



ПОЛИТЕХ

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

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

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ватин Николай Иванович

Официальные
оппоненты: **Сулейманов Альфред Мидхатович**, доктор
технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Строительные материалы»
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет».
Королев Александр Сергеевич, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
«Строительные конструкции и сооружения»
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет (национальный
исследовательский университет)».

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет» (НИУ МГСУ).**

Защита состоится 10 апреля 2025 г. на заседании диссертационного совета У 2.1.5.50, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29, Научно-исследовательский корпус, аудитория Г.3.56), в 15:00.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д.В. Немова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 в области композитных материалов демонстрируют существенное продвижение в изучении их свойств, а также в разработке методов прогнозирования их эксплуатационных и физико-механических характеристик [1–4]. 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 [5–12] создает новые возможности в прогнозировании свойств композитов, позволяя количественно описать их неоднородность, иерархичность и устойчивость к деформациям. Однако, 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 работы. 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.

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.

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.

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.

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 $2.0 > D_{200}/D_{-200}$.

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.

Теоретическая и практическая значимость работы. Выполненный большой объем экспериментальных исследований является 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.

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% стекловолокна, 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/м³.

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

Практическое значение 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.

Методы исследования включают:

- *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.

- *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 объемом 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 международных и всероссийских научно-практических конференциях, межвузовских научных семинарах: «Проблемы военного строительства, военной экономики, финансового и квартирно-эксплуатационного обеспечения ВС РФ» (г. Санкт-Петербург, 2023), «Информационные системы и технологии АПК и ПГС» (г. Курск, 2023), «Морские и речные порты России: инфраструктура, инвестиции» (г. Сочи, 2023), «Материалы и технологии в нефтегазовой отрасли. Коррозия» (г.

Санкт-Петербург, 2024), «Цифровой инжиниринг в гражданском строительстве» (г. Санкт-Петербург, 2024).

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 страницах 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».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проведен комплексный анализ основных характеристик композитных материалов на основе стеклобазальтопластиковых и стеклопластиковых труб. Для повышения эффективности использования композитных труб

предложен научно обоснованный и экспериментально подтвержденный метода управления и прогнозирования механическими свойствами труб, направленный на сокращение объема испытаний, который предполагает всестороннее исследование их состава, строения, дефектов и свойств, с целью установления корреляции между ними.

Методы неразрушающего контроля труб (NDT) приведены на Рисунке 1.

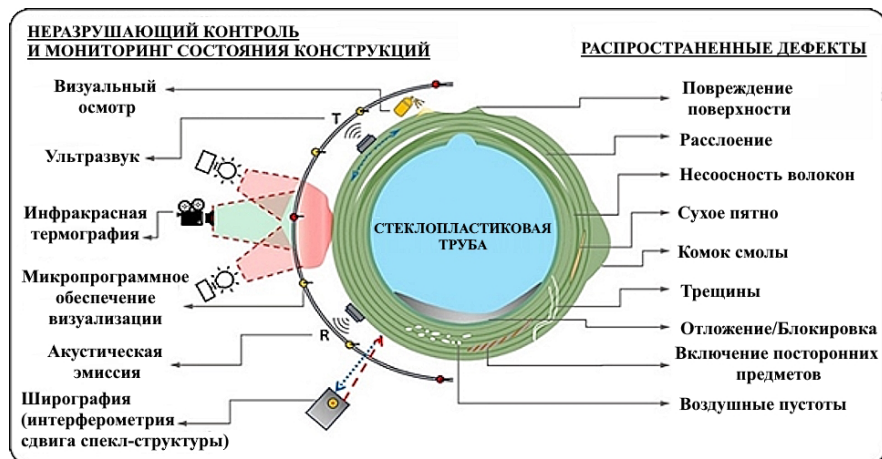


Рисунок 1 - Основные методы неразрушающего контроля композитов из стеклопластика и спектр дефектов согласно стадии их возникновения [13]

Анализ существующих NDT выявил их ограничения [14], [15], [16]:

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 информацию о состоянии объекта контроля и не обеспечивают комплексное решение задач.

Технология производства композитных материалов является сложной и многокритериальной, поэтому затрудняется учёт одновременного влияния множества технологических параметров, состава и структуры материалов. Сложность отладки технологии требует большого объема испытаний механических характеристик изделий и ускорения проведения этих испытаний является актуальной задачей. Существующие экспресс-методы оценки структуры и свойств стеклобазальтопластиковых и

стеклопластиковых труб имеют узкую направленность и не обеспечивает потребности практического применения.

Для определения принадлежности структуры труб к фракталам (Рисунок 2), фрактальная размерность D вычислялась по формуле Хаусдорфа-Безиковича (1):

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \left(\frac{\ln(N(\delta))}{\ln(\delta)} \right), \quad (1)$$

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

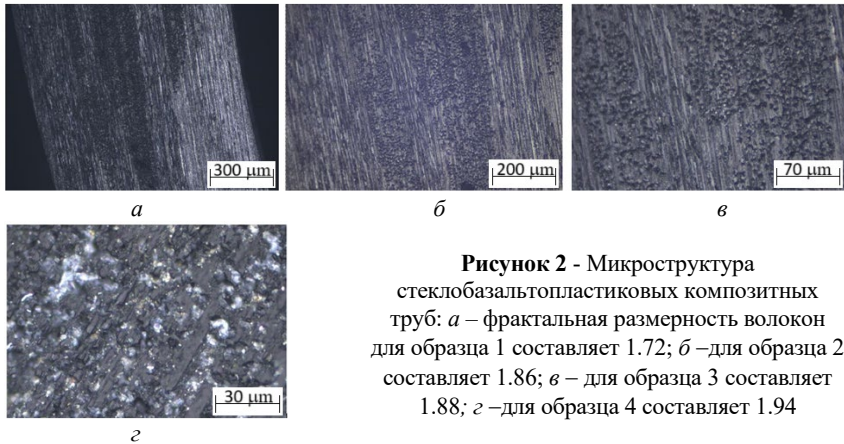


Рисунок 2 - Микроструктура стеклобазальтопластиковых композитных труб: *а* – фрактальная размерность волокон для образца 1 составляет 1.72; *б* – для образца 2 составляет 1.86; *в* – для образца 3 составляет 1.88; *г* – для образца 4 составляет 1.94

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.

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 3 демонстрирует общий вид стеклобазальтопластиковых труб.



Рисунок 3 - Общий вид стеклобазальтопластиковых труб

В изготовлении стеклобазальтопластиковых труб использовались:

- 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. Использовалась эпоксидная смола KER 828 с отвердителем ИЗОМТГФА и ускорителем Алкофен. Примерное соотношение компонентов по массе: 70% стеклоровинг, 30% связующее. В связующем соотношение смолы к ИЗОМТГФА по весу — 100/80.

Механические испытания образцов-пластинок проводились на разрывной машине Zwick//Roell Z050 при скорости перемещения траверсы 2 мм/мин.

В качестве выходных данных для механических испытаний образцов-пластинок оболочек рассчитывались осевая прочность σ (2), модуль упругости при растяжении образцов, величина относительного удлинения.

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

где F – максимальная растягивающая сила, Н; a – площадь поперечного сечения, мм².

Результаты механических испытаний приведены в Таблице 1. Образцы для испытаний были изготовлены следующие: кольца и полоски, вырезанные в осевом (средняя площадь поперечного сечения составила $15 \times 15 = 225$ мм²) направлениях из трубы Ду 297х15. Образцы-пластинки испытывались по ГОСТ Р 54924–2012 (в осевом и окружном направлениях).

Таблица 1 - Механические свойства стеклопластиковых труб

Образец	Осевая прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Относительное удлинение, %
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

Из Таблицы 1 следует, что существует некоторый разброс данных по испытаниям, что инициирует разработку метода прогноза для минимизации элемента случайности. Наблюдался V-образный характер разрушения у некоторых образцов стеклопластиковых труб (Рисунок 4).

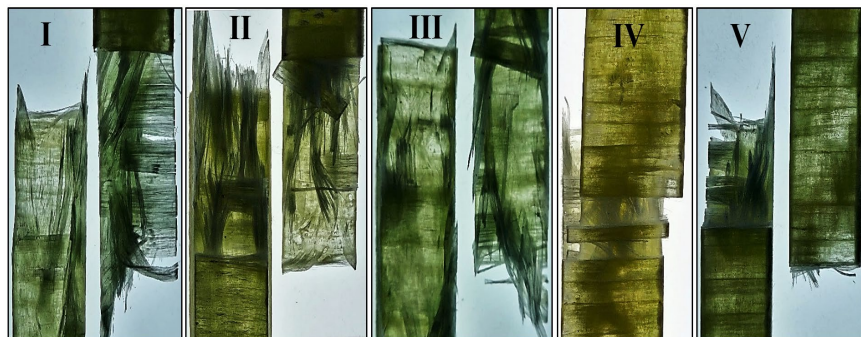
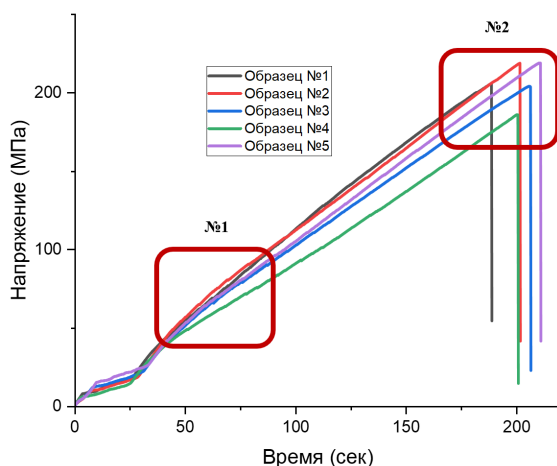


Рисунок 4 - Зоны разрушения образцов

В процессе испытаний образцов-пластинок 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 5, №1). С приближением к осевой прочности материала труб частота щелчков снижалась (Рисунок 5, №2).



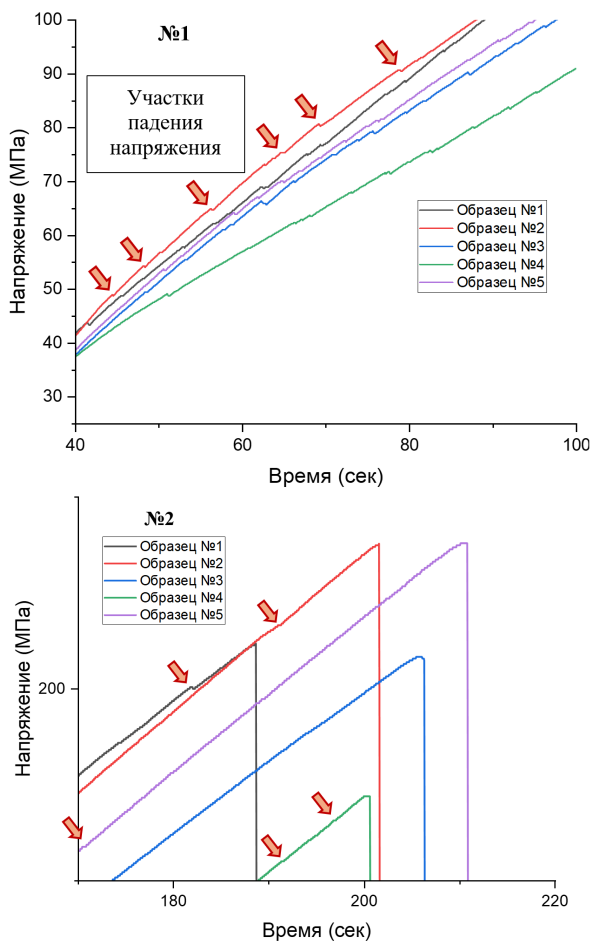


Рисунок 5 - Скачкообразные падения напряжения в процессе растяжения

В материале отмечалось 4 типа разрушения: хрупкое разрушение поверхностных слоёв, горизонтальное разрушение продольно направленных волокон, продольное разрушение поперечно ориентированных волокон, боковое разрушение слоёв, ориентированных под углом.

Экспериментальные исследования, направленные на установление рациональных границ варьирования рецептурно-технологических факторов (содержания стеклоровинга и связующего, диаметра волокна) для выпуска труб с повышенными механическими свойствами, включают:

1. Определение рабочей области рецептурно-технологических факторов.

2. Установление ранее неисследованной части рабочей области значений рецептурно-технологических факторов, которая включает управляемые переменные и их численные значения, при которых свойства достигают требуемых значений.

3. Определение области сочетания критериев качества стеклобазальтопластиковых труб, в которой критерии достигают требуемого сочетания.

4. Проведение оценки свойств с использованием теории фракталов.

Репрезентативная выборка за 20-летний период эксплуатации данной технологии позволила реализовать пассивный эксперимент и получить аппроксимационные уравнения, описывающие рабочую область управляемых переменных и свойств стеклобазальтопластиковых труб. Относительная погрешность между экспериментальными и расчетными значениями: для предела прочности на растяжение – 4.70%; для предела прочности на сжатие – 6.82%; модуля упругости – 5.46%. На основании анализа коэффициентов уравнений произведена оценка влияния параметров: X_1 – содержание волокна (ровинга), X_2 – диаметр волокон, X_3 – содержание связующего, X_4 , X_5 – фрактальная размерность волокна и связующего соответственно на свойства (Рисунок 6).

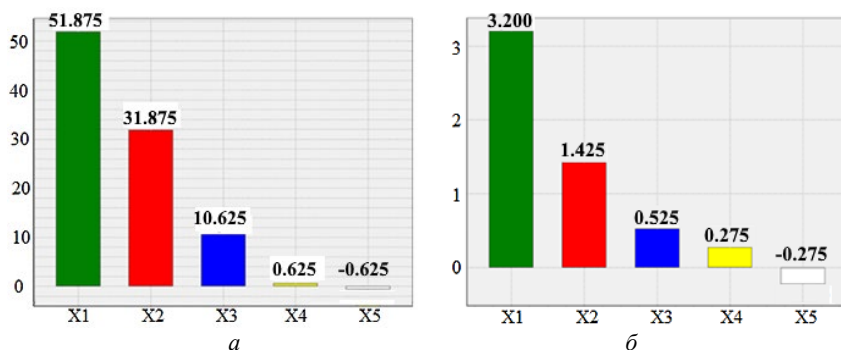


Рисунок 6 - Вес элементов состава и фрактальной размерности структуры при оценке их влияния на прочность при сжатии (а) и на модуль Юнга (б)

Рисунок 7 описывает зависимость прочности и модуля упругости композитных труб от содержания и диаметра базальтовых волокон. Увеличение содержания волокна и их диаметра приводит к возрастанию показателей прочности и модуля упругости.

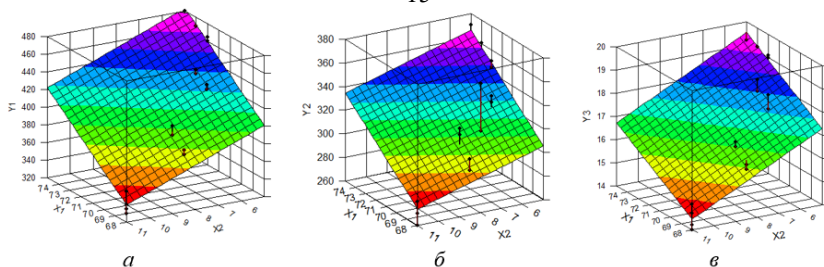


Рисунок 7 - Зависимость прочности на растяжение (а), прочности на сжатие (б), модуля упругости (в) от содержания ровинга – X_1 (%), диаметра волокна – X_2 (мкм)

Для оценки влияния переменных свойства стеклобазальтопластиковых композитных труб использовалась матрица планирования активного эксперимента (Таблица 3), представляющая дробную реплику 2^{5-1} от полного факторного эксперимента. Результаты анализа представлены в матрице в столбцах 8, 10, 12, в которых, Y_{13} , Y_{23} и Y_{33} – экспертные оценки показателей прочности на растяжение в окружном направлении и прочности на сжатие, а также показателей осевого модуля упругости соответственно.

Для реализации матрицы планирования выбраны следующие уровни: 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).

Для получения труб с повышенными механическими свойствами путем установления рациональных границ варьирования рецептурно-технологических факторов (содержания стеклоровинга и связующего, диаметра волокна) была реализована дробная реплика матрицы планирования активного эксперимента (Таблица 2).

В результате получены аппроксимационные уравнения (3-5) прогноза свойств стеклобазальтопластиковых труб $Y_{рас1}$, $Y_{рас2}$, $Y_{рас3}$ в неисследованной ранее части рабочей области (столбцы матрицы 9, 11 и 13).

$$Y_1 = -585.745 \cdot X_0 + 12.500 \cdot X_1 + 6.875 \cdot X_2 + 1.964 \cdot X_3 + 23.962 \cdot X_4 - 25.685 \cdot X_5 \quad (3)$$

Модель адекватна по критерию Фишера $F_{набл} = 1.013$, $F_{крит} = 2.400$ и Кохрена $F_{набл} = 0.334$; $F_{крит} = 0.547$.

$$Y_2 = -295.241 \cdot X_0 + 7.411 \cdot X_1 + 5.313 \cdot X_2 + 1.518 \cdot X_3 + 1.997 \cdot X_4 - 2.140 \cdot X_5 \quad (4)$$

Согласно Фишера $F_{набл} = 1.114$, $F_{крит} = 2.400$ и Кохрена $F_{набл} = 0.349$; $F_{крит} = 0.547$.

$$Y_3 = -19.295 \cdot X_0 + 0.457 \cdot X_1 + 0.237 \cdot X_2 + 0.075 \cdot X_3 + 0.879 \cdot X_4 - 0.942 \cdot X_5 \quad (5)$$

Согласно Фишера $F_{набл} = 1.002$, $F_{крит} = 2.400$ и Кохрена $F_{набл} = 0.336$; $F_{крит} = 0.547$.

Таблица 2 - Дробная реплика матрицы планирования активного эксперимента

Таблица 2 – Прочностные характеристики марганца при растяжении и сжатии при активном эксперименте												
ОУ	68	8.0	25.5	1.709	1.836	Прочность на растяжение 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	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	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
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
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												

На основании анализа результатов активного и пассивного экспериментов, с применением графоаналитического метода, определена область (область сочетания критериев качества стеклобазальтопластиковых труб представляет собой пространство, в котором критерии достигают рационального/требуемого сочетания). Данная область представляет собой зону наложения рабочих областей рецептурно-технологических факторов, в которой можно одновременно прогнозировать значения исследуемых свойств (Рисунок 8). Если существует потребность получения конкретного значения выбранного свойства/характеристики, 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/характеристики.

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

переменных и их предельными численными показателями.

5. Устанавливается масштаб представления фрактальной структуры.

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

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta}, \quad (6)$$

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 , изменяющимся $-\infty$ до $+\infty$.

7. Определяется чувствительность между определяющим параметром и выбранными переменными для построения модели фрактального типа (7):

$$K = \frac{|Y_i - Y_{i+1}|}{|X_i - X_{i+1}|}, \quad (7)$$

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, в этих точках.

8. На основе полученных данных осуществляется выбор метода для формирования модели.

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

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. Для фрактальной размерности эпоксидной составляющей D_f численные значения составили 1.742 при масштабе представления 180 мкм и 1.729 – при масштабе 220 мкм.

Для оценки неоднородности структурных составляющих использовался канонический спектр сингулярностей $f(a)$ (8). Данный спектр представляет собой набор фрактальных размерностей однородных подмножеств исследуемого множества, дающих наибольший вклад в

статистическую сумму $Z(q, \delta)$ при заданных значениях степени q . Для структурной составляющей на микрофотоснимке спектр $f(a)$ определяли с использованием преобразований функции Лежандра $\tau(q)$:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{d\tau}{dq}, \\ f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \end{cases} \quad (8)$$

При вычислении спектра $f(a)$ структуру материала покрывали квадратной сеткой и проводили расчет размерностных оценок D_{-200} и D_{200} . При оценке канонического спектра $f(a)$ рассчитывались 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.

На Рисунке 9 приведены примеры функции $f(a)$ для фотоснимков структуры исследуемых стеклобазальтопластиковых труб, показанных на Рисунке 9 а. Анализ спектра $f(a)$ (Рисунок 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 – $f_{\text{углер.волокон}} = 0.37$.

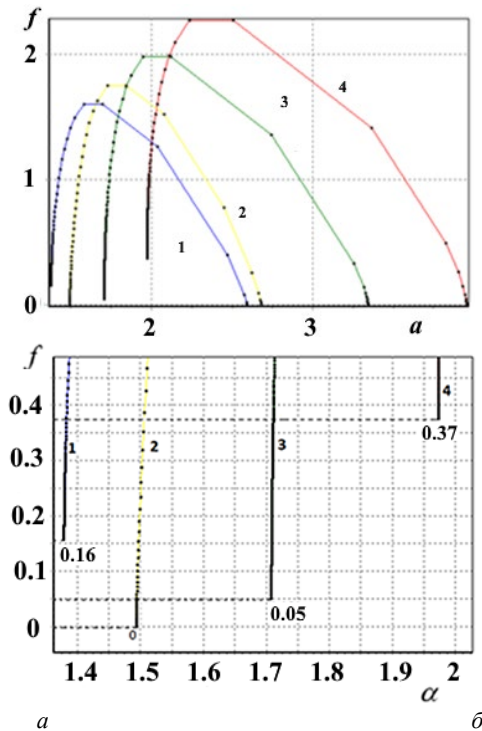
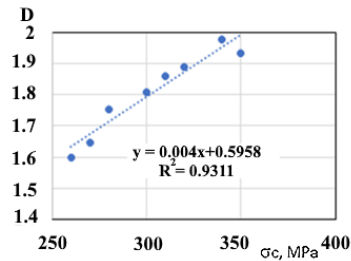


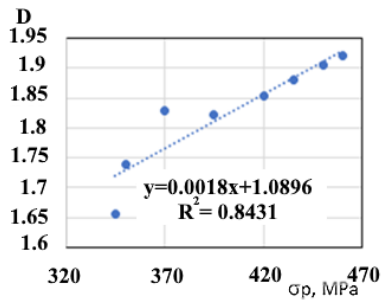
Рисунок 9 – Общий вид функций $f(a)$ для фотоснимков структуры 4 образцов из стеклобазальтопластиковых труб (a); увеличенный фрагмент участка значений функций $f(a)$ (b)

Результаты анализа структуры стеклобазальтопластиковых труб указывают на ее неоднородность, особенно в отношении светлых волокон матрицы труб. Эта неоднородность количественно подтверждается значениями фрактальных размерностей спектра Реньи [18], которые варьируются от 1.500 до 2.670 при $-200 < q < 200$. Графики, показанные на Рисунке 9, демонстрируют эти изменения, что подтверждает принадлежность структур к мультифракталам.

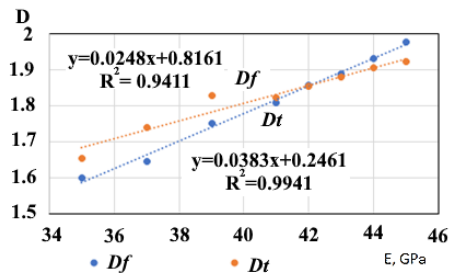
Исследования показали, что характеристики прочности на сжатие, растяжение и упругость труб связаны с их фрактальной размерностью стеклобазальтовых волокон и эпоксидной составляющей (Рисунок 10 а-в).



а)



б)



в)

Рисунок 10 - Соотношения между прочностью на сжатие $K_{с\ c}$, и фрактальной размерностью эпоксидной составляющей (а), прочностью на растяжение $K_{с\ p}$ и фрактальной размерностью волокон (б), пределом упругости E и фрактальными размерностями волокон D_f и эпоксидной составляющей D_t (в)

Дальнейший анализ выявил высокую корреляцию между пределом упругости и фрактальной размерностью как эпоксидной составляющей, так и стеклобазальтовых волокон (Рисунок 10 в). Обнаруженная зависимость объясняется тем, что увеличение компактности заполнения пространства волокнами способствует увеличению адгезии между компонентами

композита и, как следствие, повышению его прочности.

Установлено, что при увеличении фрактальной размерности волокнистой структуры с 1.690 до 1.880 прочность на разрыв возрастает от 190 до 290 МПа.

Анализ фрактограмм стеклопластика показал, что в поверхностных слоях 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.

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

- для зон разрушения фрактальный коэффициент равен $3.0 > D_{200}/D_{-200} > 2.5$;
- для недеформированных однородных областей матрицы стекловолокна – коэффициент равен $2.0 > D_{200}/D_{-200}$.

Рассмотрена экономическая эффективность метода, исходя из аппаратной реализации, точность прогноза свойств труб и калькуляция затрат на натурные испытания. На Рисунке 11 представлена схема разработанного неразрушающего метода экспресс-контроля качества труб.

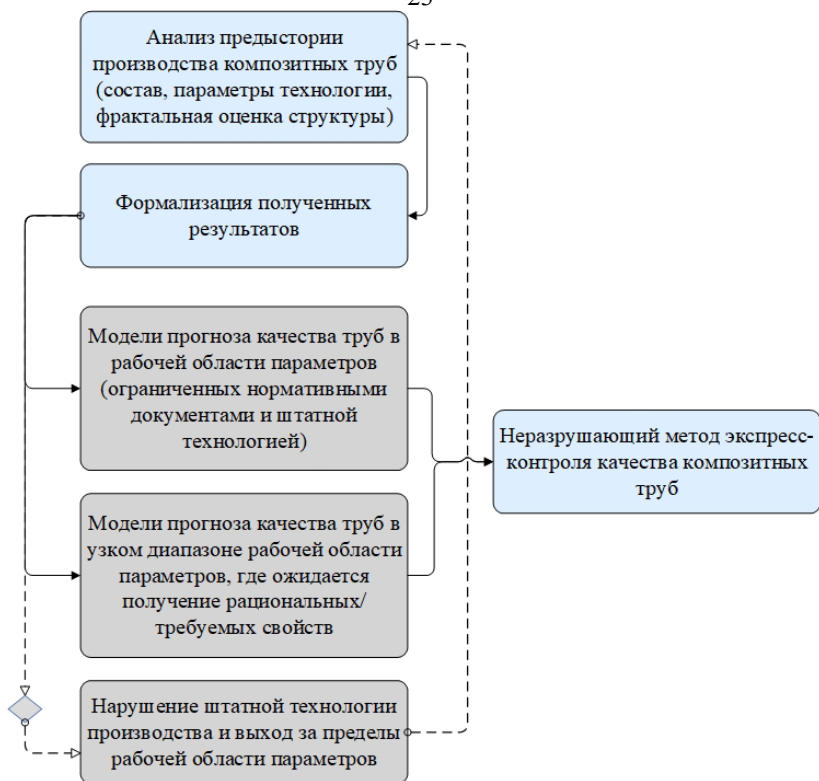


Рисунок 11 - Общая схема разработанного неразрушающего метода экспресс-контроля качества композитных труб

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. 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 цитируемой литературы

1. Strogonov K. et al. Estimation of Practical Significance for Application of Composite Pipes in Comparison with Metal and Polymer Materials // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer Verlag, 2018. Vol. 692. P. 1024–1035.
2. Kychkin A., Tuisov A.G., Kopyrin M. 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, 2022. № 5–2. P. 136–144.
3. Sheets C., Crawford A., Shie T. 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), 2018. Vol. 3.
4. Green M.A., Deaton L., Lazzara C.J. 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), 2012. Vol. 1. P. 577–584.
5. Li Y., Shen A., Wu H. 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, 2020. Vol. 13, № 14. P. 3238.
6. Geng K. et al. 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., 2022. Vol. 55, № 2. P. 1–16.
7. Li D. et al. Fractal characteristics of pore structure of hybrid Basalt–

Polypropylene fibre-reinforced concrete // *Cem Concr Compos.* Elsevier, 2020. Vol. 109. P. 103555.

8. Liu B. et al. Applicability of fractal models for characterising pore structure of hybrid basalt-polypropylene fibre-reinforced concrete // *Reviews on Advanced Materials Science.* Walter de Gruyter GmbH, 2023. Vol. 62, № 1.

9. Zhang J. et al. 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, 2024. Vol. 17, № 7. P. 1706.

10. Stajcic I. et al. Microstructure of Epoxy-Based Composites: Fractal Nature Analysis // *Fractal and Fractional* 2022, Vol. 6, Page 741. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 6, № 12. P. 741.

11. Jiang W. et al. Study on the fractal dimension and evolution of matrix crack in cross-ply GFRP laminates // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* Elsevier, 2020. Vol. 107. P. 102478.

12. Li L. et al. 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, 2021. Vol. 5, № 4. P. 142.

13. Woo K. et al. 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.* 2013.

14. Machado M.A. et al. Contactless high-speed eddy current inspection of unidirectional carbon fiber reinforced polymer // *Compos B Eng.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 168. P. 226–235.

15. Boccardi S. et al. Inline monitoring of basalt-based composites under impact tests // *Compos Struct.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 210. P. 152–158.

16. Ilangoan S. et al. 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, 2023. Vol. 182.

17. Mandelbrot B.B. *Les objets fractals: forme, hasard et dimension.* Paris: Flammarion, 1975. 203 p.

18. Renyi A. *Probability theory.* The Netherlands: North-Holland Pub. Co., Amsterdam, 1970. 670 p. p.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. Mechanical properties of fiber-reinforced polymer bars under various types of stress-strain state / V. I. Aksenkin, Yu. G. Lazarev, K. Iu. Usanova, **Kh. M. Vafaeva**, E. S. Vasyutkin // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2023. – No. 4(109). – P. 10931. – DOI 10.4123/CUBS.109.31.
2. Drainage bridge trays made of glass fiber reinforced polymer: physical, mechanical and operational properties / V. N. Kavkazskiy, T. A. Kirsanova, K. Iu. Usanova, **Kh. M. Vafaeva**, E. S. Vasyutkin // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2023. – No. 4(109). – P. 10919. – DOI 10.4123/CUBS.109.19.
3. Engineering polymer systems with self-healing functionality to enhance structural longevity / **Kh. M. Vafaeva**, G. Kordas // AlfaBuild. – 2023. – No. 4(29). – P. 2913. – DOI 10.57728/ALF.29.13.
4. Fractal aspects in the technology of self-healing materials / **Kh. M. Vafaeva**, J. F. De. O. Júnior, H. Da. S. Pizzo // AlfaBuild. – 2023. – No. 4(29). – P. 2911. – DOI 10.57728/ALF.29.11.
5. Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties / **Kh. M. Vafaeva**, R. Zegait, Sh. Munawar // AlfaBuild. – 2023. – No. 4(29). – P. 2910. – DOI 10.57728/ALF.29.10.
6. Стеклобазальтопластиковые ограждения для велодорожек: преимущества и перспективы внедрения / **X. M. Вафаева**, К. Ю. Усанова, Ю. Г. Лазарев, В. И. Ефремов, Д. П. Курдюков // Путевой навигатор. – 2024. – № 58(84). – С. 78-91. – DOI 10.13140/RG.2.2.36071.87202
7. Variants of pipeline assemblies made of composite materials and their connections and technological units / T. A. Kirsanova, A. V. Shchetenkov, S. Z. Yakupov, **Kh. M. Vafaeva**, M. K. Shinkareva // AlfaBuild. – 2023. – No. 3(28). – P. 2804. – DOI 10.57728/ALF.28.4.
8. Development of new generation composite materials: a fractal approach / **Kh. M. Vafaeva** // Engineering Journal of Don. – 2024. – No. 12. – P. 9669. – DOI 10.13140/RG.2.2.34576.11522
9. Multifractal Analysis for Young's Modulus Estimation in Composite Pipes / **Kh. M. Vafaeva** // Engineering Journal of Don. – 2024. – No. 11. – P. 9639. – DOI 10.13140/RG.2.2.36810.58564
10. Effect of matrix fiber multifractal characteristics on the strength of glass-basalt composite pipes / **Kh. M. Vafaeva**, Zh. Nuguzhinov // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2024. – No. 113. – P. 11315. – DOI: 10.4123/CUBS.113.15.

11. Multi-criteria evaluation of glass-basalt composites based on fractal geometry / **Kh. M. Vafaeva**, Zh. Nuguzhinov // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2024. – No. 113. – P. 11316. – DOI: 10.4123/CUBS.113.16.
12. Multifractal modeling for quality control and mechanical property assessment of fiberglass pipes / **Kh. M. Vafaeva**, Zh. Nuguzhinov // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2024. – No. 113. – P. 11317. – DOI: 10.4123/CUBS.113.17.
13. Sensitivity of composite pipe properties to fractal dimensions / **Kh. M. Vafaeva**, Zh. Nuguzhinov // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2024. – No. 113. – P. 11318. – DOI: 10.4123/CUBS.113.18.
14. Microstructure and Physicomechanical Properties of Glass-Basalt Fiber Reinforced Polymer Pipes: 3D Fractal Modeling / A. I. Borovkov, **Kh. M. Vafaeva**, N. I. Vatin // AlfaBuild. – 2024. – No. 32. – P. 3203. – DOI: 10.57728/ALF.32.3.
15. Compressive Strength of Hybrid Glass-Basalt Fiber Reinforced Polymer Composite Tube: Multifractal Microstructure Analysis / A. I. Borovkov, **Kh. M. Vafaeva**, N. I. Vatin // AlfaBuild. – 2024. – No. 32. – P. 3204. – DOI: 10.57728/ALF.32.4.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

16. Fabrication and mechanical properties of hybrid fibre-reinforced polymer hybrid composite with graphene nanoplatelets and multiwalled carbon nanotubes / B. R. Reddivari, S. Vadapalli, B. Sanduru, T. Buddi, **Kh. M. Vafaeva** // Cogent Engineering. – 2024. – Vol. 11, No. 1. – DOI 10.1080/23311916.2024.2343586. (Scopus Q2)
17. Polymer Matrix Nanocomposites for Sustainable Packaging: A Green Approach / **Kh. M. Vafaeva**, A. Chhetri, P. Sudan [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 511. – P. 01008. – DOI 10.1051/e3sconf/202451101008.
18. Carbon nanotubes: revolutionizing construction materials for a sustainable future: A review / **Kh. M. Vafaeva**, R. Zegait // Research on Engineering Structures and Materials. – 2023. – DOI 10.17515/resm2023.42ma0818rv. (Scopus Q3)
19. Exploring the Uncharted Territory: Future Generation Materials for Sustainable Energy Storage / K. Kumar, S. Dixit, Md. Z. Ul. Haq, **Kh. M. Vafaeva**, [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 430. – P. 01199. – DOI 10.1051/e3sconf/202343001199.
20. Breaking Barriers: Innovative Fabrication Processes for Nanostructured Materials and Nano Devices / K. Kumar, S. Dixit, Md. Z. Ul. Haq, **Kh. M. Vafaeva**, [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 430. – P. 01197. – DOI 10.1051/e3sconf/202343001197.

21. Glass-basalt-plastic materials for construction in temperate and Arctic climatic regions / **Kh. M. Vafaeva**, M. Dhyani, P. Acharya [et al.] // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 86. – P. 01111. – DOI 10.1051/bioconf/20248601111.
22. Expedient Structures for Safeguarding Aircraft Parking Areas from Climatic Impact: An In-depth Exploration / **Kh. M. Vafaeva**, A. Kumar Saxena, M. Khatkar [et al.] // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 86. – P. 01110. – DOI 10.1051/bioconf/20248601110.
23. Comparative Analysis of Glass-Basalt-Plastic Materials for Construction in Arctic Conditions / **Kh. M. Vafaeva**, N. Duklan, Ch. Mohan [et al.] // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 86. – P. 01112. – DOI 10.1051/bioconf/20248601112.
24. Comparative study of basalt fiber and steel fiber as additives to concrete / M. Vijayakumar, Ja. Shrisaila Haranatti, M. Neelappa Paruti, J. Sravanthi, **Kh. M. Vafaeva** // MATEC Web of Conferences. – 2024. – Vol. 392. – P. 01009. – DOI 10.1051/mateconf/202439201009.

Публикации в рецензируемых российских изданиях, включенных в базу РИНЦ

25. **Vafaeva, Kh. M.** Nanotechnology in construction: new composite materials based on carbon nanotubes / Kh. M. Vafaeva, R. Zegait // Информационные системы и технологии АПК и ПГС: Сборник научных статей Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Курск, 06 октября 2023 года. Vol. 2. – Курск: Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова, 2023. – P. 281-296. – DOI 10.47581/2023.FM-03.VAFAEVA-01.
26. **Vafaeva, Kh. M.** Wastewater treatment revolution: efficiency and benefits of carbon nanotubes / Kh. M. Vafaeva, R. Zegait // Информационные системы и технологии АПК и ПГС: Сборник научных статей Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Курск, 06 октября 2023 года. Vol. 2. – Курск: Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова, 2023. – P. 223-243. – DOI 10.47581/2023.FM-03.VAFAEVA-02.

Свидетельство о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688390 Российская Федерация. «Structure Fractal Analyzer» : № 2024686872 : заявл. 11.11.2024 : опубл. 27.11.2024 / **Х. М. Вафаева**, Д. Ф. Карпов, А. А. Фролова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». – DOI 10.13140/RG.2.2.27253.28647

АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ**Вафаева Христина Максудовна****«Композитные материалы для стеклобазальтопластиковых труб с повышенными эксплуатационными характеристиками»**

Повышение надежности и долговечности композитных труб является актуальной задачей для современных строительных технологий. В диссертационном исследовании разработан научно обоснованный метод управления составом и механическими характеристиками стеклобазальтопластиковых труб с применением теории фракталов, направленного на сокращение объема испытаний.

В работе предложено использование теории фракталов для регулирования структуры и состава труб, что позволило установить закономерности влияния структурных факторов (размерности фрактальной структуры волокна и связующего) на предел прочности при растяжении, сжатии и модуль упругости. Исследования выполнены на основе механических испытаний и моделирования. Разработаны модели прогнозирования характеристик труб, включающие анализ фрактальных размерностей, что позволяет проводить экспресс-контроль их качества с высокой точностью (относительная погрешность прогнозирования 3–7%).

Научная новизна работы заключается в установлении влияния структурной неоднородности на эксплуатационные характеристики композитных труб, что позволяет оценивать их поведение в условиях эксплуатации. Разработан неразрушающий метод контроля качества труб, основанный на анализе взаимосвязи между структурными параметрами и механическими свойствами. Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций для промышленного производства композитных труб с заданными характеристиками, что позволяет сократить объем лабораторных испытаний и снизить издержки на этапе проектирования.

DISSERTATION ABSTRACT**Kristina Maksudovna Vafaeva****«Composite Materials for Glass-Basalt Plastic Pipes with Enhanced Performance Characteristics»**

Improving the reliability and durability of composite pipes is a pressing challenge in modern construction technologies. This study presents a scientifically validated approach to optimizing the composition and mechanical properties of glass-basalt plastic pipes using fractal theory.

By applying fractal theory, the research identifies patterns in the influence of structural factors—such as the fractal dimensionality of fibers and binders—on

key mechanical properties, including tensile and compressive strength, as well as the modulus of elasticity. The findings are supported by a combination of physical-mechanical testing and numerical modeling. Furthermore, mathematical models incorporating fractal dimensional analysis were developed to predict pipe characteristics with high accuracy, achieving rapid quality control with a relative error of just 3–7%.

The study's novelty lies in elucidating how structural heterogeneity impacts the operational performance of composite pipes, offering valuable insights into their behavior under real-world conditions. A non-destructive quality control method was also developed, leveraging the interplay between structural parameters and mechanical properties. The practical value of the research is evident in its recommendations for industrial production processes, enabling the manufacture of composite pipes with targeted characteristics while reducing the reliance on extensive laboratory testing and minimizing design-phase costs.

ВАФАЕВА ХРИСТИНА МАКСУДОВНА

**КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ СТЕКЛОБАЗАЛЬНОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ С
ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

2.1.5 - Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Формат 60×90/16, Усл. печ. л. 2
Цифровая печать. Тираж 70 экз.
Подписано в печать 01.03.2025 Заказ No 2702-1318745

ИП Тимофеева И.В. ИНН 472002868384
188501, Ленинградская область, Ломоносовский район, деревня Низино,
центральная улица, дом 3, квартира 2.

Отпечатано в КЦ «Маяковский»
Россия, г. Санкт-Петербург,
Невский проспект, 63
тел: 8 (812) 244-90-90