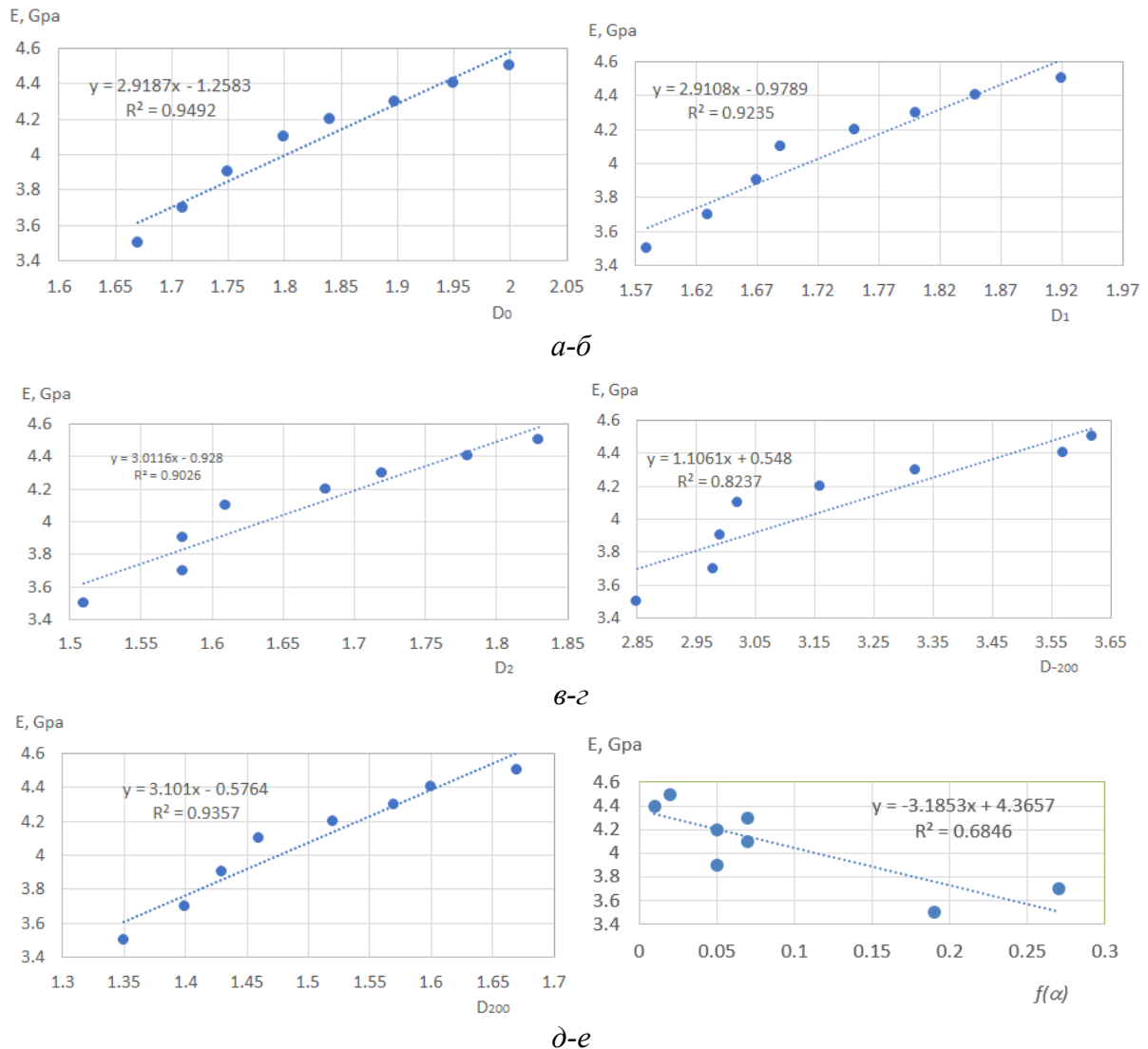


Рисунок 4.19 - Соотношения между модулем Юнга и показателями неоднородности базальтовых волокон матрицы

Анализ результатов подтверждает существование взаимно однозначного соответствия между фрактальной размерностью структурных элементов композитных труб, их неоднородностью и модулем Юнга, что открывает перспективы оперативного прогнозирования модуля упругости на основе анализа микроструктуры материала.

Наибольшая корреляция модуля упругости была обнаружена для размерности светлых включений (волокон матрицы) D_{200} ($R^2=0.94$) и размерности Хаусдорфа D_0 ($R^2=0.95$), что связано с их относительно высокими механическими свойствами: прочность на сжатие составляет 2.6...3.6 МПа, прочность на растяжение 3.4...4.6 МПа.

4.6 Выводы по главе 4

1. Предложена схема фрактального моделирования для композитных труб из стеклобазальтопластика и стеклопластика, которая открывает новые возможности для их структурного анализа и прогнозирования свойств.
2. Проведена оценка фрактальной размерности исследуемых композитных материалов.
3. Разработан метод выбора масштабов для оценки фрактальной размерности микроструктуры, обеспечивающая более точное измерение данных параметров.
4. Впервые установлена взаимосвязь между фрактальной размерностью элементов структуры гибридных стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб и их механическими свойствами, что позволяет прогнозировать данные свойства с относительной погрешностью 3-7% на основе анализа фрактальной размерности структуры.
5. Впервые выявлено влияние неоднородной структуры на механические свойства гибридных стеклобазальтопластиковых труб с использованием теории мультифракталов, что предоставляет возможность количественно оценить влияние мультифрактальных характеристик, таких как однородность, скрытая периодичность и регулярность, на механические свойства труб и прогнозировать их с точностью 3-7%.
6. Установлено, что все рассмотренные типы разрушения — хрупкое разрушение поверхностных слоёв, горизонтальное разрушение продольно направленных волокон, продольное разрушение поперечно ориентированных волокон и боковое разрушение слоёв, ориентированных под углом — имеют фрактальную природу и характеризуются соответствующими фрактальными размерностями.

Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ И ПРИЧИН ЕЕ РАЗРУШЕНИЯ

5.1 Фрактальный анализ зон разрушения полимерной трубы, армированной стекловолокном

Исследование фрактальной структуры зон разрушения полимерных труб, армированных стекловолокном, позволило выявить ряд характерных особенностей. При продольном сечении разрушенных образцов наблюдалось косое направленное внутрь материала разрушение (Рисунок 5.1). В зоне разрушения были обнаружены вытянутые волокна, указывающие на направление распространения трещины.

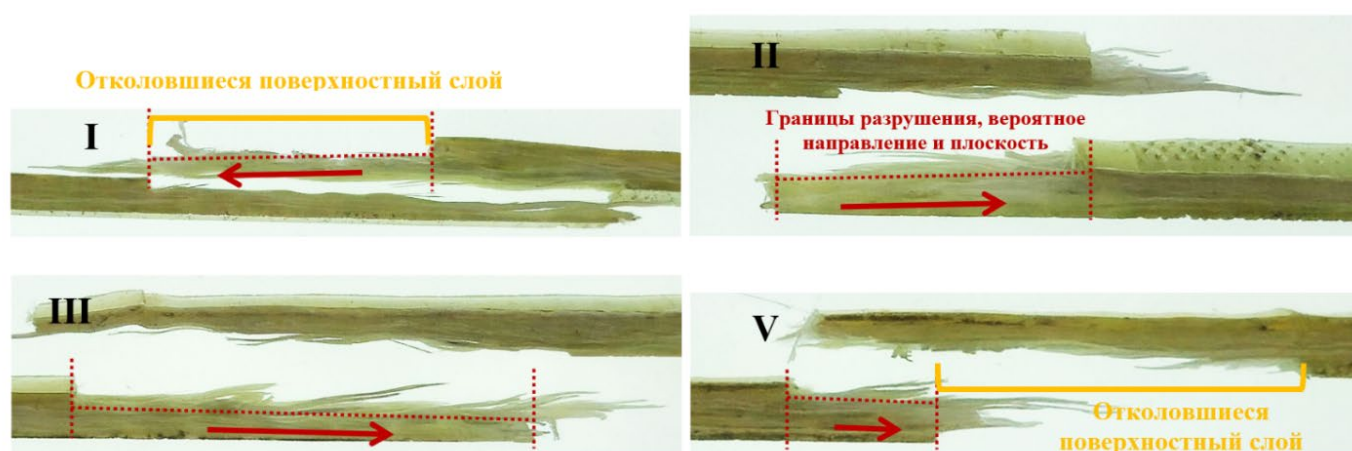


Рисунок 5.1 - Продольное сечение разрушенных образцов

На Рисунке 5.2 показано, что в поверхностных слоях стеклопластиковых труб происходит хрупкое горизонтальное разрушение. Также наблюдаются отслоения наполнителя от матрицы и вытянутые волокна. Анализ фрактальных размерностей в зоне начала разрушения и в неповрежденных областях показал снижение фрактальной размерности на ~13% с 1.903 до 1.677, что указывает на уменьшение плотности заполнения матрицы волокнами под воздействием растягивающей нагрузки.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что фрактальная размерность может служить индикатором структурных изменений, в данном случае выступая в роли регистратора зарождения и роста зон разрушения стеклопластиковых труб через фиксацию изменений их фрактальной размерности.

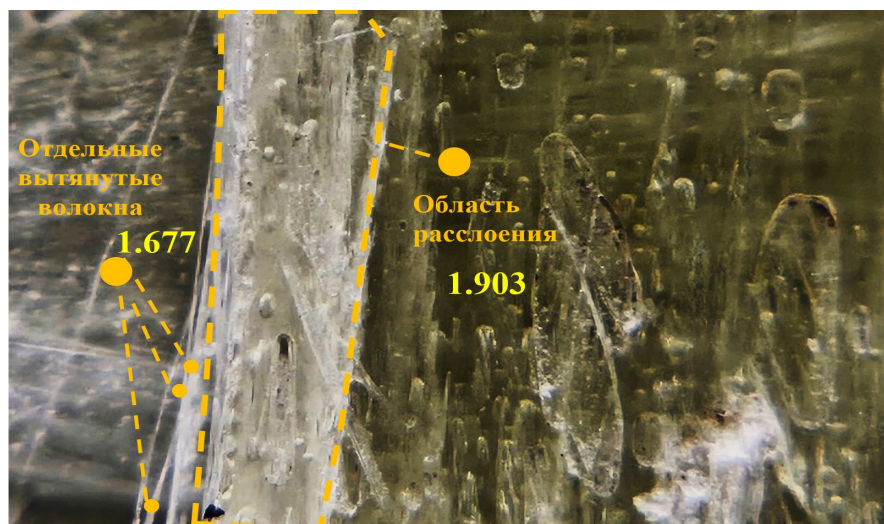


Рисунок 5.2 - Хрупкое горизонтальное разрушение внешних слоёв труб с внутренним диаметром ~70 мм

Внутренние слои пропитанной стеклоткани, ориентированные в поперечном направлении, имели продольные трещины, образованные в результате развития концентраторов напряжений при разрушении образца (Рисунок 5.2). На исходных образцах видимые трещины отсутствовали (Рисунок 5.3). Фрактальный анализ объёмных фотоснимков продольных трещин показал, что фрактальная размерность этих трещин составляет дробные величины 2.015 и 2.273, что подтверждает их фрактальную природу.

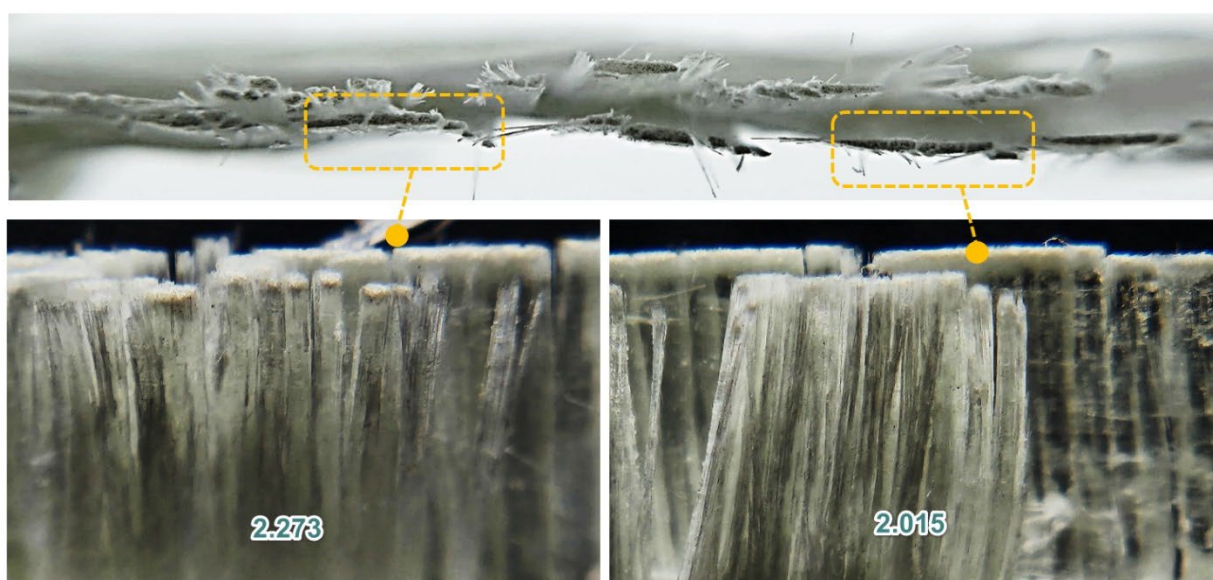


Рисунок 5.3 - Продольные трещины поперечно ориентированных слоёв

Характерными видами разрушения внутренних слоёв являлись «боковое» разрушение слоёв, направленных под углом, и горизонтальное разрушение продольно направленного армированного слоя (Рисунок 5.4).

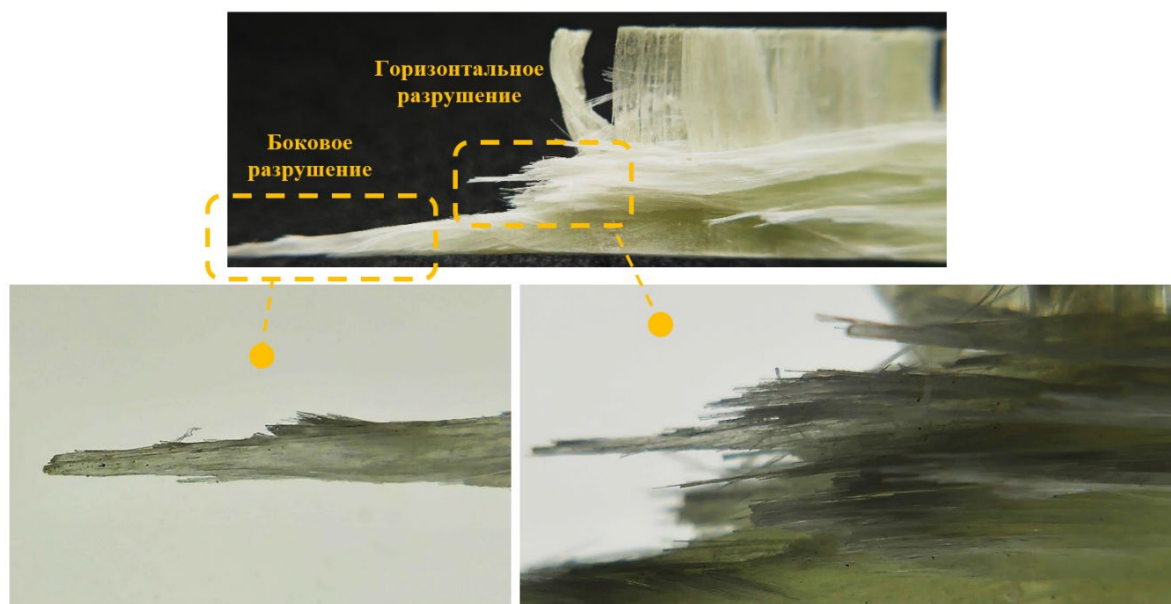


Рисунок 5.4 - Характер «бокового» и горизонтального разрушений внутренних слоёв

В зоне разрушения образца «V» отмечалось затемнение под поверхностным слоем вблизи области вырывания продольных волокон, являясь признаком отслоения от матрицы (Рисунок 5.5). Таким образом, участки засвеченных внутренних слоёв, обнаруженных на исходных образцах (Рисунок 5.5), могут являться потенциальными концентраторами напряжений. Неоднородность структуры темных и светлых участков фиксировалась с применением мультифрактального анализа с помощью формулы Реньи (4.1).

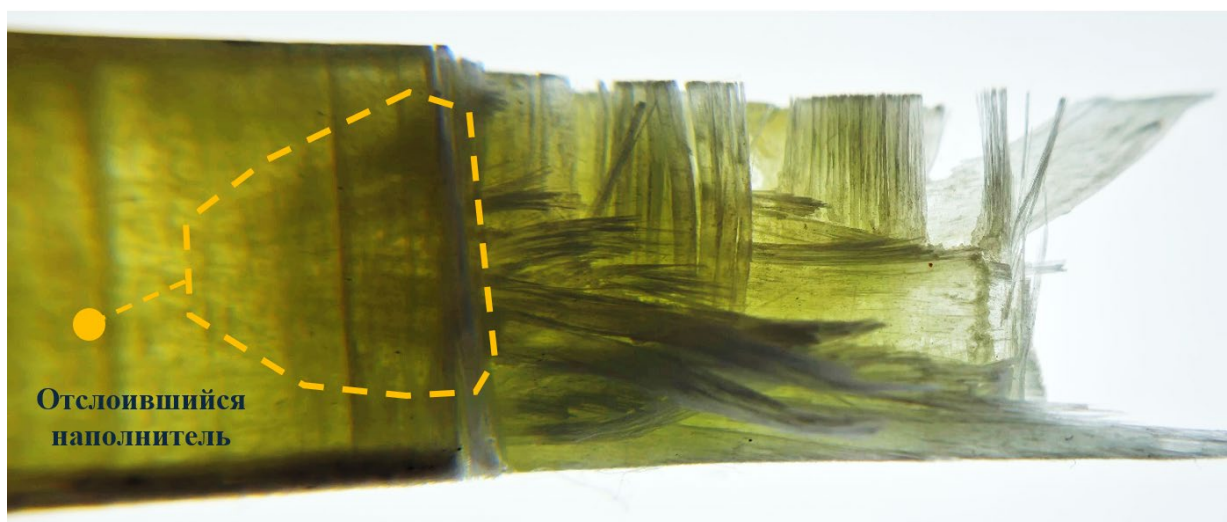


Рисунок 5.5 - Зона разрушения образца «V»

Спектр размерностей неоднородной структуры (Рисунок 5.5) приведен на Рисунке 5.6.

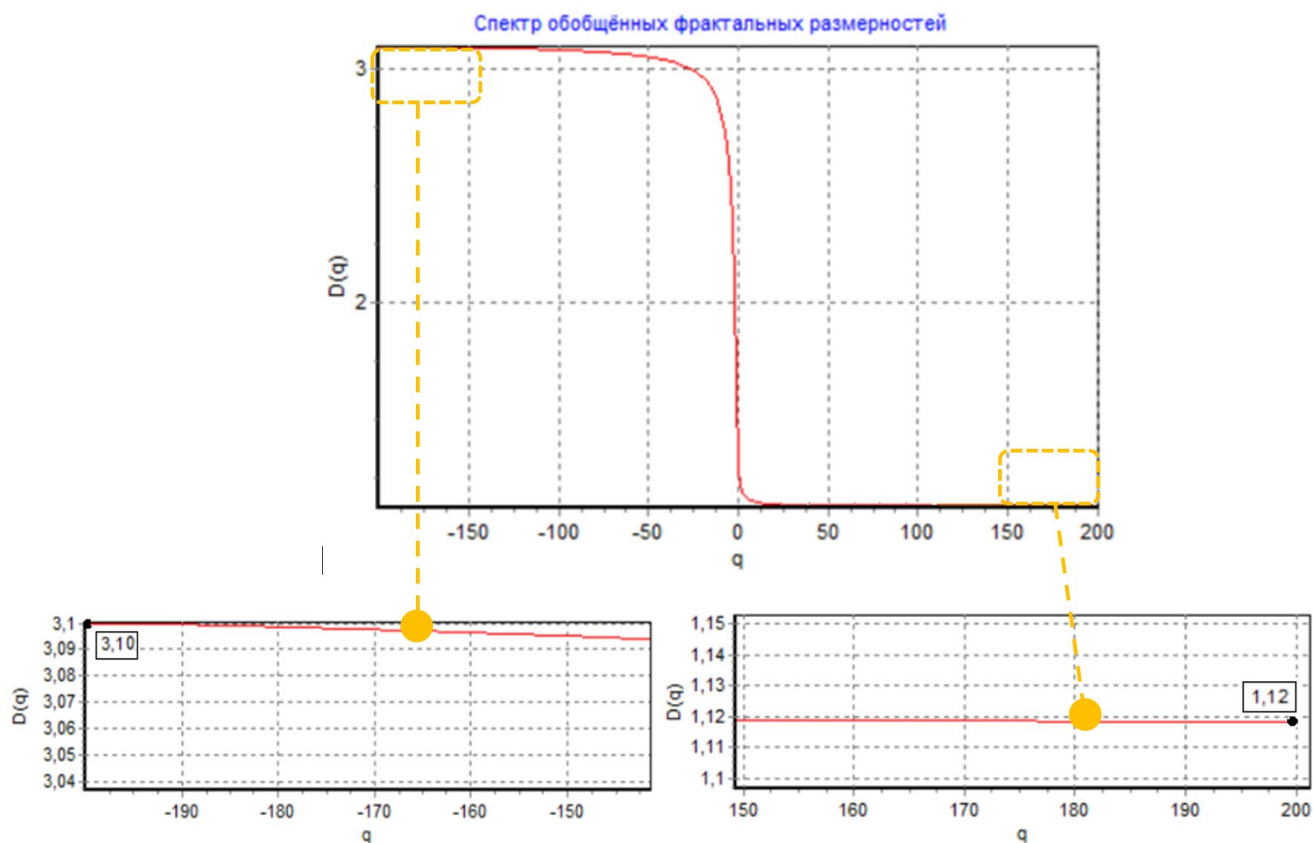


Рисунок 5.6 - Мультифрактальный спектр размерностей зоны разрушения образца «V»

Статистическая размерность $D_{-200} = 3.10$ характеризует размерность затемнённых областей отслоившегося наполнителя под поверхностным слоем вблизи области вырывания продольных волокон в зоне разрушения образца «V». Размерность светлых включений недеформированных областей матрицы стекловолокна составляет $D_{200} = 1.12$, что в 2.8 раза меньше, чем размерность участков потенциальной зоны разрушения. Анализ других исследуемых образцов показал, что отношения между показателями неоднородности D_{-200} и D_{200} составляют от 2.5 до 3.0.

5.2 Модель прогноза осевой прочности стеклопластиковых труб

Процессы разрушения материалов и зон разрушения могут успешно описываться с применением теории фракталов. В работе [146] отмечено, что на микроуровне профиль шероховатой трещины можно аппроксимировать фрактальным объектом, тогда как на макроуровне трещина имеет вид гладкого контура, что делает возможным использование классических подходов в механике разрушения с учётом фрактальной размерности как дополнительного параметра. Миклашевич [147] обосновывает положение, что разрушение на всех структурных уровнях имеет фрактальные свойства. Этот подход позволяет связать микро- и макроуровни и предоставляет возможность формализовать понятие структуры материала.

Разработка последовательной теории, которая в состоянии охарактеризовать сложное взаимодействие всех масштабных уровней композитных материалов в зонах их разрушения,

является одной из актуальных задач современной механики разрушения твёрдых тел. Следует отметить, что применение фрактальных структур и фрактальной размерности в качестве критерия, отражающего геометрическое строение материала, дает возможность применить методы механики сплошной среды, занимающейся изучением механического поведения изучаемого материала на макроуровне, на микроуровне.

Фрактальные оценки перспективно использовать для мониторинга структурного состояния и выявления зон разрушения труб из стеклопластика. В качестве критерия, отвечающего за геометрию деформационного рельефа, может выдвигаться его фрактальная размерность. В результате проведенного фрактального анализа зон разрушения исследуемых образцов труб установлено:

- для зон разрушения фрактальный коэффициент находится в диапазоне $3.0 > \frac{D_{200}}{D_{-200}} > 2.5$.
- для недеформированных однородных областей матрицы стекловолокна — коэффициент $2.0 > \frac{D_{200}}{D_{-200}}$.

Установлено, что все рассматриваемые типы разрушения — хрупкое разрушение поверхностных слоёв, горизонтальное разрушение продольно направленных волокон, продольное разрушение поперечно ориентированных волокон, боковое разрушение слоёв, ориентированных под углом — имеют фрактальную природу и характеризуются фрактальными размерностями.

Разработана модель прогноза осевой прочности стеклопластиковых труб (Рисунок 5.7).

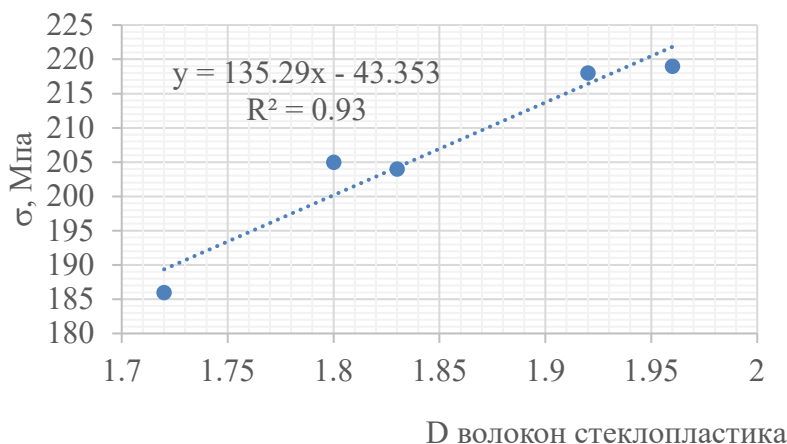


Рисунок 5.7 - Соотношение осевой прочности и фрактальной размерности стеклопластиковых труб

Математическая модель на Рисунке 5.7 имеет линейный вид и показатель парной корреляции $R^2 = 0.93$, что подтверждает существование взаимно однозначного соответствия между структурой стекловолокна и осевой прочностью.

Полученные результаты указывают на перспективы использования количественной оценки в виде фрактальных размерностей наряду с визуальной оценкой структуры зон разрушения труб из стеклопластика. Сложная геометрия трещин и других дефектов, ввиду иерархического строения, не всегда может быть адекватно оценена с помощью традиционных геометрических величин, таких как длина, площадь или объём.

5.3 Выводы по главе 5

1. Фрактальные оценки предложены для мониторинга структурного состояния и определения зон разрушения в стеклопластиковых трубах. Подтверждена целесообразность использования фрактальной размерности в качестве критерия, служащего для оценки геометрических особенностей деформационного рельефа. Мультифрактальный анализ зон разрушения показал:

- для зон разрушения образцов фрактальный коэффициент находится в диапазоне численных значений $3.0 > \frac{D_{200}}{D_{-200}} > 2.5$.

- для недеформированных однородных областей матрицы стекловолокна — коэффициент $2.0 > \frac{D_{200}}{D_{-200}}$.

2. Разработана математическая модель для прогнозирования осевой прочности стеклопластиковых труб на основании анализа их фрактальной размерности микроструктуры. Относительно высокий показатель коэффициента парной корреляции ($R^2 = 0.93$) свидетельствует о связи между структурой исследуемых композитов и их механическими характеристиками.

Глава 6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗА СВОЙСТВ СТЕКЛОБАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ

Согласно нормативной документации, технико-экономическое обоснование (ТЭО) – это документ, в котором представлена информация, обосновывающая экономическую целесообразность создания продукта или услуги. Иными словами, ТЭО содержит анализ затрат необходимых ресурсов для предполагаемых результатов какого-либо проекта.

В данной главе рассмотрена экономическая эффективность рассмотренного метода исходя из его аппаратной реализации, точность прогноза критериев качества исследуемых труб и калькуляция затрат на проведение физико-механических испытаний.

6.1 Структурная схема разработанного метода управления и прогноза свойств труб

В основу данной работы поставлена задача разработки научно обоснованного метода оперативной оценки механических характеристик изделий из стеклобазальтопластика. В рамках этой задачи осуществляется усовершенствование методов прогнозирования и управления характеристиками качества труб в процессе их производства. Применение симбиоза пассивных и активных экспериментов предоставляет возможность реализовывать прогноз механических свойств труб не только в пределах рабочей области, но и за её пределами, а также выявлять узкие диапазоны параметров, в которых можно ожидать повышенных значений рассматриваемых критериев качества.

Для решения обозначенной задачи предлагается использовать сочетание пассивных и активных экспериментов. В пассивном эксперименте применяются значения переменных, взятые из рабочей области, основанной на предшествующем опыте данной технологии. В активном эксперименте определяются верхние и нижние уровни переменных, полученных из пассивного эксперимента. Результаты могут быть прогнозированы с помощью допустимых прямых испытаний и экспертного логико-технологического анализа.

Предложенный метод управления и прогноза свойств стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов учитывает влияние параметров состава и структуры.

Структурная схема разработанного метода приведена на Рисунке 6.1.

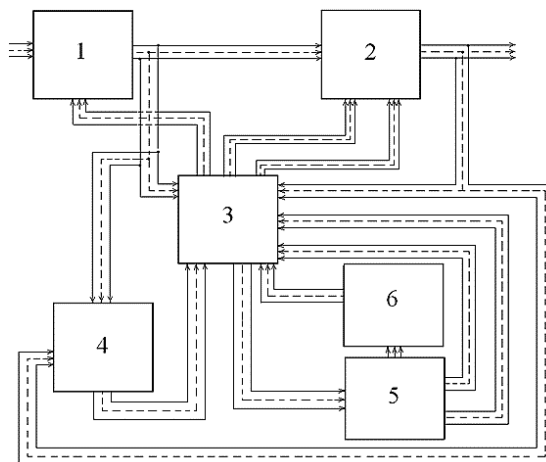


Рисунок 6.1 – Разработанная схема метода управления и прогноза свойств стеклобазальтопластиковых труб

Схема включает в себя следующие компоненты:

- Исполнительный орган (Блок 1).
- Объект управления (Блок 2).
- Лицо, принимающее решения (ЛПР) (Блок 3).
- Блок пассивного эксперимента (Блок 4).
- Блок активного эксперимента (Блок 5).
- Блок логического анализа влияния переменных элементов на конечный результат (Блок 6), который также выполняет функцию «подсказки» для анализа взаимодействия компонентов и технологических режимов.

Предлагаемый метод реализуется следующим образом:

Переменные $X_1, X_2, \dots, X_n$, характеризующие состав и технологические режимы, подаются через исполнительный орган (Блок 1) на объект управления (Блок 2), ЛПР (Блок 3) и блок пассивного эксперимента (Блок 4). В свою очередь, зависимые переменные $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$, полученные от объекта управления (Блок 2), направляются к ЛПР (Блок 3) и в блок пассивного эксперимента (Блок 4).

Из Блока 4 в Блок 3 поступают сигналы, содержащие числовые значения входных переменных $X_1, \dots, X_n$, полученные в результате анализа уравнений пассивного эксперимента. ЛПР (Блок 3) использует эти данные для определения верхних и нижних значений всех управляемых переменных от X_1 до X_n , которые выходят за пределы рабочего режима, в котором были получены уравнения пассивного эксперимента. Эти значения используются для формирования матрицы активного эксперимента, где выходные значения от Y_1 до Y_m рассчитываются на основе анализа «подсказки» (Блок 6).

На основании результатов взаимодействия верхних и нижних значений переменных X_n и полученных зависимых значений переменных Y_m формируются уравнения активного

эксперимента. ЛПР (Блок 3), проведя анализ этих уравнений, передает сигналы на исполнительный орган (Блок 1), изменяя значения входных переменных $X_1, \dots, X_n$ для получения параметров с повышенными численными значениями выходных переменных Y_m .

6.2 Эффективность применения стеклобазальтопластиковых, стеклопластиковых труб в различных климатических условиях

Разработанный метод оперативной оценки механических характеристик изделий из стеклобазальтопластика основывается на комбинации пассивных и активных экспериментов. В отличие от существующих методов, данный метод использует анализ предыстории работы исследуемой технологии для формирования модели в пассивном эксперименте. В активном эксперименте основной уровень переменных определяется лицом, принимающим решения, с учетом численных значений функции цели, которая формируется на основе результатов допустимых прямых испытаний и экспертного логико-технологического анализа, проведенного с использованием верхних и нижних значений переменных из пассивного эксперимента.

Эффективность применения гибридных стеклобазальтопластиковых композитных труб в сборных конструкциях обеспечивается следующими аспектами:

- композиция пассивных и активных экспериментов позволяет прогнозировать значения функций цели с минимальными затратами;
- основной уровень переменных в активном эксперименте определяется на основе верхних и нижних значений управляемых переменных из пассивного эксперимента.

Точность прогноза критериев качества исследуемых труб повышается за счет применения теории фракталов, что позволяет увеличить точность прогноза на 10-15% благодаря более дифференцированному анализу неоднородной структуры труб. Это достигается путем вычисления фрактальной размерности каждой составляющей (фазы) и мультифрактальных характеристик неоднородности. Для стеклопластиковых труб применение теории фракталов позволило разработать математическую модель прогноза осевой прочности с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.93$, основываясь на анализе их фрактальной размерности.

На Рисунке 6.2 представлена схема разработанного метода управления и прогноза качественных характеристик стеклобазальтопластиковых композитных труб.

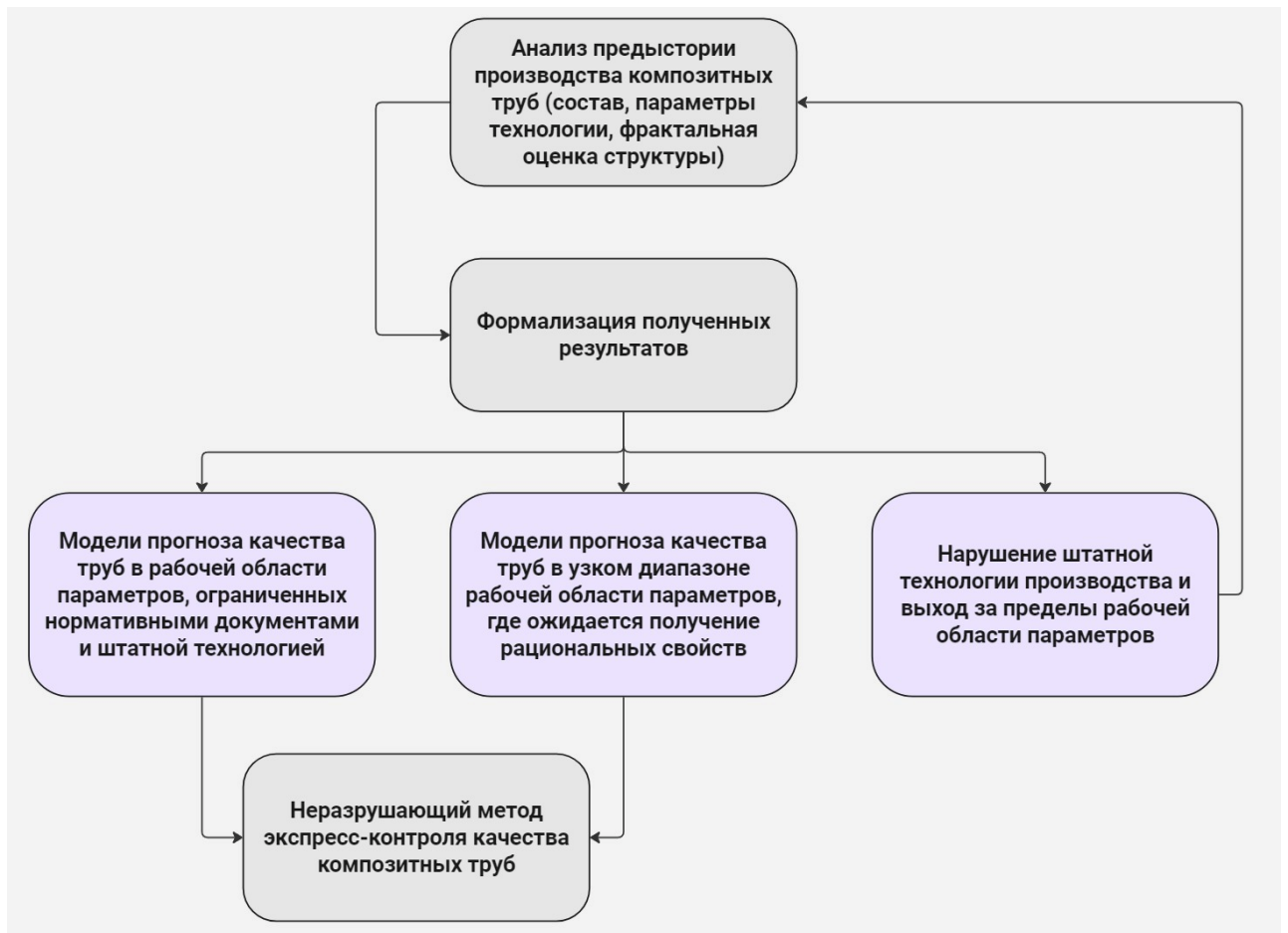


Рисунок 6.2 - Общая схема разработанного метода

Процедура контроля композитных труб:

- Фотографирование структуры композита;
- Оценка диапазона цветовой гаммы элементов структуры;
- Вычисление фрактальной размерности элементов структуры с помощью программы (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688390 Российская Федерация; «Structure Fractal Analyzer»: № 2024686872: заявл. 11.11.2024: опубл. 27.11.2024);
- Автоматический прогноз предела прочности на растяжение, сжатие и модуля упругости по встроенным в программу математическим моделям фрактального типа;
- Частота проведения механических испытаний при этом выбирается непосредственно конкретным предприятием и обусловлена требованиями контроля качества поставщика и потребителя, а также с учетом возможных рисков;
- Если коэффициент вариации при оценке свойств превышает нормативное значение 13,5, то в таком случае целесообразно проводить механические испытания.

Целесообразность применения экспресс-метода:

- При выборочном контроле качества труб производителем;
- При оценке остаточного ресурса быстросборных модульных конструкций, где

невозможны натурные испытания ввиду нарушения цельности конструкции;

- при выездных экспедициях по оценке качества труб или конструкций при отсутствии возможности реализации прямых испытаний.

Техническая реализация метода: ПК, видеокамера или смартфон.

В заключение, можно отметить, что метод управления и прогноза свойств стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов значительно повышает эффективность их применения в различных климатических условиях. Внедрение гибридного подхода, включающего как пассивные, так и активные эксперименты, обеспечивает более точное и экономичное прогнозирование характеристик труб. Применение теории фракталов в анализе структуры труб позволяет значительно повысить точность прогноза, что является важным аспектом для обеспечения надежности и долговечности труб в сложных условиях.

Разработанный метод экспресс-контроля свойств, общая схема которой приведена на Рисунке 5.2, обеспечивает оперативный и эффективный прогноз качества композитных труб, что в свою очередь способствует улучшению их эксплуатационных характеристик и снижению рисков при эксплуатации.

6.3 Экономический расчет эффективности разработанного метода управления и прогноза свойств труб

Предварительный экономический расчёт эффективности разработанного метода осуществлялся исходя из расценок на расходные материалы и натурные испытания по состоянию на 01.09.2024 года (Таблица 6.1).

Таблица 6.1 - Средняя стоимость базальтовых и стеклянных волокон [38,45] и физико-механических испытаний труб из них по России

Свойства/Тип волокна	Базальт (Basalt)	Е-стекло (E-glass)	S-стекло (S-glass)
Диаметр основания (мкм)	6-21	6-21	6-21
Цена (Рубль/тонна)	225000-315000	66000-108000	450000-630000
Цена 1 испытания на растяжение (Рубль)	2500-3000		
Цена 1 испытания на сжатие (Рубль)	2500-3000		
Цена 1 испытания на модуль упругости (Рубль)	1000-1200		
Суммарная стоимость испытаний (Рубль)	6600		

Как следует из Таблицы 6.1 средняя суммарная стоимость физико-механических испытаний на исследуемые в диссертации свойства (прочность на разрыв, сжатие и модуль упругости) составляет:

- на 1 испытание: 6600 рублей;
- на 1000 испытаний: 6 миллионов 600 тысяч рублей.

Исходя из проведенных расчетов экономия средств на проведение физико-механических испытаний в промышленных масштабах может привести к ощутимому экономическому эффекту.

6.4 Выводы по главе 5

В данной главе была предложена структурная схема метода управления и прогноза свойств стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов. Метод представляет собой значительный шаг вперед в области контроля качества и является особенно актуальной для применения в строительных конструкциях, зданиях и сооружениях, эксплуатируемых в арктических климатических условиях. При оценке поведения труб в процессе эксплуатации трубопровода или конструкции следует рассчитывать максимальные эквивалентные напряжения анизотропного материала стенки трубы. Представленный в работе метод также может применяться в процессе эксплуатации труб для оценки эквивалентных напряжений при условии задания ключевых параметров, которые в наибольшей степени влияют на напряжения анизотропного материала стенки трубы. Сам метод, благодаря применению системного подхода, обеспечивает высокую надежность и точность оценки критериев качества, что критически важно для обеспечения долговечности и безопасности конструкций.

Метод позволяет не только прогнозировать, но и рационализировать эксплуатационные характеристики труб, учитывая их сложные структурные и эксплуатационные параметры.

Реализация предложенного метода может быть осуществлена с помощью современных вычислительных технологий и аппаратных средств. Это включает в себя создание специализированного программного обеспечения и аппаратных блоков, которые обеспечат высокую степень автоматизации и оперативности в процессе контроля и управления качеством. Таким образом, предложенный метод не только решает текущие задачи по контролю качества, но и открывает новые возможности для интеграции передовых технологий в области композитных материалов и их применения в строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с целью разработки экспресс метода контроля качества стеклобазальтопластиковых изделий выполнены исследования механических и фрактальных характеристик стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб экспериментальными и статистическими методами. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Экспериментально показано, что границы варьирования рецептурно-технологическими факторами: 60-66% стеклоровинга, 30-35% связующего и диаметр волокон 5-11 мкм. являются рациональными для стеклобазальтопластиковых труб, используемых в качестве конструктивных элементов в строительстве.

2. Выявлено, что чувствительности к фрактальной размерности элементов структуры труб и к их пределу прочности на разрыв, пределом прочности на сжатие, а также к модулю упругости дают возможность прогнозирования механических характеристик изделий по фрактальным размерностям. Показано, что модели, основанные на результатах изучения фрактальных размерностей имеют относительную погрешность 3–7% прогнозирования механических характеристик.

3. С использованием теории мультифракталов выявлено влияние неоднородности структуры материала изделий в диапазоне 6–15% на механические характеристики исследуемых композитных труб. Рассчитаны мультифрактальные параметры, характеризующие неоднородность структуры материала, включая степень однородности, скрытую периодичность и регулярность. Показано, что фрактальная размерность может служить индикатором качества исследуемых труб, предоставляя возможность оперативно определять количественные критерии для их оценки.

4. Показано, что фрактальная размерность может быть использована в качестве показателя, отражающего геометрические особенности деформационного рельефа для выявления зон возможного разрушения труб из стеклопластика на микроструктурном уровне. Для разрушенных зон фрактальный коэффициент неоднородности находится в диапазоне значений $3.0 > D_{200}/D_{-200} > 2.5$, а для недеформированных однородных областей матрицы стекловолокна коэффициент неоднородности составляет $2.0 > D_{200}/D_{-200}$.

5. Установлено, что каждый тип исследуемого разрушения (хрупкое разрушение поверхностных слоев, горизонтальное разрушение продольно направленных волокон, продольное разрушение поперечно ориентированных волокон, боковое разрушение слоев, ориентированных под углом) характеризуется своими фрактальными размерностями, что создает основу для установления связи между макропараметрами (свойствами) и микропараметрами (микроструктурой зон разрушения), позволяющую более точно предсказывать поведение материалов в процессе эксплуатации.

6. Предложено использовать установленные зависимости между фрактальными размерностями и характеристиками изделий в качестве метода прогнозирования механических

свойств (предел прочности на разрыв, предел прочности на сжатие и модуль упругости) позволяет существенно сократить объем испытаний за счет использования моделей, основанных на анализе фрактальной размерности структурных элементов труб.

7. Разработанный метод внедрен в производство композитных труб в ООО «Мепос» (г. Екатеринбург, РФ), в ООО «ГидроИзолГрупп» (г. Санкт-Петербург, РФ) как элемент системы контроля и оценки качества стеклобазальтопластиковых труб.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении тиражирования разработанных составов на широкой номенклатуре композитных труб с повышенными механическими характеристиками в разных климатических зонах и разработке методики неразрушающего контроля их качества с минимальными материально-временными затратами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

GBP	Стеклобазальтопластиковые материалы;
FRP	Пластик, армированный волокном;
FRE	Эпоксидная смола, армированная стекловолокном;
FCP	Гибкая композитная труба;
RTP	Армированная термопластичная труба;
PO	Рабочая область параметров технологии;
ЛПР	Лицо, принимающее решение
σ_p	Предел прочности на растяжение
σ_c	Прочность на сжатие
E	Модуль упругости
σ_T	Предел текучести смолы
D_0	Фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича при $q = 0$, характерная для однородного фрактала
D_1	Информационная размерность из мультифрактального спектра $D(q)$ при показателе степени q равным 1, описывающая скорость роста информации (информационная энтропия)
D_2	Корреляционная размерность из мультифрактального спектра $D(q)$ при показателе степени q равным 2, которая описывает вероятность нахождения двух точек в одной ячейке сетки покрытия фрактального множества
D_∞	Размерность из мультифрактального спектра $D(q)$ при показателе степени q равным ∞ , характеризующая наиболее разреженные области фрактального множества
$D_{-\infty}$	Размерность из мультифрактального спектра $D(q)$ при показателе степени q равным $-\infty$, характеризующая наиболее концентрированные области фрактального множества.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Базальтовое волокно – искусственный неорганический материал, получаемый из природных минералов путём их расплавления и последующего преобразования в волокно. В зависимости от производителя материал может быть получен как с добавками, так и без таковых.

Стеклопластик – вид композиционных материалов (пластических материалов), состоящих из стекловолокнуистого наполнителя (стеклянное волокно, кварцевое волокно и др.) и связующего вещества (термореактивные и термопластичные полимеры).

Эпоксидная смола – это олигомеры, содержащие эпоксидные группы и способные под действием отвердителей (полиаминов и др.) образовывать сшитые полимеры.

Композиционный материал или **композитный материал** (композит) – многокомпонентный материал, изготовленный (человеком или природой) из двух или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами, которые, в сочетании, приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов и не являющимися простой их суперпозицией. В составе композита принято выделять матрицу/матрицы и наполнитель/наполнители, последние выполняют функцию армирования (по аналогии с арматурой в таком композиционном строительном материале, как железобетон). В качестве наполнителей композитов как правило выступают углеродные или стеклянные волокна, а роль матрицы играет полимер.

Технология производства – способы, приемы и последовательность изготовления продукции или выполнения строительно-монтажных и других видов работ, обеспечивающие рациональное использование всех ресурсов (материалов, машин, энергии, трудовых затрат и др.).

Физические свойства вещества – свойства, которые проявляются веществом в процессах, при которых вещество остаётся химически неизменным.

Механические свойства характеризуют способность материалов сопротивляться действию внешних сил. К основным механическим свойствам относятся прочность, твердость, ударная вязкость, упругость, пластичность, хрупкость и др.

Прочность – это способность материала сопротивляться разрушающему воздействию внешних сил.

Упругость – свойство твёрдых материалов возвращаться в изначальную форму при упругой деформации.

Математическая модель – математическое представление реальности, один из вариантов модели как системы, исследование которой позволяет получать информацию о некоторой другой системе. Математическая модель, в частности, предназначена для прогнозирования поведения реального объекта, но всегда представляет собой ту или иную

степень его идеализации.

Рабочая область параметров - диапазон (область) численных значений элементов состава, структуры и свойств в пределах нормативных документов (штатная технология, ГОСТ и т.д.). Определяется исследователем на основании анализа предыстории работы технологии.

Фрактал (лат. Fractus – дроблёный, сломанный, разбитый) – множество, обладающее свойством самоподобия (объект, в точности или приближённо совпадающий с частью себя самого, то есть целое имеет ту же форму, что и одна или более частей). В математике под фракталами понимают множества точек в евклидовом пространстве, имеющие дробную метрическую размерность (в смысле Минковского или Хаусдорфа), либо метрическую размерность, отличную от топологической, поэтому их следует отличать от прочих геометрических фигур, ограниченных конечным числом звеньев. Самоподобные фигуры, повторяющиеся конечное число раз, называются предфракталами.

Фрактальная размерность (англ. fractal dimension) – один из способов определения размерности множества в метрическом пространстве. Фрактальная размерность может принимать не целое числовое значение.

Мультифрактал – комплексный фрактал, который может детерминироваться не одним единственным алгоритмом построения, а несколькими последовательно сменяющимися друг друга алгоритмами. Каждый из них генерирует паттерн со своей фрактальной размерностью. Предмет изучения мультифрактального анализа. Для описания мультифрактала вычисляют мультифрактальный спектр, включающий в себя ряд фрактальных размерностей присущих элементам данного мультифрактала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Borodulin, A.S., Maltsev, V. V., Bertaeva, A.A., Fedorov, S.Y., Tereshkov, A.G., Nelyub, V.A. and Malysheva, G. V. (2022) A Method for Assessing the Adhesion Strength of an Elementary Fiber–Epoxy Matrix System. *Polymer Science - Series D*, Pleiades Publishing, **15**, 517–522. <https://doi.org/10.1134/S1995421222040049>.
- 2 Borodulin, A., Kalinnikov, A., Tereshkov, A. and Kharaev, A. (2019) New Polymeric Binders for the Production of Composites. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, **11**, 139–143. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.12.121>.
- 3 Tereshkov, A.G., Malysheva, G. V., Soloviev, A.I. and Dzhaferova, S.I. (2024) Study of Drapability Indicators of Technical Fabrics and Thermoplastic Polymer Composite Materials on Their Basis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, Ivanovo State Polytechnic University, 69–75. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_2_69.
- 4 Cao, V. Van. (2024) Behavior of One-Way Steel, BFRP, and GFRP Reinforced Concrete Slabs under Monotonic and Cyclic Loadings: Experiments and Analyses. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **21**. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2024.E03415>.
- 5 Pavan Kumar, T., Udaya Kiran, C. and Reddy, A.C. (2024) Optimization of Mechanical Characteristics of Jute-Basalt Reinforced Epoxy Hybrid Composites Using the Taguchi Process. *Interactions*, Springer Nature, **245**. <https://doi.org/10.1007/S10751-024-01908-Y>.
- 6 Gadagi, A. and Adake, C. (2024) Machine Learning Approach to the Prediction of Surface Roughness of Turned Glass/Basalt Epoxy Composites. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, National Institute of Science Communication and Policy Research, **30**, 805–815. <https://doi.org/10.56042/IJEMS.V30I6.2182>.
- 7 Dai, H., Gao, H., Jiang, B., Yang, Q., Li, X., Guo, X., Cheng, Z., Xiong, Y., Li, X., Chen, X., Wu, J. and Wang, L. (2024) Enhancement Effect of Basalt Fiber on the Foamy Kaolinite-Based Composite Thermal Insulator. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **95**. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.110144>.
- 8 Yurt, Ü., Çelikten, S. and Atabey, İ.İ. (2024) Post-Fire Residual Mechanical and Microstructural Properties of Waste Basalt and Glass Powder-Based Geopolymer Mortars. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **94**. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109941>.
- 9 Malashin, I., Tynchenko, V., Gantimurov, A., Nelyub, V. and Borodulin, A. (2024) A Multi-Objective Optimization of Neural Networks for Predicting the Physical Properties of Textile Polymer Composite Materials. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **16**. <https://doi.org/10.3390/POLYM16121752>.
- 10 Malashin, I.P., Tynchenko, V.S., Nelyub, V.A., Borodulin, A.S. and Gantimurov, A.P. (2024) Estimation and Prediction of the Polymers' Physical Characteristics Using the Machine Learning Models. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **16**. <https://doi.org/10.3390/POLYM16010115>.
- 11 Malashin, I., Martysyuk, D., Tynchenko, V., Nelyub, V., Borodulin, A. and Galinovsky, A. (2024) Mechanical Testing of Selective-Laser-Sintered Polyamide PA2200 Details: Analysis of Tensile Properties via Finite Element Method and Machine Learning Approaches. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **16**. <https://doi.org/10.3390/POLYM16060737>.
- 12 Malashin, I., Daibagya, D., Tynchenko, V., Gantimurov, A., Nelyub, V. and Borodulin, A. (2024) Predicting Diffusion Coefficients in Nafion Membranes during the Soaking Process Using a Machine Learning Approach. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **16**.

- <https://doi.org/10.3390/POLYM16091204>.
- 13 Malashin, I., Tynchenko, V., Nelyub, V., Borodulin, A., Gantimurov, A., Krysko, N. V., Shchipakov, N.A., Kozlov, D.M., Kusyy, A.G., Martysyuk, D. and Galinovsky, A. (2024) Deep Learning Approach for Pitting Corrosion Detection in Gas Pipelines. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **24**. <https://doi.org/10.3390/S24113563>.
 - 14 Yao, C., Hu, G., Chen, Q. and Wu, J. (2024) Prediction on the Freeze-Thaw Resistance of a One-Part Geopolymer Stabilized Soil by Using Deep Learning Method. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **21**. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2024.E03530>.
 - 15 Ma, T.T., Wei, C.F., Yao, C.Q. and Chen, P. (2018) A Chemical-Mechanical Coupling Constitutive Model of Unsaturated Soils. American Society of Civil Engineers (ASCE), 360–369. <https://doi.org/10.1061/9780784481684.037>.
 - 16 Fawad, M., Alabduljabbar, H., Farooq, F., Najeh, T., Gamil, Y. and Ahmed, B. (2024) Indirect Prediction of Graphene Nanoplatelets-Reinforced Cementitious Composites Compressive Strength by Using Machine Learning Approaches. *Scientific Reports*, Nature Research, **14**. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-64204-3>.
 - 17 Alyousef, R., Rehman, M.F., Khan, M., Fawad, M., Khan, A.U., Hassan, A.M. and Ghamry, N.A. (2023) Machine Learning-Driven Predictive Models for Compressive Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to High Temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **19**. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02418>.
 - 18 Imran, M., Khushnood, R.A. and Fawad, M. (2023) A Hybrid Data-Driven and Metaheuristic Optimization Approach for the Compressive Strength Prediction of High-Performance Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **18**. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E01890>.
 - 19 Philip, S., Nidhi, M. and Nakkeeran, G. (2024) Soft Computing Techniques for Predicting the Compressive Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Using Regression-Based Machine Learning Approaches. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, Springer Nature, **9**. <https://doi.org/10.1007/S41024-024-00461-Z>.
 - 20 Philip, S., Nidhi, M. and Ahmed, H.U. (2024) A Comparative Analysis of Tree-Based Machine Learning Algorithms for Predicting the Mechanical Properties of Fibre-Reinforced GGBS Geopolymer Concrete. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, Springer Science and Business Media B.V., **7**, 2555–2583. <https://doi.org/10.1007/S41939-023-00355-6>.
 - 21 Wei, Y. and Xiao, Y. (2024) Non-Destructive Testing of Composites with Multi-Frequency Lock-In Fusion. *Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica*, Chinese Optical Society, **44**. <https://doi.org/10.3788/AOS231997>.
 - 22 Wei, Y., Xiao, Y., Gu, X., Li, S., Li, H., Ren, J. and Zhang, Y. (2024) The Fusion of Lock-in Phase Images for the Damage Investigation in Composites Materials. *NDT and E International*, Elsevier Ltd, **146**. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2024.103159>.
 - 23 Wei, Y., Ding, L., Han, Y., Luo, Y., Su, Z. and Zhang, D. (2021) Characterizing Defects in Materials with Fusion of Thermography and Shearography. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Elsevier B.V., **182**. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109736>.
 - 24 Wei, Y., Zhang, S., Luo, Y., Ding, L. and Zhang, D. (2021) Accurate Depth Determination of Defects in Composite Materials Using Pulsed Thermography. *Composite Structures*, Elsevier Ltd, **267**. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113846>.
 - 25 Wei, Y., Su, Z., Mao, S. and Zhang, D. (2020) An Infrared Defect Sizing Method Based on Enhanced Phase Images. *Sensors (Switzerland)*, MDPI AG, **20**, 1–14.

- <https://doi.org/10.3390/S20133626>.
- 26 Strogonov, K., Fedyukhin, A., Stepanova, T. and Derevianko, O. (2018) Estimation of Practical Significance for Application of Composite Pipes in Comparison with Metal and Polymer Materials. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Verlag, **692**, 1024–1035. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_111.
 - 27 Kychkin, A., Tuisov, A.G. and Kopyrin, M. (2022) Review of the Possibility of Using Basalt–Plastic Pipes for the Degassing System of Mines and Mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, Publishing house Mining book, 136–144. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_136.
 - 28 Sheets, C., Crawford, A. and Shie, T. (2018) Thin-Wall Pipeline Repair: Evaluation of Reinforcement Systems and Internal Temperature Monitoring during Maintenance Procedures. *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), **3**. <https://doi.org/10.1115/IPC2018-78647>.
 - 29 Green, M.A., Deaton, L. and Lazzara, C.J. (2012) Cathodic Disbondment Testing Comparison of Carbon Fiber, Fiberglass, and Hybrid Composite Repair Systems for Pipelines. *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), **1**, 577–584. <https://doi.org/10.1115/IPC2012-90318>.
 - 30 Li, Y., Shen, A. and Wu, H. (2020) Fractal Dimension of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC) and Its Correlations to Pore Structure, Strength and Shrinkage. *Materials 2020, Vol. 13, Page 3238*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 3238. <https://doi.org/10.3390/MA13143238>.
 - 31 Geng, K., Chai, J., Qin, Y., Li, X., Duan, M. and Liang, D. (2022) Exploring the Brittleness and Fractal Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Concrete under Impact Load Based on the Principle of Energy Dissipation. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Springer Science and Business Media B.V., **55**, 1–16. <https://doi.org/10.1617/S11527-022-01891-2/FIGURES/14>.
 - 32 Li, D., Niu, D., Fu, Q. and Luo, D. (2020) Fractal Characteristics of Pore Structure of Hybrid Basalt–Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **109**, 103555. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103555>.
 - 33 Liu, B., Li, D., Fu, Q., He, L. and Mai, T. (2023) Applicability of Fractal Models for Characterising Pore Structure of Hybrid Basalt–Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. *Reviews on Advanced Materials Science*, Walter de Gruyter GmbH, **62**. https://doi.org/10.1515/RAMS-2022-0272/ASSET/GRAPHIC/J_RAMS-2022-0272_FIG_011.JPG.
 - 34 Zhang, J., Wang, Y., Li, X., Zhang, Y. and Wu, L. (2024) Enhancing Concrete Mechanical Properties through Basalt Fibers and Calcium Sulfate Whiskers: Optimizing Compressive Strength, Elasticity, and Pore Structure. *Materials 2024, Vol. 17, Page 1706*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **17**, 1706. <https://doi.org/10.3390/MA17071706>.
 - 35 Stajcic, I., Stajcic, A., Serpa, C., Vasiljevic-Radovic, D., Randjelovic, B., Radojevic, V. and Fecht, H. (2022) Microstructure of Epoxy-Based Composites: Fractal Nature Analysis. *Fractal and Fractional 2022, Vol. 6, Page 741*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **6**, 741. <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT6120741>.
 - 36 Jiang, W., Yao, W., Qi, W. and Shen, H. (2020) Study on the Fractal Dimension and Evolution of Matrix Crack in Cross-Ply GFRP Laminates. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Elsevier, **107**, 102478. <https://doi.org/10.1016/J.TAFMEC.2020.102478>.
 - 37 Li, L., Sun, H.X., Zhang, Y. and Yu, B. (2021) Surface Cracking and Fractal Characteristics of Bending Fractured Polypropylene Fiber-Reinforced Geopolymer Mortar. *Fractal and Fractional 2021, Vol. 5, Page 142*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **5**, 142.

- <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT5040142>.
- 38 Zhang, H., Sfarra, S., Sarasini, F., Santulli, C., Fernandes, H., Avdelidis, N.P., Ibarra-Castanedo, C. and Maldague, X.P.V. (2018) Thermographic Non-Destructive Evaluation for Natural Fiber-Reinforced Composite Laminates. *Applied Sciences (Switzerland)*, MDPI AG, **8**. <https://doi.org/10.3390/app8020240>.
 - 39 Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K.Y., Park, S.J. and Hui, D. (2015) A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **73**, 166–180. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2014.12.011>.
 - 40 Guo, Y., Zhou, M., Yin, G.-Z., Kalali, E., Wang, N., Wang, D.-Y., Guo, Y., Zhou, M., Yin, G.-Z., Kalali, E., Wang, N.; and Wang, D.-Y. (2021) Basalt Fiber-Based Flame Retardant Epoxy Composites: Preparation, Thermal Properties, and Flame Retardancy. *Materials 2021, Vol. 14, Page 902*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 902. <https://doi.org/10.3390/MA14040902>.
 - 41 Kim, H. (2013) Enhancement of Thermal and Physical Properties of Epoxy Composite Reinforced with Basalt Fiber. *Fibers and Polymers*, Springer, **14**, 1311–1316. <https://doi.org/10.1007/S12221-013-1311-0/METRICS>.
 - 42 Balaji, K. V., Shirvanimoghaddam, K., Rajan, G.S., Ellis, A. V. and Naebe, M. (2020) Surface Treatment of Basalt Fiber for Use in Automotive Composites. *Materials Today Chemistry*, Elsevier, **17**, 100334. <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2020.100334>.
 - 43 Sharma, V., Meena, M.L. and Kumar, M. (2020) Effect of Filler Percentage on Physical and Mechanical Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Epoxy Based Composites. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **26**, 2506–2510. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.02.533>.
 - 44 Asadi, A., Baaij, F., Mainka, H., Rademacher, M., Thompson, J. and Kalaitzidou, K. (2017) Basalt Fibers as a Sustainable and Cost-Effective Alternative to Glass Fibers in Sheet Molding Compound (SMC). *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **123**, 210–218. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2017.05.017>.
 - 45 Liu, H., Yu, Y., Liu, Y., Zhang, M., Li, L., Ma, L., Sun, Y. and Wang, W. (2022) A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids. *Polymers 2022, Vol. 14, Page 2376*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 2376. <https://doi.org/10.3390/POLYM14122376>.
 - 46 Kuzmin, K.L., Timoshkin, I.A., Gutnikov, S.I., Zhukovskaya, E.S., Lipatov, Y. V. and Lazoryak, B.I. (2017) Effect of Silane/Nano-Silica on the Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Composite Interfaces*, Taylor & Francis, **24**, 13–34. <https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1182408>.
 - 47 Li, R., Gu, Y., Yang, Z., Li, M., Wang, S. and Zhang, Z. (2015) Effect of γ Irradiation on the Properties of Basalt Fiber Reinforced Epoxy Resin Matrix Composite. *Journal of Nuclear Materials*, North-Holland, **466**, 100–107. <https://doi.org/10.1016/J.JNUCMAT.2015.07.037>.
 - 48 Balaji, K. V., Shirvanimoghaddam, K., Yadav, R., Mahmoodi, R., Ghandehari Ferdowsi, M.R. and Naebe, M. (2024) Hybrid Heterophasic Polypropylene Composites with Basalt Fibers and Magnesium Oxysulfate Reinforcements for Sustainable Automotive Materials. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, **28**, 546–559. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.12.043>.
 - 49 Li, Z., Ma, J., Ma, H. and Xu, X. (2018) Properties and Applications of Basalt Fiber and Its Composites. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, **186**. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/2/012052>.
 - 50 Zhou, Q., Liang, X., Wang, J., Wang, H., Chen, P., Zhang, D., Yang, S. and Li, J. (2016) Preparation of Activated Aluminum-Coated Basalt Fiber Mat for Defluoridation from Drinking

- Water. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Springer New York LLC, **78**, 331–338. <https://doi.org/10.1007/S10971-016-3970-Y/TABLES/5>.
- 51 Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G. and Valenza, A. (2015) A Review on Basalt Fibre and Its Composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **74**, 74–94. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2014.12.034>.
 - 52 Huang, R., Mei, C., Xu, X., Kärki, T., Lee, S. and Wu, Q. (2015) Effect of Hybrid Talc-Basalt Fillers in the Shell Layer on Thermal and Mechanical Performance of Co-Extruded Wood Plastic Composites. *Materials* 2015, Vol. 8, Pages 8510-8523, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **8**, 8510–8523. <https://doi.org/10.3390/MA8125473>.
 - 53 Tábi, T., Égerházi, A.Z., Tamás, P., Czígány, T. and Kovács, J.G. (2014) Investigation of Injection Moulded Poly(Lactic Acid) Reinforced with Long Basalt Fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, **64**, 99–106. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2014.05.001>.
 - 54 Zotti, A., Zuppolini, S., Tábi, T., Grasso, M., Ren, G., Borriello, A. and Zarrelli, M. (2018) Effects of 1D and 2D Nanofillers in Basalt/Poly(Lactic Acid) Composites for Additive Manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **153**, 364–375. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.08.128>.
 - 55 Zhao, X., Wang, X., Wu, Z. and Wu, J. (2020) Experimental Study on Effect of Resin Matrix in Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites under Static and Fatigue Loading. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **242**, 118121. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118121>.
 - 56 Chen, C., Gu, Y., Wang, S., Zhang, Z., Li, M. and Zhang, Z. (2017) Fabrication and Characterization of Structural/Dielectric Three-Phase Composite: Continuous Basalt Fiber Reinforced Epoxy Resin Modified with Graphene Nanoplates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, **94**, 199–208. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2016.12.023>.
 - 57 Bulut, M., Bozkurt, Ö.Y., Erklığ, A., Yaykaşlı, H. and Özbek, Ö. (2020) Mechanical and Dynamic Properties of Basalt Fiber-Reinforced Composites with Nanoclay Particles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Springer, **45**, 1017–1033. <https://doi.org/10.1007/S13369-019-04226-6/FIGURES/16>.
 - 58 Bulut, M. (2017) Mechanical Characterization of Basalt/Epoxy Composite Laminates Containing Graphene Nanopellets. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **122**, 71–78. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2017.04.013>.
 - 59 Jamali, N., Khosravi, H., Rezvani, A. and Tohidlou, E. (2019) Mechanical Properties of Multiscale Graphene Oxide/Basalt Fiber/Epoxy Composites. *Fibers and Polymers*, Korean Fiber Society, **20**, 138–146. <https://doi.org/10.1007/S12221-019-8794-2/METRICS>.
 - 60 Jamali, N., Rezvani, A., Khosravi, H. and Tohidlou, E. (2018) On the Mechanical Behavior of Basalt Fiber/Epoxy Composites Filled with Silanized Graphene Oxide Nanoplatelets. *Polymer Composites*, John Wiley & Sons, Ltd, **39**, E2472–E2482. <https://doi.org/10.1002/PC.24766>.
 - 61 Chen, W., Shen, H., Auad, M.L., Huang, C. and Nutt, S. (2009) Basalt Fiber–Epoxy Laminates with Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, **40**, 1082–1089. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2009.04.027>.
 - 62 Lee, J.J., Nam, I. and Kim, H. (2017) Thermal Stability and Physical Properties of Epoxy Composite Reinforced with Silane Treated Basalt Fiber. *Fibers and Polymers*, Korean Fiber Society, **18**, 140–147. <https://doi.org/10.1007/S12221-017-6752-4/METRICS>.
 - 63 Balaji, K. V., Shirvanimoghaddam, K., Rajan, G.S., Ellis, A. V. and Naebe, M. (2020) Surface Treatment of Basalt Fiber for Use in Automotive Composites. *Materials Today Chemistry*,

- Elsevier, **17**, 100334. <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2020.100334>.
- 64 Kumar, N. and Singh, A. (2021) Study the Effect of Fiber Orientation on Mechanical Properties of Bidirectional Basalt Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **39**, 1581–1587. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.05.707>.
 - 65 He, J., Shi, J., Cao, X. and Hu, Y. (2018) Tensile Mechanical Properties and Failure Modes of a Basalt Fiber/Epoxy Resin Composite Material. *Advances in Civil Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, **2018**, 7914727. <https://doi.org/10.1155/2018/7914727>.
 - 66 Karvanis, K., Rusnáková, S., Krejčí, O. and Žaludek, M. (2020) Preparation, Thermal Analysis, and Mechanical Properties of Basalt Fiber/Epoxy Composites. *Polymers 2020, Vol. 12, Page 1785*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **12**, 1785. <https://doi.org/10.3390/POLYM12081785>.
 - 67 Plappert, D., Ganzenmüller, G.C., May, M. and Beisel, S. (2020) Mechanical Properties of a Unidirectional Basalt-Fiber/Epoxy Composite. *Journal of Composites Science 2020, Vol. 4, Page 101*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **4**, 101. <https://doi.org/10.3390/JCS4030101>.
 - 68 Sun, G., Tong, S., Chen, D., Gong, Z. and Li, Q. (2018) Mechanical Properties of Hybrid Composites Reinforced by Carbon and Basalt Fibers. *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier Ltd, **148**, 636–651. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.007>.
 - 69 Sfarra, S., Ibarra-Castanedo, C., Santulli, C., Paoletti, A., Paoletti, D., Sarasini, F., Bendada, A. and Maldague, X. (2013) Falling Weight Impacted Glass and Basalt Fibre Woven Composites Inspected Using Non-Destructive Techniques. *Composites Part B: Engineering*, **45**, 601–608. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.078>.
 - 70 Megahed, M., Fathy, A., Morsy, D. and Shehata, F. (2021) Mechanical Performance of Glass/Epoxy Composites Enhanced by Micro- and Nanosized Aluminum Particles. *Journal of Industrial Textiles*, SAGE Publications Ltd, **51**, 68–92. <https://doi.org/10.1177/1528083719874479>.
 - 71 PELIN, C.-E. and PELIN, G. (2024) Mechanical Properties of Basalt Fiber/ Epoxy Resin Composites. *INCAS BULLETIN*, INCAS - National Institute for Aerospace Research Elie Carafoli, **16**, 99–111. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2024.16.2.8>.
 - 72 Kumar, N.S., Kumar, G.V., Kumar, C.V. and bhu, M.P. (2018) Experimental Investigation on Mechanical Behavior of E-Glass and S-Glass Fiber Reinforced with Polyester Resin. *International Journal of Mechanical Engineering*, SSRG International Journal, **5**, 19–26. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V5I5P104>.
 - 73 Antipas, I.R. (2023) Effect of Glass Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Polyester Composites. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, FSFEI HE Don State Technical University, **23**, 387–397. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-387-397>.
 - 74 Jain, R. and Lee, L. (2012) Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications: Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability. *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications: Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability*, Springer Netherlands, 1–280. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3/COVER>.
 - 75 Varga, C., Miskolczi, N., Bartha, L. and Lipóczi, G. (2010) Improving the Mechanical Properties of Glass-Fibre-Reinforced Polyester Composites by Modification of Fibre Surface. *Materials and Design*, **31**, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.034>.
 - 76 Papavinasam, S. (2018) Corrosion Control in the Oil and Gas Industry. Elsevier Science.
 - 77 Bahadori, A. (2017) Transportation Pipelines. Oil and Gas Pipelines and Piping Systems, Elsevier, 1–27. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803777-5.00001-0>.
 - 78 Heidersbach, R. (2018) Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production, Second Edition. *Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production, Second Edition*, wiley, 1–

354. <https://doi.org/10.1002/9781119252351>.
- 79 Bukhari, A.O., Bashar, M., Aladawy, A.S., Goh, S.L.M. and Sarmah, P. (2022) Review of Non-Metallic Pipelines in Oil & Gas Applications - Challenges & Way Forward. International Petroleum Technology Conference, IPTC 2022, International Petroleum Technology Conference (IPTC). <https://doi.org/10.2523/IPTC-22301-MS>.
- 80 Rajak, D.K., Wagh, P.H. and Linul, E. (2021, November 1) Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers*, MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>.
- 81 Krishna Balla, V., Kate, K.H., Satyavolu, J., Singh, P., Ganesh, J. and Tadimeti, D. (2019) Additive Manufacturing of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Processing and Prospects. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>.
- 82 Carrino, S., Maffezzoli, A. and Scarselli, G. (2019) Active SHM for Composite Pipes Using Piezoelectric Sensors. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.048>.
- 83 Waqar, M., Memon, A.M. and Sabih, M. Defect Prevalence in Fiberglass Pipes: A Comprehensive Review. <https://www.researchgate.net/publication/380184351>.
- 84 Bobba, S., Leman, Z., Zainuddin, E.S. and Sapuan, S.M. (2017) Failures Analysis of E-Glass Fibre Reinforced Pipes in Oil and Gas Industry: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/217/1/012004>.
- 85 Kamath, S.S. and Chandrappa, R.K. (2021) Additives Used in Natural Fibre Reinforced Polymer Composites-a Review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 1417–1424. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.331>.
- 86 Zaman, A., Gutub, S.A. and Wafa, M.A. (2013, December) A Review on FRP Composites Applications and Durability Concerns in the Construction Sector. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1966–1988. <https://doi.org/10.1177/0731684413492868>.
- 87 Woo, K., Nelson, J., Cairns, D. and Riddle, T. (2013) Effects of Defects: Part B—Progressive Damage Modeling of Fiberglass/Epoxy Composite Structures with Manufacturing Induced Flaws Utilizing Cohesive Zone Elements. *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*.
- 88 Senthil, K., Arockiarajan, A., Palaninathan, R., Santhosh, B. and Usha, K.M. (2013, December) Defects in Composite Structures: Its Effects and Prediction Methods - A Comprehensive Review. *Composite Structures*, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.008>.
- 89 Gresil, M., Poohsai, A. and Chandarana, N. (2017) Guided Wave Propagation and Damage Detection in Composite Pipes Using Piezoelectric Sensors. *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.468>.
- 90 Joas, S., Essig, W., Fröhlich, F. and Kreutzbruck, M. (2019) CFRP Pipe Inspection by Means of Air-Coupled Ultrasound. *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.5084893>.
- 91 Abd-Elhady, A.A., Meroufel, A., Sallam, H.E.D.M. and Atta, M. (2021) Experimental and Numerical Determination of Critical Osmotic Blister Size Affecting the Strength of Aged FRP Seawater Pipe. *Polymers and Polymer Composites*, SAGE Publications Ltd, **29**, 456–469. <https://doi.org/10.1177/0967391120922397>.
- 92 Gao, Y., Ravan, M. and Amineh, R.K. (2021) Fast, Robust, and Low-Cost Microwave Imaging of Multiple Non-Metallic Pipes. *Electronics (Switzerland)*, MDPI AG, **10**. <https://doi.org/10.3390/electronics10151762>.
- 93 De Almeida, P.D. and Pereira, G.R. (2019) Phased Array Inspection of Glass Fiber Reinforced Polymers Pipeline Joints. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier Editora Ltda, **8**,

- 4736–4740. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.020>.
- 94 Wang, B., Zhong, S., Lee, T.L., Fancey, K.S. and Mi, J. (2020, April 1) Non-Destructive Testing and Evaluation of Composite Materials/Structures: A State-of-the-Art Review. *Advances in Mechanical Engineering*, SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/1687814020913761>.
 - 95 Waqar, M., Memon, A.M., Sabih, M. and Alhems, L.M. (2024, March 1) Composite Pipelines: Analyzing Defects and Advancements in Non-Destructive Testing Techniques. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107914>.
 - 96 Kumar, K., Dixit, S., Ul Haq, M.Z., Maksudovna, V.K., Vatin, N.I., Rao, D.S.N.M., Awaar, V.K., Nijhawan, G. and Rani, K.S. (2023) Exploring the Uncharted Territory: Future Generation Materials for Sustainable Energy Storage. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, **430**, 01199. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202343001199>.
 - 97 Kumpati, R., Skarka, W. and Ontipuli, S.K. (2021, September 1) Current Trends in Integration of Nondestructive Testing Methods for Engineered Materials Testing. *Sensors*, MDPI. <https://doi.org/10.3390/s21186175>.
 - 98 Kavkazskiy, V.N., Kirsanova, T.A., Usanova, K.I., Vafaeva, K.M. and Vasyutkin, E.S. (2023) Drainage Bridge Trays Made of Glass Fiber Reinforced Polymer: Physical, Mechanical and Operational Properties. *Строительство уникальных зданий и сооружений*, **110**, 10919–10919. <https://doi.org/10.4123/CUBS.109.19>.
 - 99 Vafaeva, Kh.M., Usanova, K.Yu., Lazarev, Yu.G., Efremov, V.I. and Kurdyukov, D.P. (2024) Glass-Basalt-Plastic Barriers for Bicycle Paths: Advantages and Implementation Prospects. *Путевой навигатор*, **58**, 78–91. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36071.87202>.
 - 100 Vafaeva, Kh.M. and Zegait, R. (2023) Nanotechnology in Construction: New Composite Materials Based on Carbon Nanotubes. *Информационные Системы и Технологии АПК и ПГС*, Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова, Курск, 281–296. <https://doi.org/10.47581/2023.FM-03.VAFAEVA-01>.
 - 101 Vafaeva, K.M. and Zegait, R. (2024) Carbon Nanotubes: Revolutionizing Construction Materials for a Sustainable Future: A Review. *Research on Engineering Structures and Materials*, MIM RESEARCH GROUP, **10**, 559–621. <https://doi.org/10.17515/RESM2023.42MA0818RV>.
 - 102 Vafaeva, Kh.M., Zegait, R. and Munawar, S. (2023) Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties. *AlfaBuild*, **29**, 2910–2910. <https://doi.org/10.57728/ALF.29.10>.
 - 103 Kumar, K., Dixit, S., Ul Haq, M.Z., Maksudovna, V.K., Tummala, S.K., Bobba, P.B., Chhabra, S. and Khatua, D. (2023) Breaking Barriers: Innovative Fabrication Processes for Nanostructured Materials and Nano Devices. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, **430**, 01197. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202343001197>.
 - 104 Reddivari, B.R., Vadapalli, S., Sanduru, B., Buddi, T., Vafaeva, K.M. and Joshi, A. (2024) Fabrication and Mechanical Properties of Hybrid Fibre-Reinforced Polymer Hybrid Composite with Graphene Nanoplatelets and Multiwalled Carbon Nanotubes. *Cogent Engineering*, Cogent OA, **11**. https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2343586/ASSET/ADB99630-25DC-4B03-8AA4-D0A582998FBC/ASSETS/GRAPHIC/OAEN_A_2343586_F0008_C.JPG.
 - 105 Aksenkin, V.I., Lazarev, Y.G., Usanova, K.I., Vafaeva, K.M. and Vasyutkin, E.S. (2023) Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Polymer Bars under Various Types of Stress-Strain State. *Строительство уникальных зданий и сооружений*, **110**, 10931–10931. <https://doi.org/10.4123/CUBS.109.31>.
 - 106 Vafaeva, K.M., Chhetri, A., Sudan, P., Mishra, M., Pakkiraiah, B. and Mohan, C. (2024) Polymer Matrix Nanocomposites for Sustainable Packaging: A Green Approach. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, **511**, 01008. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202451101008>.

- 107 Vafaeva, K.M., Dhyani, M., Acharya, P., Parik, K. and Ledalla, S. (2024) Glass-Basalt-Plastic Materials for Construction in Temperate and Arctic Climatic Regions. *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, **86**, 01111. <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/20248601111>.
- 108 Vafaeva, K.M., Duklan, N., Mohan, C., Kumar, Y. and Ledalla, S. (2024) Comparative Analysis of Glass-Basalt-Plastic Materials for Construction in Arctic Conditions. *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, **86**, 01112. <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/20248601112>.
- 109 Vafaeva, K.M., Saxena, A.K., Khatkar, M., Devi, S. and Ledalla, S. (2024) Expedient Structures for Safeguarding Aircraft Parking Areas from Climatic Impact: An In-Depth Exploration. *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, **86**, 01110. <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/20248601110>.
- 110 Vijayakumar, M., Haranatti, J.S., Paruti, M.N., Sravanthi, J. and Vafaeva, K.M. (2024) Comparative Study of Basalt Fiber and Steel Fiber as Additives to Concrete. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, **392**, 01009. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/202439201009>.
- 111 Vafaeva, Kh.M. and Zegait, R. (2023) Wastewater Treatment Revolution: Efficiency and Benefits of Carbon Nanotubes. Информационные Системы и Технологии АПК и ПГС, Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова, Курск, 223–243. <https://doi.org/10.47581/2023.FM-03.VAFAEVA-02>.
- 112 Kirsanova, T.A., Shchetnikov, A.V., Yakupov, S.Z., Vafaeva, Kh.M. and Shinkareva, M.K. (2023) Variants of Pipeline Assemblies Made of Composite Materials and Their Connections and Technological Units. *AlfaBuild*, **28**, 2804–2804. <https://doi.org/10.57728/ALF.28.4>.
- 113 Vafaeva, Kh.M. and Kordas, G. (2023) Engineering Polymer Systems with Self-Healing Functionality to Enhance Structural Longevity. *AlfaBuild*, **29**, 2913–2913. <https://doi.org/10.57728/ALF.29.13>.
- 114 Vafaeva, Kh.M., Júnior, J.F. de O. and Pizzo, H. da S. (2023) Fractal Aspects in the Technology of Self-Healing Materials. *AlfaBuild*, **29**, 2911–2911. <https://doi.org/10.57728/ALF.29.11>.
- 115 Machado, M.A., Antin, K.N., Rosado, L.S., Vilaça, P. and Santos, T.G. (2019) Contactless High-Speed Eddy Current Inspection of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier Ltd, **168**, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.021>.
- 116 Boccardi, S., Boffa, N.D., Carlomagno, G.M., Del Core, G., Meola, C., Russo, P. and Simeoli, G. (2019) Inline Monitoring of Basalt-Based Composites under Impact Tests. *Composite Structures*, Elsevier Ltd, **210**, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.038>.
- 117 Ilangoan, S., Senthil Kumaran, S., Naresh, K., Shankar, K. and Velmurugan, R. (2023) Studies on Glass/Epoxy and Basalt/Epoxy Thin-Walled Pressure Vessels Subjected to Internal Pressure Using Ultrasonic ‘C’ Scan Technique. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd, **182**. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110160>.
- 118 Mandelbrot, B.B. (1975) *Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension*. Flammarion, Paris.
- 119 Krause, E.F. (1987) *Taxicab Geometry: An Adventure in Non-Euclidean Geometry*. Dover Publications, New York.
- 120 Лобачевский, Н.И. (1946) *Полное Собрание Сочинений*. Гостехиздат.
- 121 Benoit B. Mandelbrot. (1983) *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, San Francisco, 480.
- 122 Feder, J. (1988) *Fractals*. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>.
- 123 Смирнов, Б.М. (1991) *Физика Фрактальных Кластеров*. Наука.
- 124 Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.ZH. and Oksogoev, A.A. (1994) *Sinergetika i Fraktaly v Materialovedenii [Synergetics and Fractals in Materials Science]*. Academic Scientific Publishing, Production, Printing and Book Distribution Center of the Russian Academy of Sciences “Nauka Publishing House,” 183. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23691507>.
- 125 Пьетронеро, Л. and Тозатти, Э. (1988) *Фракталы в физике: Труды VI Международного*

- симпозиума по фракталам в физике (МЦТФ, Триест, Италия, 9-12 Июля, 1985). Мир, 672.
- 126 Sabri, M.M.S., Vatin, N.I., Nurmukhametov, R.R., Ponomarev, A.B. and Galushko, M.M. (2022) Vertical Fiberglass Micropiles as Soil-Reinforcing Elements. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 2592, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 2592. <https://doi.org/10.3390/MA15072592>.
 - 127 Sabri, M.M.S., Vatin, N.I., Ponomarev, A.B., Nurmukhametov, R.R. and Kostyukov, I.I. (2022) Settlement of Soil Reinforced with Vertical Fiberglass Micro-Piles. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 4744, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 4744. <https://doi.org/10.3390/MA15144744>.
 - 128 Nurmukhametov, R. and Vatin, N.I. (2022) Fiberglass Micro Pile Reinforcing Soft Clays. figshare. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.21508041.V1>.
 - 129 Большаков, В.И., Волчук, В.Н., Дубров, Ю.И. (2013) Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации. *Металознавство та термічна обробка металів.*, **4**, 5–11.
 - 130 Дубров, Ю., Большаков, В., Волчук В. (2015) Пути индентификации периодических многокритериальных технологий: Монография. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing.
 - 131 Литвинова, И.В., Протасьев, В.Б., Плахотникова, Е.В. (2010) Планирование эксперимента как метод анализа инструментальных систем. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.*, **4**, 78–85.
 - 132 Renyi, A. (1970) Probability Theory. North-Holland Pub. Co., Amsterdam, The Netherlands.
 - 133 Сидняев, Н.И. and Вилисова, Н.Т. (2011) Введение в теорию планирования эксперимента. Москва, МГТУ Им. Баумана, 2011, 463.
 - 134 Сабри, М.М.С. (2020) Усиление оснований и регулирование осадок зданий расширяемой полиуретановой смолой: специальность 05.23.02 “Основания и фундаменты, подземные сооружения”: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. <https://search.rsl.ru/ru/record/01010254687>.
 - 135 Баренблатт, Г.И. (1976) Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. *Изв. вузов. Радиофизика*, **19**, 902–931. <https://search.rsl.ru/ru/record/01007767968>.
 - 136 Божокин, С.В., Паршин, Д.А. (2001) Фракталы и мультифракталы. НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика,” Ed., Ижевск.
 - 137 Dubrov, Yu.Y., Bolshakov, V. and Volchuk, V. (2016) Fractals and Properties of Materials.
 - 138 Anitas, E.M., Marcelli, G., Szakacs, Z., Todoran, R. and Todoran, D. (2019) Structural Properties of Vicsek-like Deterministic Multifractals. *Symmetry* 2019, Vol. 11, Page 806, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **11**, 806. <https://doi.org/10.3390/SYM11060806>.
 - 139 Nian, D. and Fu, Z. (2019) Extended Self-Similarity Based Multi-Fractal Detrended Fluctuation Analysis: A Novel Multi-Fractal Quantifying Method. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Elsevier, **67**, 568–576. <https://doi.org/10.1016/J.CNSNS.2018.07.034>.
 - 140 Duan, Q., An, J., Mao, H., Liang, D., Li, H., Wang, S. and Huang, C. (2021) Review about the Application of Fractal Theory in the Research of Packaging Materials. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 860, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 860. <https://doi.org/10.3390/MA14040860>.
 - 141 Volchuk, V.M., Uzlov, O. V., Puchikov, O. V. and Ivantsov, S. V. (2021) Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic Inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **1021**, 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012053>.
 - 142 Zhang, P., Ding, J., Guo, J. and Wang, F. (2024) Fractal Analysis of Cement-Based Composite Microstructure and Its Application in Evaluation of Macroscopic Performance of Cement-Based

- Composites: A Review. *Fractal and Fractional* 2024, Vol. 8, Page 304, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **8**, 304. <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT8060304>.
- 143 Ilgaz, A. and Bayırlı, M. (2024) Fractal Characterization for Conductivity Mechanism of Single-Walled Carbon Nanotube Doped Composites. *Indian Journal of Physics*, Springer, **98**, 1335–1341. <https://doi.org/10.1007/S12648-023-02916-4/FIGURES/6>.
- 144 Lü, Q., Qiu, Q., Zheng, J., Wang, J. and Zeng, Q. (2019) Fractal Dimension of Concrete Incorporating Silica Fume and Its Correlations to Pore Structure, Strength and Permeability. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **228**, 116986. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.116986>.
- 145 Hausdorff, F. (1918) Dimension Und Äußeres Maß. *Mathematische Annalen*, Springer-Verlag, **79**, 157–179. <https://doi.org/10.1007/BF01457179/METRICS>.
- 146 Щелокова, М.А., Слободян, С.Б., Дырда, В.И. (2018) Фрактальный подход к механике разрушения твердых тел. *Геотехническая механика*, **138**, 227–259. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/158693>.
- 147 Миклашевич, И.А. (2003) Микромеханика разрушения в обобщенных пространствах. Минск: Логвинов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Акт стендовых испытаний образца из базальтопластика



ООО «ТНГ-Групп»
Научно-техническое управление
Метрологический центр

АКТ
стендовых испытаний
образца трубы из базальтопластика
 (наименование оборудования)

« 21 » июня 2018 г.

г. Бугульма

Комиссия в составе:

1. Сидушкин А.В. - Начальник МЦ НТУ ООО «ТНГ-Групп»
2. Аскарров Ф.В. - Начальник ЛСО МЦ НТУ ООО «ТНГ-Групп»
3. Комлык Е.В. - Вед. инженер-конструктор ТГ «Генавигация»
 (Ф.И.О., должность)

Произвела испытания на прочность и устойчивость при одновременном воздействии температуры и давления с использованием установки испытания скважинных приборов УИСП-ДТ 6.5 (протокол периодической аттестации испытательного оборудования № 6-5813676 от 15.02.18 г. по ГОСТ Р 8.568-97):

образца трубы из базальтопластика
(образец № 1)
 (наименование оборудования, приспособлений, шифр)

принадлежащего: НТУ ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма**В результате испытания установлено:**

При воздействии температуры $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давления $P=81,93\text{ МПа}$ произошло резкое падение давления. После извлечения образца из камеры высокого давления, при визуальном осмотре обнаружено разрушение стенок трубы.

Комиссия считает

образец трубы из базальтопластика
(образец № 1)
 (наименование оборудования, приспособлений, шифр)

не выдержавшим испытания на воздействие температуры и давления.

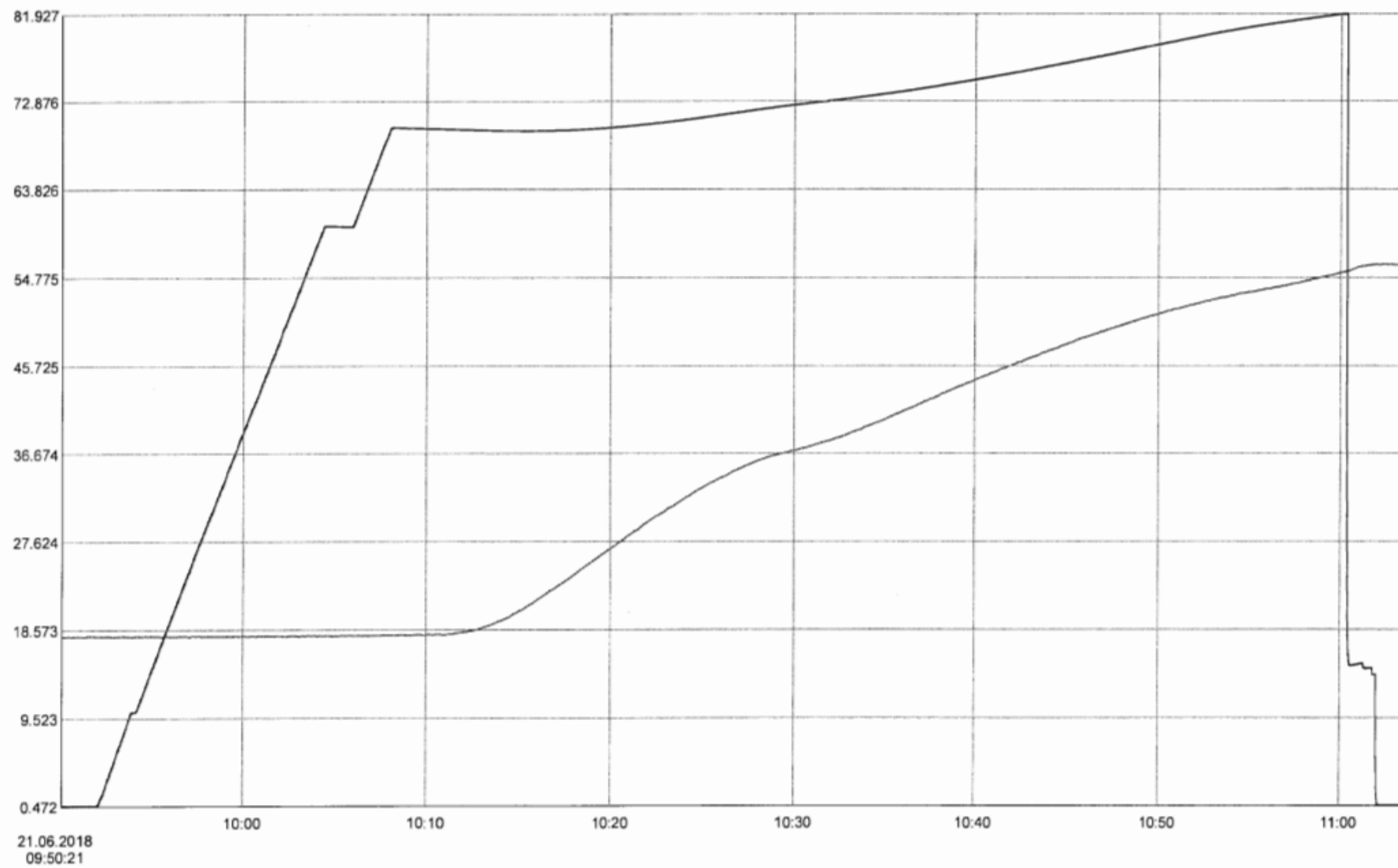
Приложение: График изменения температуры и гидростатического давления в камере УИСП-ДТ.

Подписи: 1.



_____ Сидушкин А.В.

_____ Аскарров Ф.В.



Испытания на прочность и герметичность при одновременном воздействии температуры и давления образца трубы из базальтопластика

Приложение Б. Протокол испытаний труб кольцевых стеклопластиковых

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ
СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИМСС УРО РАН)
ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ИМСС
г. Пермь, ул. Королева, 1**

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ 1133 от 9 ноября 2015 г.

Основание для проведения испытаний договор 019/15 от 2 ноября 2015 г. с ООО ТД «Базальтовые трубы»

Наименование продукции: Трубы кольцевые стеклопластиковые

Испытания на соответствие: ГОСТ Р 55068-2012

Производитель продукции: ООО ТД «Базальтовые трубы»

Предъявитель образцов: ООО ТД Базальтовые трубы»

Юридический адрес: 127287, г. Москва, Петровско-Разумовский пр-д, дом 29, стр. 4

Описание образцов: Кольца и полосы, вырезанные в осевом (средняя площадь поперечного сечения $15 \times 15 = 225 \text{ мм}^2$) и окружном (средняя площадь поперечного сечения $15 \times 15 = 225 \text{ мм}^2$) направлениях из трубы Ду 297х15,

Дата получения образцов: 3.11.2015 г.

Дата испытаний: 4-9.11.2015 г.

Регистрационные данные ИЛ образца: 019/15

Методики испытаний: 54925-2012 (в окружном направлении), ГОСТ Р 54924-2012 (в осевом направлении),

Результаты испытаний: приведены в приложении 1.

Руководитель ИЛ



В.Н.Ковров

Приложение № 1 к протоколу испытаний №1133 от 9 ноября 2015 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ
на растяжение труб стеклопластиковых Ду 297х15 производства ООО ТД «Базальтовые трубы»

Сведения об образцах		Дата испытаний	Измеряемый показатель (ИП), единица измерения	Обозначение НД на продукцию	Обозначение НД на методы испытаний	Значения по ГОСТ Р 55068-2012	Результаты испытаний		Примечания
№ регистрации ИЛ	Дата изготовления						Единичные значения	Среднее значение	
019/15	ноябрь 2015 г.	4-9.11.2015 г.	Максимальное напряжение при растяжении в окружном направлении , МПа, при температуре 22° С (нагрузка 100 кН)	ГОСТ Р 55068-2012	ГОСТ Р 54925-2012	345 – 460	Все 222	222	Расслоение и разрушение отсутствуют
			Максимальное напряжение при растяжении в окружном направлении , МПа, при температуре минус 50° С (нагрузка 100 кН)		ГОСТ Р 54925-2012	345 – 460	Все 222	222	Расслоение и разрушение отсутствуют
			Предел прочности при растяжении в осевом направлении , МПа, при температуре 22° С		ГОСТ Р 54924-2012	190 – 300	277; 268; 280; 287; 278	278	Образцы разрушились
			Предел прочности при растяжении в осевом направлении , МПа, при температуре минус 50° С		ГОСТ Р 54924-2012	190 – 300	308; 318; 296; 285; 301	306	Образцы разрушились

Исполнитель



В.П. Золотухин

Приложение В. Протокол испытания на сжатие стеклопластика



**ПЕРМСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**
Классика будущего

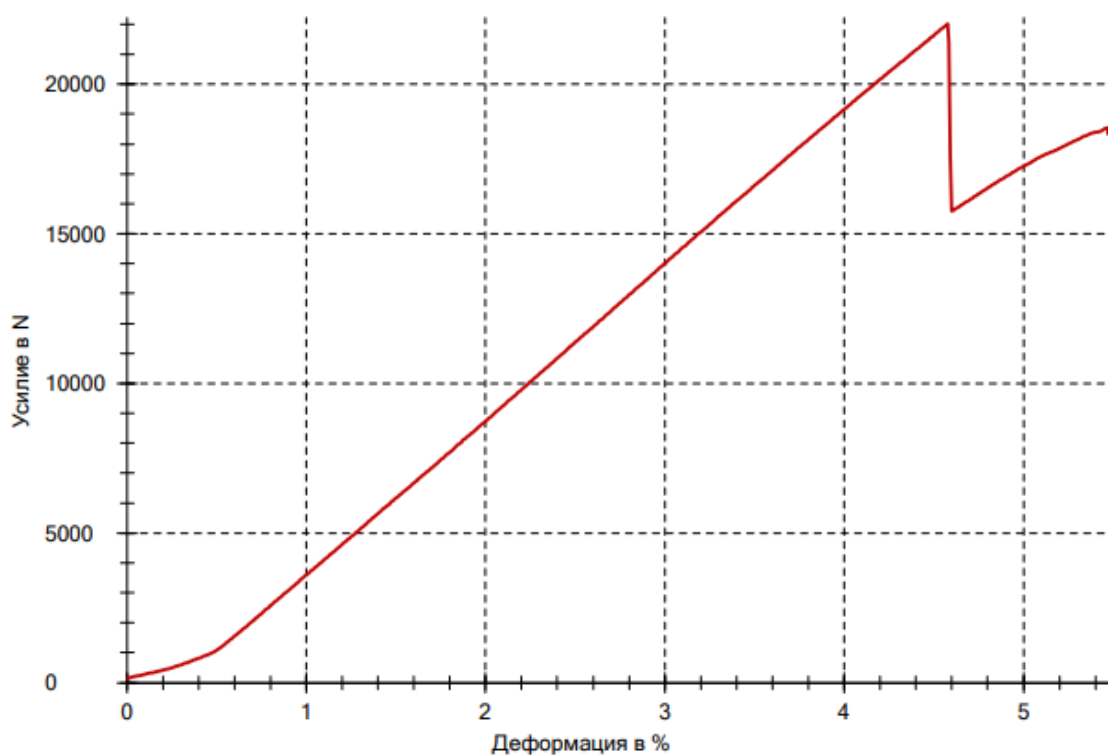
Протокол испытания на сжатие

Заказчик : ООО "ТД "Базальтовые трубы", ИНН 7713592553
 Материал : Стеклопластик
 Тип образца : Кольцо
 Производитель : ООО "ТД "Базальтовые трубы", ИНН 7713592553
 Оператор : Мерзляков А.Ф.
 Данные машины : ZWICK Z-250 Зав.№ 178457. Датчик силы XForce HP 250 кН, зав.№ 178458

Результаты испытания:

Nr	F _{max} N	F(3 %) N	d _i mm	L mm
1	22012.23	14012.14	150.0	109.5

График серии:



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ХИМПРОМ»

Технологический отдел СГТ	УТВЕРЖДАЮ Начальник ТО СГТ  Н.В. Хитров «09» 02 2022 г.
---------------------------	--

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по химической стойкости образцов из стеклобазальта в среде сточных вод колодца № 166 цеха 110.

Рег. № 25373 от 09.02.2022

Работа выполнена по заявке проектного офиса «Реновация-2» (служ. 18168).

В технологический отдел СГТ для испытаний в среде сточных вод колодца № 166 цеха 110 представлены 3 образца из стеклобазальта в виде колец (отрезков трубы) размерами:

внешний диаметр ≈ 73 мм
 внутренний диаметр ≈ 50 мм
 ширина (высота) ≈ 40 мм.

В колодец № 166 цеха 110 сливаются сточные воды из отделения очистки рассола (в основном шламовая суспензия с осветлителей соли); непрерывно кислые сточные воды из дехлоратора хлорной воды (содержание хлора до 40 мг/дм³); кислые стоки из отделения осушки хлоргаза; периодически производится слив отработанной серной кислоты с концентрацией (76-78) %, предварительно разбавленной водой. Так же в него поступают сточные воды со стороны цеха 53 с pH ~ 12 , содержащие гипохлорита натрия.

Промышленные испытания образцов проводили путем их полного погружения в колодец № 166 на проволоке из ЭП 567.

Продолжительность испытаний составила 2230 часов (93 сут.). Температура испытаний соответствовала рабочей температуре сточных вод, обращающихся в канале колодца № 166. Точность взвешивания массы образцов $\pm 0,0001$ г.

Определение химической стойкости проводили по изменению массы образцов и по изменению их внешнего вида после выдержки в испытываемой среде /1/. Результаты испытаний приведены в таблице №1 (см. далее).

Выводы

1. Из представленных в таблице № 1 данных, полученных в результате промышленных испытаний видно, что при продолжительности испытаний 93 суток (2230 часов) и рабочей температуре сточных вод колодца № 166 цеха 110 изменение массы образцов составило менее 3,0 % масс., при допустимой норме не более $\pm 5\%$ масс:

2. Внешний вид образцов (форма, размеры, структура на срезе) после испытаний практически без изменений. Изменился цвет поверхностей образцов с серо-зеленого на черно-зеленый.

Заключение.

1. За время испытаний 93 суток образцы из стеклобазальта в среде сточных вод колодца № 166 цеха 110 химически стойки.

2. Прочностные характеристики образцов и их изменение в процессе испытаний не определялись.

Приложение Г. Внедрение результатов диссертационной работы в ООО «МЕПОС»

СПРАВКА
о внедрении результатов диссертационной работы
Вафаевой Х.М.
«Композитные материалы для стеклобазальтопластиковых труб с
повышенными эксплуатационными характеристиками»

На основании диссертационной работы Вафаевой Христины Максудовны, выполненной по теме ««Композитные материалы для стеклобазальтопластиковых труб с повышенными эксплуатационными характеристиками», проведено внедрение научных результатов в производственную деятельность ООО «МЕПОС».

Сведения о внедренных результатах:

1. Внедрен метод прогнозирования механических характеристик труб на основе анализа фрактальной размерности. Это позволило сократить объем лабораторных испытаний на 35%, сохранив высокую точность прогнозов (погрешность не превышает 7%).
2. Оптимизирован размер ячеек силового каркаса при производстве труб, что обеспечило возможности улучшения механических характеристик.
3. Внедрена технология структурного мониторинга на основе фрактального подхода, позволяющая оперативно выявлять зоны возможного разрушения труб в процессе эксплуатации.

Эффекты внедрения:

1. Сокращение производственных затрат за счет уменьшения брака на 12%.
2. Повышение срока службы продукции в условиях агрессивных сред.
3. Улучшение конкурентоспособности предприятия на рынке композитных материалов.

Технический директор
ООО «МЕПОС»



Петров Ю. М.

Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024688390

«Structure Fractal Analyzer»

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (RU)**

Авторы: **Вафаева Христина Максудовна (RU), Карпов Денис Федорович (RU), Фролова Анастасия Анатольевна (RU)**



Заявка № 2024686872

Дата поступления 11 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 ноября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение Е. Внедрение результатов диссертационной работы в ООО «ГидроИзолГрупп»



Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Лиговский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 140/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

О внедрении математических моделей для прогнозирования характеристик стеклобазальтопластиковых труб, предложенных Вафаевой Х.М.

С целью повышения точности прогнозирования характеристик продукции, оптимизации проектных решений и внедрения современных инструментов математического моделирования.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Внедрить модели в процесс разработки технической документации.
2. Начальнику ИТ-отдела Герасимову А. А. обеспечить интеграцию моделей в производственные системы.
3. Подготовить отчет об эффективности применения моделей через 6 месяцев.
4. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
5. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.



**Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»**

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Лиговский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 133/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

О внедрении Метода для мониторинга зон разрушения труб в процессе эксплуатации с использованием фрактальной размерности в качестве индикатора трансформаций деформационного рельефа.

С целью улучшения контроля качества продукции на всех стадиях эксплуатации, оперативного выявления дефектов и снижения затрат на ремонтные работы за счет использования фрактального анализа.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Сделать обязательным применение Метода для мониторинга зон разрушения труб в процессе эксплуатации с использованием фрактальной размерности в качестве индикатора трансформаций деформационного рельефа согласно рекомендациям и разработкам Вафатовой Х.М.
2. Главному технологу Уханову А. В. внести необходимые изменения в Технологический регламент.
3. Начальнику производства Созину К. С. разработать инструкции для специалистов и провести обучение персонала по применению Метода для мониторинга зон разрушения труб в процессе эксплуатации с использованием фрактальной размерности в качестве индикатора трансформаций деформационного рельефа.
4. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
5. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.

(расшифровка подписи)



Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Лиговский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 136/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

О внедрении метода оптимизации состава композитных материалов для производства стеклобазальтопластиковых труб, предложенного Вафасовой Х.М., и совершенствовании процесса проектирования и контроля качества продукции.

С целью улучшения эксплуатационных характеристик композитных материалов, повышения экономической эффективности производства и снижения издержек на этапе тестирования продукции.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Утвердить методику подбора состава композитных материалов на основе рекомендаций Вафасовой Х.М. для получения труб с требуемыми физико-механическими характеристиками.
2. Начальнику отдела технологического контроля Кирильцевой Н. С. разработать технические инструкции по применению методики.
3. Начальнику производственного отдела Лысюку И. В. внедрить в производственные процессы новые составы материалов, соответствующие рекомендациям.
4. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
5. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.
(расшифровка подписи)



Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Лиговский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 135/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

**О внедрении Метода прогнозирования долговечности стеклобазальтопластиковых труб
на основе фрактального анализа.**

В целях повышения надежности выпускаемой продукции, минимизации рисков преждевременного выхода труб из строя и обеспечения оптимального уровня затрат на их эксплуатацию.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Отделу контроля качества внедрить в систему контроля качества метод прогнозирования остаточного ресурса труб на основе анализа фрактальной размерности их структуры согласно рекомендациям и разработкам Вафаевой Х.М.
2. Главному технологу Уханову А. В. внести изменения в технологический регламент производства, предусматривающие обязательный контроль фрактальной размерности структуры труб. Разработать корректирующие действия в случае выявления отклонений от заданных значений фрактальной размерности.
3. Главному механику Уляницкому С. А. использовать результаты прогнозирования долговечности для планирования ремонтных работ и оптимизации графиков технического обслуживания.
4. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
5. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.
(расшифровка подписи)



Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Лиговский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 132/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

О внедрении Метода подбора и оптимизации входных параметров при производстве изделий (из стеклобазальтопластика) Вафаевой Х.М., позволяющих получить изделие с заданным сочетанием свойств и определения оптимального баланса свойств и внесении изменений в порядок проектирования и контроль качества готовой продукции – стеклобазальтопластиковых труб.

В целях повышения эффективности производства и обеспечения выпуска стеклобазальтопластиковых труб с заданными эксплуатационными характеристиками, минимизации временных и материальных затрат на испытания, а также оптимизации контроля качества продукции.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Сделать обязательным обоснование требуемых эксплуатационных характеристик для производства изделий из стеклобазальтопластика с применением Метода подбора и оптимизации входных параметров при производстве изделий из стеклобазальтопластика требуемого качества и с заданным комплексом характеристик, согласно рекомендациям и разработкам Вафаевой Х.М.
2. Директору по развитию Исмаилову А. М. разработать инструкция по применению Метода подбора и оптимизации входных параметров при производстве изделий (из стеклобазальтопластика) для производства изделий из стеклобазальтопластика требуемого качества и с заданным комплексом характеристик.
3. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
4. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.
(расшифровка подписи)



Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Линовский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 134/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

**О внедрении Метода прогнозирования долговечности стеклобазальтопластиковых труб
на основе фрактального анализа.**

В целях повышения надежности выпускаемой продукции, минимизации рисков преждевременного выхода труб из строя и обеспечения оптимального уровня затрат на их эксплуатацию.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Отделу контроля качества внедрить в систему контроля качества метод прогнозирования остаточного ресурса труб на основе анализа фрактальной размерности их структуры согласно рекомендациям и разработкам Вафаевой Х.М.
2. Главному технологу Уханову А. В. внести изменения в технологический регламент производства, предусматривающие обязательный контроль фрактальной размерности структуры труб. Разработать корректирующие действия в случае выявления отклонений от заданных значений фрактальной размерности.
3. Главному механику Уляницкому С. А. использовать результаты прогнозирования долговечности для планирования ремонтных работ и оптимизации графиков технического обслуживания.
4. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
5. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.
(расшифровка подписи)



Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Лиговский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 137/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

О внедрении метода контроля качества стеклобазальтопластиковых труб с использованием фрактального анализа, разработанного Вафяевой Х.М.

С целью повышения точности контроля характеристик продукции, оптимизации производственного процесса и минимизации затрат на контрольные испытания.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Директору по развитию Исмаилову А. М. организовать обучение сотрудников методам фрактального анализа.
2. Установить обязательное применение фрактального подхода при проверке соответствия труб техническим требованиям.
3. Начальнику производства Созину К. С. разработать инструкции по эксплуатации нового оборудования для анализа фрактальных характеристик.
4. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
5. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.
(расшифровка подписи)



ГидроИзолГрупп

Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Липовский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 141/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

**О включении фрактального анализа в систему производственного контроля
стеклобазальтопластиковых труб.**

С целью повышения эффективности производственного контроля,
улучшения качества продукции и минимизации затрат на контрольные
испытания.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Пересмотреть протоколы тестирования продукции с учетом методов Вафаевой Х.М.
2. Обучить специалистов отдела контроля качеству методам анализа.
3. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
4. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.



Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Лиговский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 139/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

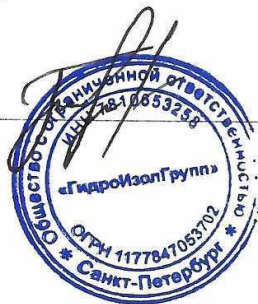
**О применении нового метода управления структурообразованием
стеклобазальтопластиковых труб, разработанного Вафаевой Х.М.**

С целью повышения точности управления структурообразованием труб
для достижения заданных эксплуатационных характеристик продукции.

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Обеспечить использование оптимизированных технологических параметров в производственных процессах.
2. Утвердить новые рецептуры композитов, предложенные Вафаевой Х.М., в производственном регламенте.
3. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
4. Контроль за исполнением приказа оставляю за собой.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.



ГидроИзолГрупп

Общество с ограниченной ответственностью
«ГидроИзолГрупп»

196006, г. Санкт-Петербург, муниципальный округ Московская застава,
пр-кт Лиговский, д. 270, Литера Б, помещ. 2203

ПРИКАЗ № 138/11

« 10 » ноября 20 24 г.

О внедрении результатов
диссертационного исследования
в организации

О внедрении метода мониторинга зон разрушения труб, предложенного Вафаевой Х.М.,
в производственную практику.

В целях обеспечения своевременного выявления зон разрушения труб в
процессе эксплуатации, улучшения качества продукции и оптимизации затрат на
техническое обслуживание

ПРИКАЗЫВАЮ

1. Ввести в эксплуатацию систему мониторинга зон разрушения труб на основе фрактального анализа.
2. Директору по развитию Исмаилову А. М. организовать обучение специалистов принципам работы с системой.
3. Обеспечить регулярный мониторинг продукции в процессе эксплуатации.
4. Приказ довести до сведения персонала предприятия.
5. Ответственность за реализацию поручений возложить на главного инженера.

Генеральный директор



Гасанов Д. Х.

(расшифровка подписи)