

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И
ИННОВАЦИИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

ОШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
НАНОТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
ИМ.Н.ИСАНОВА**

№ Регистрации:

«БЕКТЕМИН»

Проректор по научной работе
и инновации , доцент Эшаров Э.А.

« ___ » _____ 2026 год

ОТЧЕТ

**ПО ПРОЕКТУ: “Создание композиционных наноструктурных
материалов на основе базальтовых горных пород для теплоэнергетики и
строительной индустрии»**

Годовой отчет за календарный 2025 год

Руководитель проекта: д.ф.-м.н., профессор Ы. Ташполотов

Ош – 2026

1. На 31.12.2025 г. по проекту всего работают 5 научных сотрудников, из них 1 руководитель проекта, г.н.с. 1 в.н.с., 2 с.н.с. , в том числе 1 доктор физико-математических наук, профессор и 1 кандидат технических наук, доцент, 1 учебно-вспомогательный персонал, из них удельный вес молодых ученых составляет 20%.

Штатное расписание проекта:

№	Ф.И.О	Место работы, страна	Ученая степень	Должность	Работа, выполняемая на основе проекта	Почта, телефон номер
1	Ташполотов Ысламидин	ОшГУ	д.ф.-м.н	Руководитель проекта, главный научный сотрудник	Общее руководство, выполнение матмоделирование Подготовка научных статей	itashpolotov@mail.ru , +996555260554
2	Садыков Эркинбай	ОшГУ	К.т.н	Ответст. исполнитель, ведущий научный сотрудник	Проведение патентных исследований. Участие в написании научной статьи	sadykov.erkinbai@mail.ru , +996771865655
3	Ибрагимов Таалай Каилбекович	ОшГУ	----	Ст.научный сотрудник	Численное моделирование Обобщение результатов	t.kailbekovich@mail.ru , +996779230171
4	Маматов Элбек Умаржанович	ОшГУ	-----	Ст.научный сотрудник	Численное моделирование, проведение расчетов	mamatov.elbek@list.ru , +996555735456
5	Сулайман уулу Заирбек	ОшГУ	-----	инженер	Подготовка для проведения эксперимента	zairbeksulaimanuuulu@gmail.com +996556910801

2.Общая информация о проекте

Цель проекта: Создание композиционных наноструктурных материалов с высокими эксплуатационными характеристиками из магматических базальтовых горных пород КР.

Задачи проекта:

- 1.Исследование базальтовых пород и их химического состава для определения оптимальных параметров и условий для создания наноструктурных материалов.
- 2.Разработка методов и технологий переработки базальта для получения наноструктурных материалов с заданными свойствами.
- 3.Определение и оптимизация структуры и состава композиционных материалов на основе базальта с добавлением других веществ, таких как полимеры, металлы или оксиды.
- 4.Исследование технологических параметров и определение оптимальных условий для получения наноструктурных материалов с высокими механическими, термическими или химическими свойствами.
- 5.Оценка экологической безопасности полученных материалов и разработка методов их утилизации или переработки.
- 6.Определение экономической эффективности и конкурентоспособности созданных композиционных наноструктурных материалов на основе базальта по сравнению с существующими аналогами.

Задание ОшГУ по НИР:

1. Результаты научных исследований должны быть опубликованы в научных журналах, включенных в базы СКОПУС(опубликованные статьи);
2. Технологии создания композиционных наноструктурированных материалов на основе горных базальтовых пород должна быть запатентована в Кыргызпатенте(заявка на патент);
3. Разработанная технология получения композиционных материалов на основе горных базальтовых пород должна быть внедрена в производство(акт о внедрении).

3.Календарный план проекта: “Создание композиционных наноструктурных материалов на основе базальтовых горных пород для теплоэнергетики и строительной индустрии”

В рамках календарного плана сотрудники НИР по проекту в 2025 году будут выполнять следующие работы:

№ п/п	Наименование основных этапов, вид и объемы работ, подлежащих выполнению	Вид отчетности	Срок выполнения
1	Определение оптимальных режимов получения порошков и волокон из базальтовых пород	подготовка научной статьи	01.01.2025- 28.02.2025

2	Численное моделирование физико-технологических параметров композиционного материала полученного на основе базальтовых порошков и волокон.	Промежуточный отчет, публикация научной статьи	01.03.2025-31.05.2025
3	Получение композиционного материала(ламината), цилиндрической трубы на основе базальта.	Публикация научной статьи	01.06.2025-30.09.2025
4	Разработка технологии получения водорода на основе электрофизической ионизации	Публикация научной статьи. Подготовка и сдача годового отчета	01.10.2025-31.12.2025

4. Актуальность проекта. В 2019-20 годах COVID-19 оказала значительное влияние на строительную отрасль Кыргызской Республики, приведя к росту себестоимости строительства примерно на 20%. Основными причинами стали закрытие границ и ограничение поставок строительных материалов из России, Китая и других стран, обеспечивающих до 60-80% строительного рынка республики. Одновременно рост свободного времени у населения вызвал увеличение спроса на капитальный ремонт и индивидуальное строительство, тогда как деятельность продавцов строительных материалов была ограничена. В результате цены резко выросли: кирпич подорожал почти на 90%, трубы - на 130%, гидроизоляционные материалы — на 70%, некоторые сухие смеси - на 40%. Существенный рост цен также наблюдался на линолеум, ламинат и кровельные материалы. Несмотря на снятие ограничений, тенденция роста цен сохраняется. Поэтому разработка технологии создания строительных материалов и изделий (ламинат, цилиндрической трубы) на основе местных базальтовых сырьевых ресурсов является стратегически важной задачей. Это позволит снизить зависимость от импорта, стабилизировать цены и создать новые рабочие места.

5. Методы, использованные в реализации проекта:

5.1. Численный метод определения физико-механических свойств композиционного материала в COMSOL Multiphysics

Comsol Multiphysics — это программная среда моделирования физических процессов методом конечных элементов. Она позволяет инженерам и ученым анализировать поведение конструкций и материалов под воздействием различных факторов в самых разных областях техники, производства и науки.

В методе конечных элементов модель разбивается на малые геометрические примитивы — в данном случае на тетраэдры. В каждом

тетраэдре с помощью набора полиномиальных функций выполняется аппроксимация поля смещений, которое показывает деформацию объекта по каждой из трех координатных осей.

Затем для вычисления напряжения COMSOL Multiphysics дифференцирует поле смещения.

Если тетраэдры будут значительно меньше стандартных размеров, это приведет к тому, что геометрия будет содержать мелкие грани и поверхности. Это позволит эффективнее рассчитывать различные вариации поля напряжений и получить более точный результат [32-34].

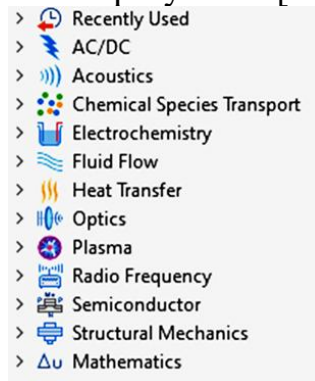


Рисунок 2.7. Основные модули среды моделирования COMSOL Multiphysics

Среда моделирования COMSOL Multiphysics состоит из следующих областей исследования, представленные в виде модулей которая отображена на рисунке 2.7.

Нами было использовано *Heat Transfer* - процессы теплопередачи в различных средах, и *Structural mechanics* - поведение твёрдых тел и конструкций под воздействием нагрузок.

5.2. Определение прочностных характеристик базальтового композита в COMSOL Multiphysics

1. Создается новый проект (New Project) и выбирается размерность модели (3D, 2D Axisymmetric, 2D, 1D Axisymmetric, 1D, 0D) как показано на рисунке 2.8. Также выбирается области исследования среди модулей (Select Physics) в COMSOL Multiphysics которая приведена на рисунке 2.7.



Рисунок 1. Окно выбора размерности (3D, 2D Axisymmetric, 2D, 1D Axisymmetric, 1D, 0D).

Для определения микромеханических параметров композитного цилиндра было выбрано *Structural Mechanics – Solid Mechanics (solid)*, Структурная механика – Механика твердых тел.

2. В COMSOL Multiphysics вводятся размеры геометрических фигур, и параметры компонентов композиционного материала, на основе которых происходит моделирование и вычисление. Например, *длина и объем ячейки, радиус цилиндра, объемная доля и плотность базальта, плотность базальтового волокна и т. д.*

3. Геометрическая фигура в виде элементарной ячейки было создано с цилиндром внутри как показано на рисунке 2. Данная фигура служит в качестве объекта, который будет смоделирован из компонентов композиционного материала с параметрами.

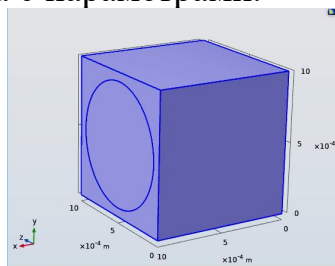


Рисунок 2. Элементарная ячейка с цилиндром внутри из композиционного материала.

4. Далее определены граничные условия элементарной ячейки как показано на рисунке 3.

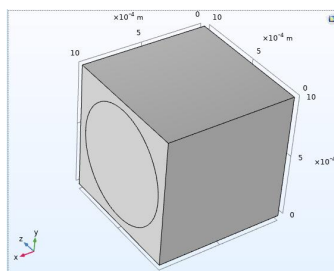


Рисунок 3. Определение граничных условий объекта.

В COMSOL Multiphysics под граничными условиями (Boundary conditions) понимаются математические ограничения, которые задаются на границах геометрической модели и определяют поведение физического процесса на этих границах.

5. В качестве компонентов композиционного материала создается как минимум два вида материала в разделе *Materials - Материалы* как показано на рисунке 4.

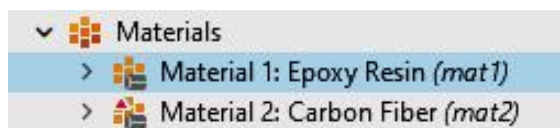


Рисунок 4. Создания материалов и задания их свойств в среде COMSOL Multiphysics.

6. Mesh (Сетка) выполняет функцию разбиения геометрического объекта на конечные элементы, используемые при численном решении уравнений, и

включает в себя дискретизация модели, контроль точности расчётов и т. д. Результат разбиение объекта на конечные элементы отображено на рисунке 5.

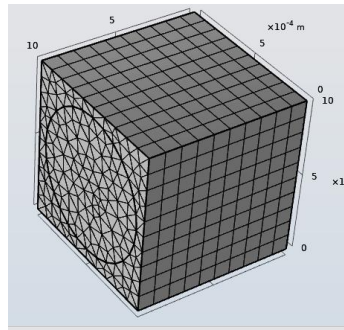


Рисунок 5. Разбиения геометрии на конечные элементы, которые используются при численном решении уравнений.

7. Для моделирования напряжение по фон Мизесу (N/m^2) использовали *Stress – Solid, напряжение в твердом теле* расположенной в мастере моделей *Model Builder*. Результат моделированного напряжение видно на рисунке 6.

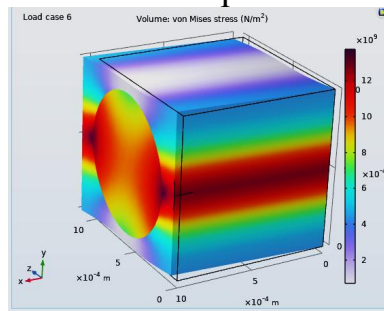


Рисунок 6. Получившийся результат после моделирования напряжение по фон Мизесу (N/m^2).

8. Аналогичным образом было создано еще одна геометрическая фигура, цилиндр, как показано на рисунке 7.

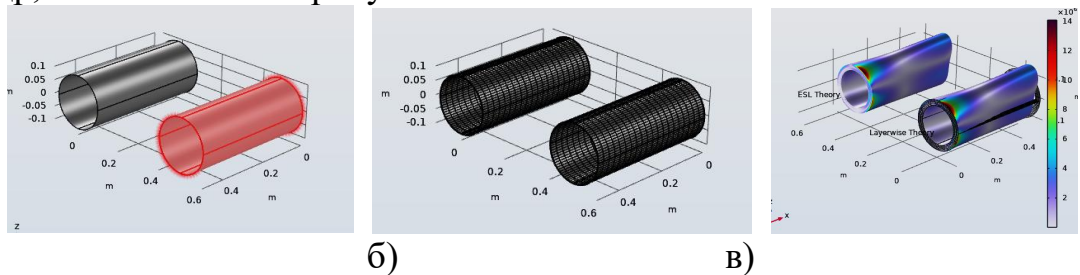


Рисунок 7. Цилиндры, смоделированные из композиционного материала.

9. Задания собственной частоты колебания *Eigenfrequency* в среде моделирования COMSOL Multiphysics в разделе *Results – Результаты*.

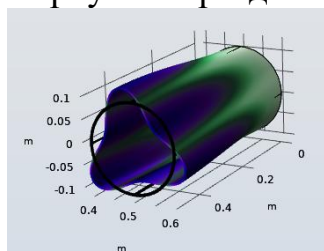


Рисунок 8. Задания собственной частоты колебания (Eigenfrequency = 572.16 Hz).

Из рисунка 8 видно, что собственная частота колебания (Eigenfrequency) равна 572.16 Hz. В результате в цилиндре образовалась некая деформированная форма из-за появившегося напряжения.

Тепловое расширение многослойной композитной оболочки

Композиционные материалы применяются там, где важны как тепловые, так и прочностные свойства, поэтому их тепловой и структурный анализ представляет собой актуальную задачу.

В COMSOL Multiphysics многослойный композит подвергается воздействию направленного теплового луча, с учетом влияния положения источника тепла на напряжения и деформации.

Создание проекта, выбор размерности геометрии, определение граничных условий и разбиения геометрического объекта на конечные элементы осуществляется аналогично при определении микромеханических свойств объекта, которые приводились выше.

1. При определении тепловых свойств композиционного материала было выбрано *Structural Mechanics* - Структурная механика, *Thermal-Structure Interaction* - Тепловое взаимодействие со структурой, *Thermal stress, Layered Shell* - Тепловое напряжение, многослойная оболочка как видно из рисунка 9.

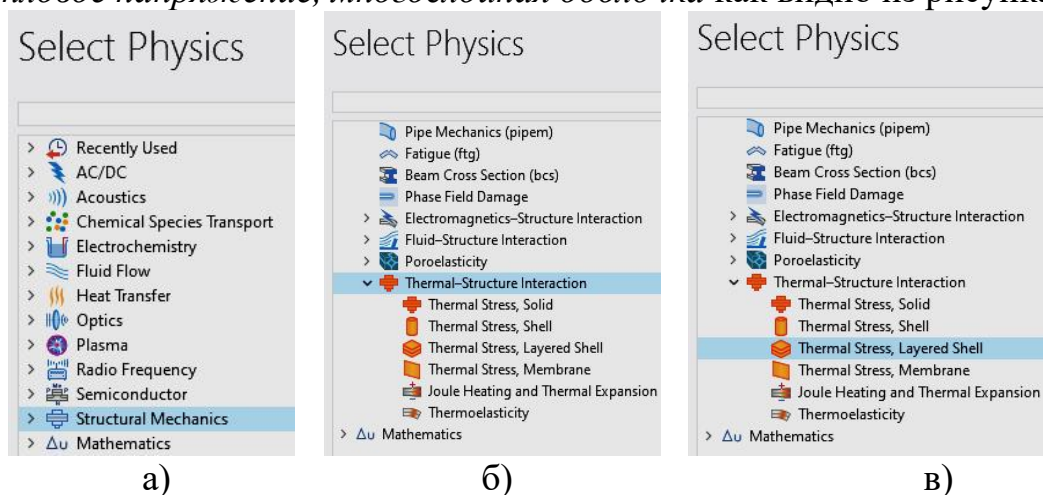


Рисунок 9. Выбор области исследования в среде моделирования COMSOL Multiphysics.

2. После выбора области исследования, в COMSOL Multiphysics вводятся следующие параметры:

Параметры материала волокна и матрицы; объемная доля волокна, модуль Юнга волокна, коэффициент Пуассона волокна и т.д.

Параметры слоистого ламината, теплопередачи и луча; матрица эластичности и толщина ламината, мощность направленного луча, коэффициент теплопередачи и т.д.

3. Далее было создано геометрическая фигура Н-образной формы как видно из рисунка 10.

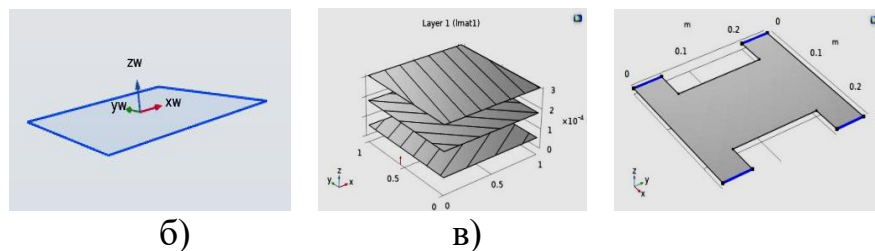


Рисунок 10. Создание геометрической фигуры Н-образной формы в среде моделирования COMSOL Multiphysics.

Из рисунка 10 видно, что геометрическая фигура Н-образной формы состоит из нескольких слоев композиционного материала с разной ориентацией волокон.

4. Как видно из рисунка 11, были заданы и настроены *Beam profile* - Профили луча, *Deposited Beam Power* - Мощность направленного луча на объект, *Beam origin point* - Исходная точка луча, *Standard deviation* - Стандартное отклонение, *Source Position* - Расположение источника объекта. В среде моделирования COMSOL Multiphysics выбирается *Convective heat flux* - Конвективный тепловой поток.

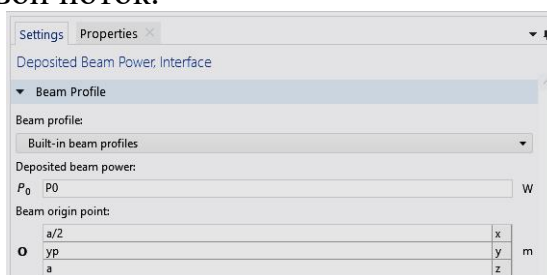


Рисунок 11. Настройка мощности направленного луча, граница раздела.

На рисунке 12 можно видеть графическое изображение направленной и исходной точки луча, и расположение источника в виде листа композиционного материала.

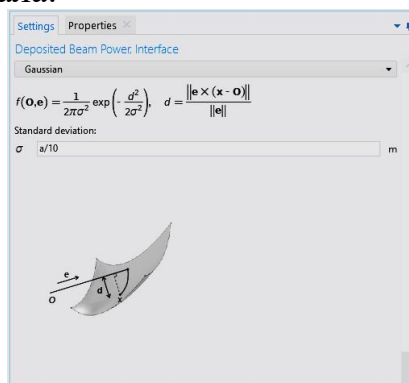


Рисунок 12. Графическое изображение направленной и исходной точки луча, и расположение источника объекта.

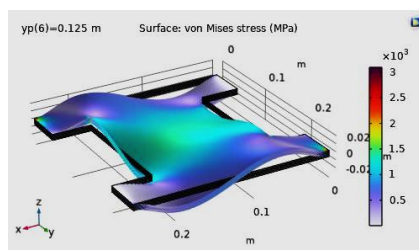


Рисунок 13. Геометрическая фигура Н-образной формы после задания и настройки луча.

На рисунке 13 можно видеть получившийся результат деформации геометрической фигуры Н-образной формы после воздействие направленного луча равной $ур(6) = 0.125$ m.

Температурное воздействие на геометрическую фигуру Н-образной формы можно видеть на рисунке 14.

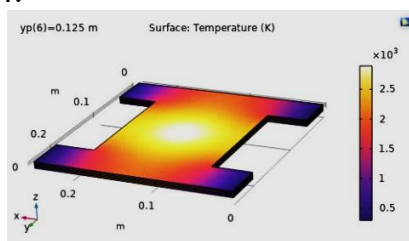


Рисунок 14. Температурное воздействие на геометрическую фигуру Н-образной формы

6. Новизна научного исследования, проведенного в рамках проекта:

1. Созданная математическая модель позволяет анализировать распределение напряжений и деформаций в цилиндрического изделия из базальтовых горных пород под действием распределенной нагрузки. Уравнения движения и условия прочности, представленные в данной статье, могут быть использованы для численного моделирования оптимальных параметров цилиндра и оценки ее надежности.

2. На основе микромеханического анализа, проведенный с использованием Comsol Multiphysics, установлено, что собственные частоты и формы мод напряжений в базальтовой композитной трубе сильно зависят от объёмной доли и плотности базальтового волокна и расплава, при этом увеличение этих параметров приводит к снижению собственной частоты колебаний и волны напряжений на многослойный и эквивалентный однослойный базальтовый ламинат составляет порядка 0.2 %.

3. Проведённый в COMSOL Multiphysics сравнительный анализ ламинатов из углеродных и базальтовых волокон, с учётом их механических и прочностных параметров, показал, что базальтовый ламинат демонстрирует значительно лучшие прочностные характеристики: его коэффициент запаса прочности в 2,02 раза выше, а индекс разрушения в 6,32 раза ниже, чем у

углеродного ламината, согласно шести полиномиальным критериям разрушения.

4. Электрофизический метод получения водорода, реализованный при низком напряжении (10В), продемонстрировал потенциально высокую энергоэкономичность. Рассчитанные удельные энергозатраты ($\sim 1,2$ кВт·ч/м³) оказались ниже показателей традиционного электролиза и порогового значения, определяемого низшей теплотой сгорания водорода, что соответствует главной цели исследования.

7. Практическое применение

Проект по созданию композиционных наноструктурных материалов на основе базальтовых горных пород для теплоэнергетики и строительной индустрии может принести множество пользы и применений в следующих отраслях народного хозяйства КР:

энергетика: композиционные наноструктуры могут использоваться для создания эффективных солнечных батарей, более эффективных энергонакопительных устройств, а также для разработки новых материалов для ядерных реакторов и генерации энергии.

электроника: такие материалы могут быть использованы для создания более производительных и мощных микроэлектронных компонентов, таких как транзисторы и сенсоры, а также для разработки новых материалов для электроники следующего поколения, таких как гибкие и растягивающиеся устройства.

медицина: композиционные наноструктуры могут использоваться для создания новых материалов для медицинских имплантатов и протезов, а также для разработки новых методов обнаружения и лечения болезней, таких как рак или инфекции.

экология: разработка композиционных наноструктурных материалов может привести к созданию более эффективных методов очистки воды и воздуха, улучшению энергоэффективности зданий и развитию более экологически чистых и эффективных процессов производства.

транспорт: использование композиционных наноструктурных материалов в автомобилях, самолетах и других транспортных средствах может привести к снижению веса и повышению прочности, что приведет к снижению энергопотребления и выбросам загрязняющих веществ, а также улучшит безопасность и устойчивость транспортных средств.

НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

ПО ПРОЕКТУ “СОЗДАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ” ЗА КАЛЕНДАРНЫЙ 2025 ГОД

ВВЕДЕНИЕ

Различные месторождения горных пород или сырье имеют свои специфические свойства, которые следует выявлять и учитывать при разработке технологических процессов получения базальтовых порошков и волокон и изделий на их основе.

Для производства высококачественных неорганических материалов лучшим сырьем из числа магматических пород являются базальтовые породы. В связи с этим для производства композитных наноструктурных материалов используются базальтовые горные породы Кызыл-Кийского месторождения.

Полученные волокны на основе плавления базальта смешиваются с синтетическими смолами, которые при высоких температурах полимеризуются и прессуются и получают материалы типа ламинат.

Учитывая сырьевую базу базальтовых пород Кыргызской Республики, комплекс ценных эксплуатационных характеристик изделий и композитов на основе базальтовых волокон, создание композитных волокнистых материалов и изделий на их основе являются перспективными. Основные проблемы, стоящие перед исследователями и технологами, сводятся к следующему: создание композиционных материалов на основе базальтовых волокон и изделий с комплексом высоких, часто эксплуатационных характеристик; повышение технологичности производства; снижение стоимости волокнистого материала и изделий из них. Современный уровень развития науки по базальтовой технологии позволяет надеяться на успешное решение этих актуальных задач.

1.1. Задачи проекта:

1. Определение оптимальных режимов получения порошков и волокон из базальтовых пород;
2. Численное моделирование физико-технологических параметров композиционного материала полученного на основе базальтовых порошков и волокон;
3. Получение композиционного материала (ламината), цилиндрической трубы на основе базальта;
4. Разработка технологии получения водорода на основе электрофизической ионизации.

1.2. Методы, использованные в исследовании

1. Микроскопический, термографический, гидродинамический методы исследования: Для исследования были использованы цифровой USB-микроскоп DigiMicro с кратностью увеличения 500^x, пирометр, ареометр .

2. *Численное моделирование* (Программная платформа COMSOL Multiphysics): Для численного моделирования композиционных материалов нами был использован программа COMSOL Multiphysics.

В версии COMSOL Multiphysics® 5.4 представлен модуль: *Композитные материалы*. С помощью данного модуля Механика конструкций и новой технологии *Layered Material (Слоистый материал)* нами моделированы слоистые композитные материалы для определения микромеханику композиционных материалов.

2. *Спектроскопический анализ*: Был проведён спектральный анализ, позволяющий точно и оперативно исследовать элементный состав вещества.

3. Выбраны технологические режимы получения композиционных материалов (ламината), цилиндрической трубы на основе базальта;

4. С использованием электрофизической ионизации разработаны технологии получения водорода для плавления базальтовой породы.

1.3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1.3.1. Математическое моделирование нагруженной распределенной нагрузкой цилиндрической трубы

В данном исследовании создается математическая модель напряженно-деформированного состояния цилиндрической арматуры, изготовленной на основе базальтовых горных пород, при воздействии распределенной нагрузки в различных направлениях. Предлагаемая модель учитывает основные механические свойства материала и особенности его поведения под комбинированным нагружением позволяющий повысить точность расчетов и эффективность применения базальтовой арматуры в строительстве.

ГОСТ Р 51372-99 [1] определяет методы ускоренных испытаний материалов в агрессивных средах и применяется при оценке долговечности базальтовой арматуры. Использование этих методов позволяет получать экспериментальные данные для проверки и уточнения математических моделей её напряжённо-деформированного состояния.

Несмотря на большое число исследований, остаются нерешёнными задачи оптимизации параметров арматуры и точного описания её поведения при комбинированных нагрузках. Существующие модели часто носят частный характер и не учитывают сложные условия эксплуатации, включая распределённые многокомпонентные нагрузки, что требует разработки более универсальных математических моделей.

Основные уравнения.

Для исследования напряженно-деформированного состояния арматуры рассмотрим цилиндрический элемент длиной dx , находящийся под действием распределенной нагрузки $q(x,t)$. При этом касательные напряжения на внешних поверхностях цилиндра отсутствуют, а уравнения движения можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial x} + J\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} &= N \\ \frac{\partial N}{\partial x} + Rq &= \rho F \frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

где M – изгибающий момент, J – момент инерции поперечного сечения, ρ – удельная плотность массы системы, ω – угловая скорость вращения элемента частиц от действия изгибающего момента, N – поперечная (перерезывающая) сила, R – радиус цилиндра, q – внешняя нагрузка, F – площадь поперечного сечения, v – составляющая скорости.

Условие прочности при изгибе.

При изгибе арматуры в интегральном виде условие прочности можно записать:

$$M = 2\pi R \int_0^R \sigma_x z dz \quad (2)$$

$$N = 2\pi R \int_0^R \tau_{xz} dz, \quad (3)$$

где σ_x - нормальное напряжение, τ_{xz} - касательное напряжение в поперечном сечении. В арматуре, испытывающей деформацию кручения, в поперечных сечениях возникают касательные напряжения τ_{xz} .

Связь между напряжением и деформацией.

Связь между напряжением и деформацией можно представить в виде:

$$-Ez \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} + \frac{2}{3} \kappa(1+\nu) \sigma_x \quad 2zdz \quad (4)$$

$$G \left(\frac{\partial \nu}{\partial x} - \omega \right) = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} + \kappa \tau_{xz} \quad 2dz, \quad (5)$$

где E - модуль Юнга, G - модуль сдвига, ν - коэффициент Пуассона, κ - физическая константа материала.

Перепишем уравнения с учетом условий прочности: формулы (4) и (5) с учетом условия прочности (2) и (3) перепишем в виде:

$$-2Ez^2 dz \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} (2\sigma_x z dz) + \frac{4}{3} \kappa(1+\nu) \sigma_x z dz$$

$$G \left(\frac{\partial \nu}{\partial x} - \omega \right) 2dz = \frac{\partial}{\partial t} (2\tau_{xz} dz) + 2\kappa \tau_{xz} dz$$

или

$$-E \frac{2R^3}{3} \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{1}{\pi R} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{2}{3} \kappa(1+\nu) \frac{M}{\pi R}$$

$$G \left(\frac{\partial \nu}{\partial x} - \omega \right) 2R = \frac{1}{\pi R} \frac{\partial N}{\partial t} + \kappa \frac{N}{\pi R}$$

$$-\frac{2\pi R^4 E}{3} \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{2}{3} \kappa(1+\nu) M$$

$$2\pi G R^2 \left(\frac{\partial \nu}{\partial x} - \omega \right) = \frac{\partial N}{\partial t} + \kappa N$$

$$-D \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{2}{3} \kappa(1+\nu) M, \quad \text{где}$$

$$D = \frac{2\pi R^4 E}{3}$$

$$B \left(\frac{\partial \nu}{\partial x} - \omega \right) = \frac{\partial N}{\partial t} + \kappa N, \quad \text{здесь}$$

$$B = 2\pi G R^2$$

Таким образом,

$$\frac{\partial M}{\partial x} + J\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} = N$$

$$\frac{\partial N}{\partial x} + Rq = F\rho \frac{\partial \nu}{\partial t}$$

(6)

$$-D \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{2}{3} \kappa(1+\nu)M$$

$$B\left(\frac{\partial \nu}{\partial x} - \omega\right) = \frac{\partial N}{\partial t} + \kappa N$$

Из этих уравнений имеем:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\alpha \frac{\partial M}{\partial x} + \alpha N$$

$$\frac{\partial \nu}{\partial t} = \beta \frac{\partial N}{\partial x} + \gamma(x,t)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -D \frac{\partial \omega}{\partial x} - \chi M$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = B \frac{\partial \nu}{\partial x} - B\omega - \kappa N$$

(7)

$$\text{где, } \alpha = \frac{1}{J\rho} \quad \beta = \frac{1}{F\rho} : \quad \gamma = \frac{Rq}{F\rho} \quad \chi = \frac{2}{3} \kappa(1+\nu) \quad D = \frac{2\pi ER^4}{3}$$

$$B = 2\pi GR^2$$

Решение задачи.

Для решения системы уравнений (7) установим начальные и граничные условия для данной задачи:

$$\text{Начальные условия: при } t=0 \quad \omega = \nu = N = M = 0$$

$$\text{Граничные условия, при } z=0 \quad \omega = 0 \quad x = b$$

$$\omega = 0$$

$$\nu = 0$$

$$\nu = 0$$

$$M = M_0(t)$$

$$M = M_1(t)$$

$$N = N_0(t)$$

$$N = N_1(t)$$

Здесь :

$$\bar{\omega}(x) = \lambda \int_0^{\infty} \omega(x,t) e^{-\lambda t} dt$$

$$\bar{\nu}(x) = \lambda \int_0^{\infty} \nu(x,t) e^{-\lambda t} dt$$

$$\bar{M}(x) = \lambda \int_0^{\infty} M(x,t) e^{-\lambda t} dt$$

$$\bar{N}(x) = \lambda \int_0^{\infty} N(x,t) e^{-\lambda t} dt$$

$$\gamma(x) = \lambda \int_0^{\infty} \gamma(x,t) e^{-\lambda t} dt$$

Формулировка решения.

Используя подходы решения линейных дифференциальных уравнений, решение уравнения (7) имеет вид:

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + \alpha \frac{\partial M}{\partial x} - \alpha N \right) dt = 0$$

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \left(\frac{\partial v}{\partial t} - \beta \frac{\partial N}{\partial x} - \gamma \right) dt = 0$$

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \left(\frac{\partial M}{\partial t} + D \frac{\partial \omega}{\partial x} + \chi M \right) dt = 0$$

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \left(\frac{\partial N}{\partial t} - B \frac{\partial v}{\partial x} + B \omega + \kappa N \right) dt = 0$$

Отсюда получим:

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \frac{\partial \omega}{\partial t} dt = \omega(x,0) - \int_0^{\infty} \omega(x,t) d e^{-\lambda t} = \omega(x,0) + \lambda \int_0^{\infty} \omega(x,t) e^{-\lambda t} dt = \varpi(x)$$

Так как $\omega(x,0) = 0$ и

$$\lambda \int_0^{\infty} \omega(x,t) e^{-\lambda t} dt = \varpi(x) \quad , \quad \text{то получим}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial \omega(x,t)}{\partial x} e^{-\lambda t} dt = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} \omega(x,t) e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \frac{d\varpi}{dx}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial v}{\partial t} e^{-\lambda t} dt = \bar{v}(x)$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial M}{\partial t} e^{-\lambda t} dt = \bar{M}(x)$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial M}{\partial x} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{M}}{\partial x}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial N}{\partial t} e^{-\lambda t} dt = \bar{N}(x)$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial N}{\partial x} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{N}}{\partial x}$$

Таким образом, имеем

$$\begin{aligned}
\varpi + \frac{\alpha}{\lambda} \frac{\partial \bar{M}}{\partial x} - \alpha \bar{N} &= 0 \\
\bar{\upsilon} - \frac{\beta}{\lambda} \frac{\partial \bar{N}}{\partial x} - \frac{\bar{\gamma}}{\lambda} &= 0 \\
\bar{M} + \frac{D}{\lambda} \frac{\partial \varpi}{\partial x} + \chi \bar{M} &= 0 \\
\bar{N} - \frac{B}{\lambda} \frac{d\bar{\upsilon}}{dx} + \frac{B}{\lambda} \varpi + \frac{\kappa}{\lambda} \bar{N} &= 0
\end{aligned}
\tag{8}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{M}}{\partial x} + \frac{\lambda}{\alpha} \varpi - \lambda \bar{N} &= 0 \\
\frac{\partial \bar{N}}{\partial x} - \frac{\lambda}{\beta} \bar{\upsilon} &= 0 \\
\frac{\partial \varpi}{\partial x} + \frac{(1+\chi)}{D} \lambda \bar{M} &= 0 \\
\frac{d\bar{\upsilon}}{dx} - \varpi - \frac{\lambda+\kappa}{B} \bar{N} &= 0
\end{aligned}$$

Представление изгибающих моментов и сил.

Величины M , N , ϖ , $\bar{\upsilon}$ и $\bar{\gamma}$ могут быть выражены через решение (6) и условия нагружения арматуры. Таким образом, система уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние цилиндрической арматуры под нагрузкой, принимает следующий вид:

$$\bar{M} = A_1 e^{px}$$

$$\bar{N} = A_2 e^{px}$$

$$\varpi = A_3 e^{px}$$

$$\bar{\upsilon} = A_4 e^{px}$$

$$\bar{\gamma} = A_5 e^{px}$$

Тогда из системы уравнений (7) получим:

$$\begin{aligned}
PA_1 + \frac{\lambda}{\alpha} A_3 - \lambda A_2 &= 0 \\
PA_2 - \frac{\lambda}{\beta} A_4 &= 0 \\
PA_3 + \frac{1+\chi}{D} \lambda A_1 &= 0 \\
PA_4 - A_3 - \frac{\lambda+\kappa}{B} A_2 &= 0
\end{aligned}
\tag{9}$$

Построение матрицы решения.

Для дальнейшего анализа задачи составим матрицу коэффициентов и найдем собственные значения системы:

$$\begin{vmatrix} P & -\lambda & \frac{\lambda}{\alpha} & 0 \\ 0 & P & 0 & -\frac{\lambda}{\beta} \\ \frac{1+\chi}{D}\lambda & 0 & P & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda+\kappa}{B} & -1 & P \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

$$P \begin{vmatrix} P & 0 & -\frac{\lambda}{\beta} \\ 0 & P & 0 \\ -\frac{\lambda+\kappa}{B} & -1 & P \end{vmatrix} + \lambda \begin{vmatrix} 0 & 0 & -\frac{\lambda}{\beta} \\ \frac{1+\chi}{D}\lambda & P & 0 \\ 0 & -1 & P \end{vmatrix} +$$

$$+\frac{\lambda}{\alpha} \begin{vmatrix} 0 & p & -\frac{\lambda}{\beta} \\ \frac{1+\chi}{D}\lambda & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda+\kappa}{B} & P \end{vmatrix} =$$

$$= P(P^3 - \frac{\lambda}{\beta} \frac{\lambda+\kappa}{B} P) + \frac{\lambda^3}{\beta} \frac{1+\chi}{D} + \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\lambda^2}{\beta} \frac{1+\chi}{D} \frac{\lambda+\kappa}{B} - P^2 \frac{1+\chi}{D} \lambda =$$

$$= P^4 - P^2 \frac{\lambda(\lambda+\kappa)}{B\beta} + \frac{\lambda^3(1+\chi)}{D\beta} + \frac{\lambda^3(1+\chi)(\lambda+\kappa)}{\alpha\beta DB} - P^2 \frac{\lambda^2(1+\chi)}{\alpha D} = 0$$

$$P^4 - \frac{\lambda(\lambda+\kappa)}{B\beta} + \frac{\lambda^2(1+\chi)}{\alpha D} P^2 + \frac{\lambda^3(1+\chi)(\alpha B + \lambda + \kappa)}{\alpha\beta DB} = 0$$

h_1

h_2

Тогда получим:

$$\boxed{P^4 - h_1 P^2 + h_2 = 0}$$

(11)

Решение данного уравнения будет иметь вид:

$$P_1 = \sqrt{\frac{1}{2} h_1 + \sqrt{h_1^2 - 4h_2}} \quad (12)$$

$$P_2 = -\sqrt{\frac{1}{2} h_1 + \sqrt{h_1^2 - 4h_2}} \quad (13)$$

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{2} h_1 - \sqrt{h_1^2 - 4h_2}} \quad (14)$$

$$P_4 = -\sqrt{\frac{1}{2} h_1 - \sqrt{h_1^2 - 4h_2}} \quad .$$

(15)

где
$$h_1 = \frac{\lambda^2(1+\chi)}{\alpha D} - \frac{\lambda(\lambda+\kappa)}{B\mu}$$

$$h_2 = \frac{\lambda^3(1+\chi)(\alpha B + \lambda + \kappa)}{\alpha\beta DB}$$

здесь
$$\alpha = \frac{1}{J\rho}; \quad \beta = \frac{1}{F\rho}; \quad \chi = \frac{2}{3}\kappa(1+\nu); \quad D = \frac{2\pi ER^4}{3};$$

$$B = 2\pi GR^2, \quad \kappa = \text{физическая константа материала}$$

1.3.2. Численное моделирование прочности, теплового расширения и теплопроводности композитов

Определение прочностных характеристик базальтового композитного материала в COMSOL Multiphysics.

Определение модели.

В моделировании и в исследовании поставлены следующие задачи:

- 1) анализ микромеханики
- 2) анализ напряжений с использованием послойной теории
- 3) анализ напряжений с использованием эквивалентной однослойной теории

Рассматриваются резонансные моды модели композитного цилиндра, упрочненный базальтовыми волокнами, и в связующей матрице из базальтового расплава через собственные частоты и поля волн напряжений. Результаты исследования по послойной и однослойной теориям будут сопоставлены [2, 3].

Введение данных в COMSOL Multiphysics

Для исследования прочностных характеристик базальтового композита в COMSOL Multiphysics задаются размеры геометрических фигур, механические характеристики расплава и волокна из базальта, плотность, и толщина слоёв и прилагаемая нагрузка как приведено в таблице 1 [4,5].

Таблица 1. – Характеристики компонентов композиционного материала и размеры геометрических фигур.

Название	Выражение	Значение	Описание
I	1[mm]	0.001 m	Длина элементарной ячейки
V	l^3	1E-9 m ³	Объем элементарной ячейки
V_f	0.6	0.6	Объемная доля базальтового волокна и базальтового расплава
V_f	$v_f \cdot V$	6E-10 m ³	Объем базальтового волокна
r_f	$\sqrt{V_f / (\pi \cdot l)}$	4.3702E-4 m	Радиус базальтового волокна
E1_f	120[GPa]	1.2E11 Pa	Модуль Юнга базальтового волокна (вдоль волокон)
E2_f	10[GPa]	1E10 Pa	Модуль Юнга базальтового волокна (поперек волокон)
G12_f	35[GPa]	3.5E10 Pa	Сдвиговый модуль базальтового волокна (вдоль волокон относительно поперечного направления)
G23_f	30[GPa]	3E10 Pa	Сдвиговый модуль базальтового волокна (поперёк волокон ↔ по толщине)
nu12_f	0.25	0.25	Коэффициент Пуассона базальтового волокна (вдоль волокон относительно поперечного направления)
nu23_f	0.32	0.32	Коэффициент Пуассона базальтового волокна (поперёк волокон ↔ по толщине)
E_r	85[GPa]	8.5E10 Pa	Модуль Юнга базальта
nu_r	0.30	0.3	Коэффициент Пуассона базальта
rho_f	2650 [kg/m ³]	2650 kg/m ³	Плотность базальтового волокна
rho_r	2900[kg/m ³]	2900 kg/m ³	Плотность базальтового расплава
rho_l	$\rho_f \cdot v_f + \rho_r \cdot (1 - v_f)$	2750 kg/m ³	Плотность композитного ламината
th	1[mm]	0.001 m	Толщина композитного ламината
rc	100[mm]	0.1 m	Радиус цилиндра
hc	500[mm]	0.5 m	Высота цилиндра
Ftot	1000[N]	1000 N	Суммарная нагрузка

Геометрия элементарной ячейки с базальтовым волокном в расплавленном базальте приведена на рисунке 1.

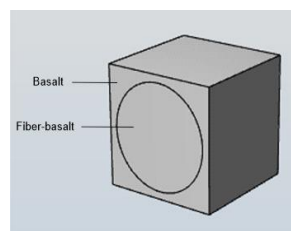


Рисунок 1. Геометрия элементарной ячейки с базальтовым волокном в расплавленном базальте.

Распределение эффективного напряжения по Мизесу (N/m^2) для четырех случаев нагрузки показано на рисунке 2.

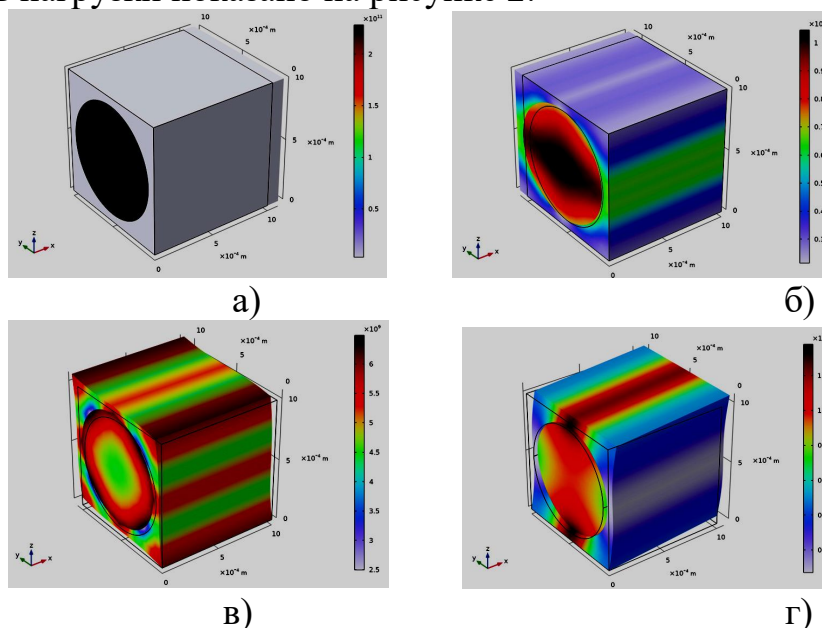


Рисунок 2. Распространения напряжения по элементарной ячейке из волокна и расплава базальта.

На рисунке 2 можно заметить появление напряжения в четырех случаях нагрузки в элементарной ячейке. Напряжение появляется внутри композитной цилиндрической арматуры и распространяется по бокам и сторонам ячейки. На рисунке 2, в) и 2, г) можно заметить напряженно-деформированное состояние сторон элементарной ячейки на фоне нагрузки.

Свойства композитного материала из базальтового волокна и базальтового расплава приведены в таблице 3 и 4.

Таблица 2. - Свойства базальтового волокна.

Свойства материала	Значение
$\{E_1, E_2, E_3\}$	$\{230, 15, 15\}$ GPa
$\{G_{12}, G_{23}, G_{13}\}$	$\{15, 7, 15\}$ GPa
$\{\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}\}$	$\{0.2, 0.07, 0.2\}$
ρ	2670 kg/m^3 [8, 9]

Таблица 3. - Свойства расплавленного базальта

Свойства материала	Значение
--------------------	----------

E	4 GPa
ν	0.35
ρ	2900 kg/m ³ [8, 9]

Последовательность укладки базальтового композитного ламината.

Базальтовый композитный ламинат состоит из пяти слоев толщиной 1 мм. Ориентация слоев различна как приведена на рисунке 3, а). На рисунке 3, б) приведен вид цилиндрической арматуры из базальтового волокна с изображением направление волокон, встроенных в расплав базальта. На рисунке 3, в) приведен цилиндр арматуры, состоящий из пяти слоев базальтового композита.

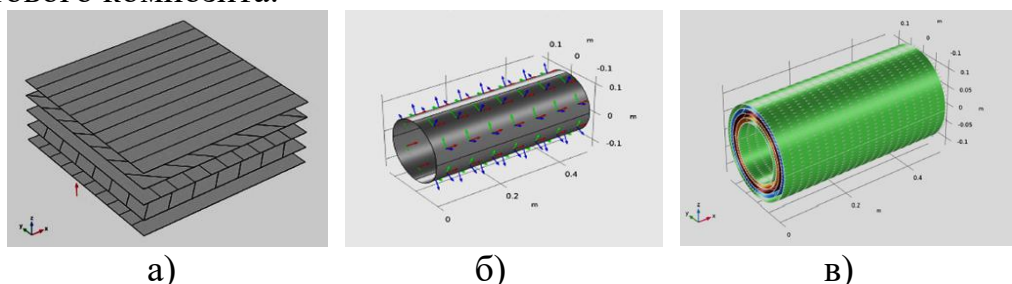


Рисунок 3. а - последовательность укладки [0/45/90/-45/0], показывающая ориентацию волокон слоёв, б - система координат композита с главным направлением вдоль оси арматуры, в - ориентация волокон в слоях, где угол слоя обозначен цветом.

Распределение напряжений по фон Мизесу.

Распределение напряжений между слоями волокнистого цилиндрического композита является прерывистым, при этом обе теории дают сходные распределения как приведено на рисунке 4.

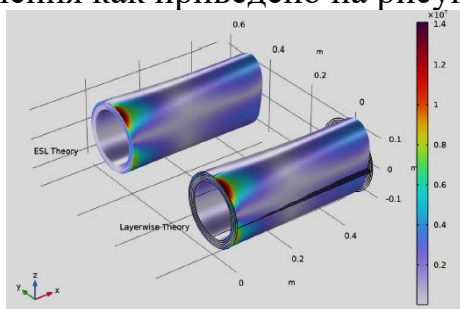


Рисунок 4. Распределение напряжений по фон Мизесу (N/m²) в композитном цилиндре арматуры, полученное с использованием многослойной (Layerwise Theory), и однослойной эквивалентной теориях (Equivalent Single Theory).

На рисунке 4 приведено распределение напряжений по фон Мизесу в композитном цилиндре арматуры, где видно, что результаты многослойной и эквивалентной однослойной теорий совпадают.

На рисунке 5 приведено распределение второго напряжения Пиолы–Кирхгофа: сплошные линии - многослойная теория, штриховые - эквивалентная однослойная. Различия по толщине незначительны.

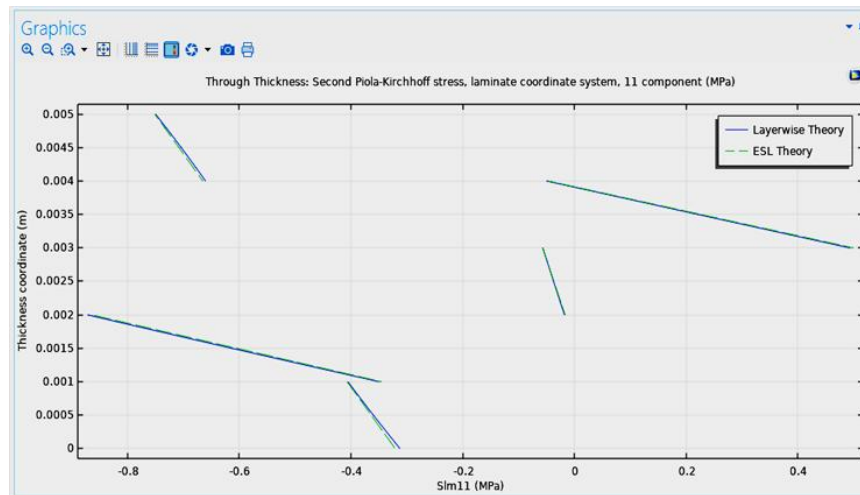


Рисунок 5. Второе напряжение Пиолы-Кирхгофа.

На рисунке 6 показано, что напряжения по фон Мизесу различаются по слоям, минимальные - в среднем слое с волокнами, перпендикулярными основному направлению.

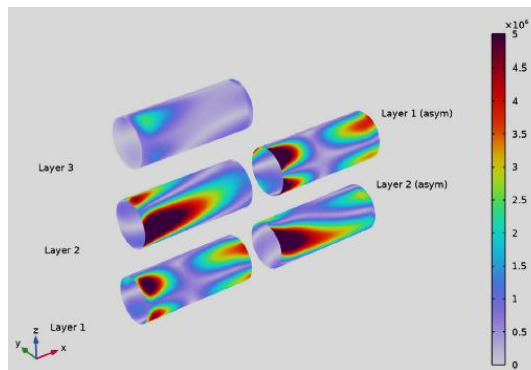


Рисунок 6. Распределение напряжения по фон Мизесу (N/m^2) в пяти слоях ламината.

На основе рисунков 5 и 6 можно утверждать, что отличие волны напряжений на многослойный и эквивалентный однослойный базальтовый композит составляет порядка 0.2 %.

Первые три собственные частоты цилиндрической арматуры приведены в таблице 5, а соответствующие формы колебаний и распределение волнового поля напряжений при разных частотах приведены на рисунке 7.

Таблице 5. - Сравнение собственных частот.

Собственная частота. Многослойная теория. (Hz)	Собственная частота. Эквивалентная однослойная теория. (Hz)
486	485
573	572
984	984

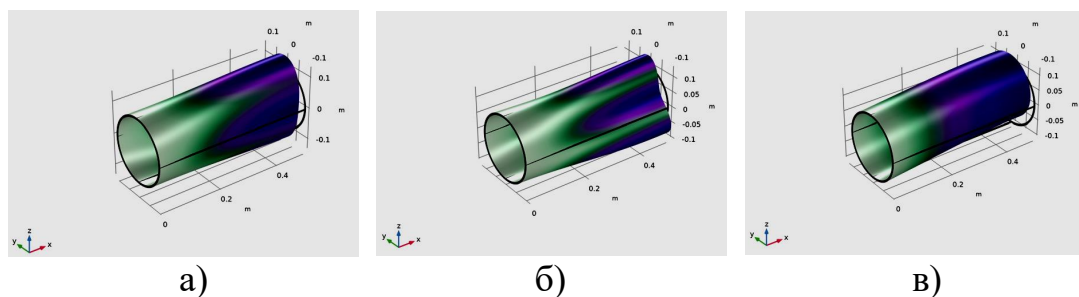


Рисунок 7. Распределение поля волны напряжения в цилиндрическом базальтовом композите на различных частотах; а - собственная частота 486.03 Hz, б - собственная частота 573 Hz, в - собственная частота 984 Hz, где m – величина смещения.

Из рисунка 7 видно, когда собственная частота колебаний базальтового цилиндрического композита составляет порядка 486 Гц, режим распространения волны напряжения внутри композита представляет плоскую волну. С увеличением частоты до 573 Гц появляются неплоские волны.

1). Тепловое расширение многослойной композитной оболочки

Композиты применяются там, где важны тепловые и структурные характеристики, следовательно, термоструктурный анализ тонких структур приобретает всё большее значение [6].

Определение модели

Исследуются теплопроводность и напряжённно-деформированное состояние оболочки, используя теорию слоёв, в зависимости от положения источника тепла.

Многослойная композитная оболочка состоит из шести плоских H-образных слоёв с высотой 25 см, толщиной полотна 15 см, шириной фланца 25 см, толщина фланца 5 см, как показано на рисунке 8, с укладкой [30/−45/75/−75/45/−30] и антисимметричен относительно средней плоскости.

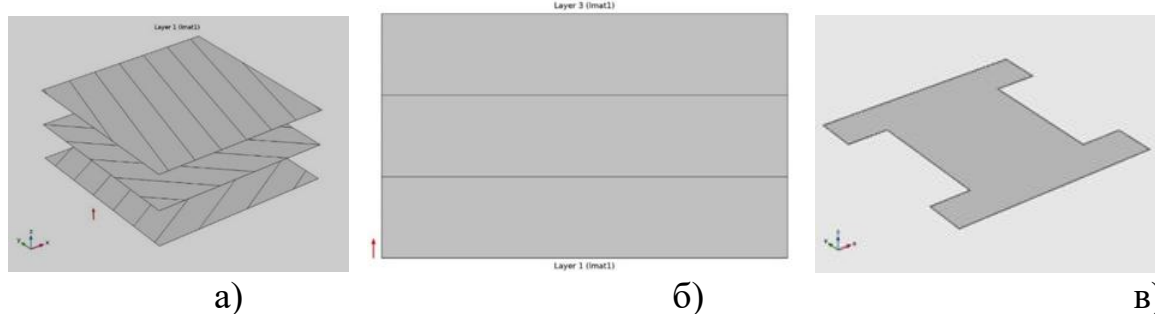


Рисунок 8. а - ориентация волокон в каждом слое снизу-вверх, б – толщина слоистой оболочки, в - слоистая оболочка H-образной формы.

Свойства материала

Слой оболочки выполнены из углеродных волокон в эпоксидной смоле. В таблице 6 приведены ненулевые элементы матрицы упругости гомогенизированного ортотропного материала.

Таблица 6. - Матрица эластичности композитного материала.

Матрица эластичности	Значение
$\{D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{22}, D_{23}, D_{33}, D_{44}, D_{55}, D_{66}\}$	$\{141.34, 3.35, 3.35, 10.25, 2.83, 10.25, 4.52, 2.95, 4.52\}$

Гомогенизированные ортотропные тепловые свойства многослойной композитной оболочки приведены в таблице 7.

Таблица 7. - Теплопроводность многослойной композитной оболочки

Теплопроводность	Значение (Вт/(м·К))
$\{k_{11}, k_{22}, k_{33}\}$	$\{6.2, 0.5, 0.5\}$

Коэффициент теплового расширения

Коэффициент теплового расширения композитного ламината рассчитывается по правилу смешивания на основе свойств волокна и матрицы, приведенные в таблице 8.

Таблица 8. - Свойства углеродного волокна и эпоксидной смолы

Название	Выражение	Значение	Описание
V _m	0.4	0.4	Объемная доля матрицы
V _f	0.6	0.6	Объемная доля волокна
nu _{12_f}	0.2	0.2	Коэффициент Пуассона волокна
nu ₁₂	$V_f \cdot nu_{12_f} + V_m \cdot nu_m$	0.26	Коэффициент Пуассона ламината
nu _m	0.35	0.35	Коэффициент Пуассона матрицы
E _{1_f}	230[GPa]	2.3E11 Pa	Модуль Юнга волокна (в направлении волокна)
E _m	4[GPa]	4E9 Pa	Модуль Юнга матрицы
alpha _{2_f}	8.5e-6[1/K]	8.5E-6 1/K	Коэффициент теплового расширения волокна (в направлении, перпендикулярном волокну)
alpha ₂	$V_f \cdot alpha_{2_f} \cdot (1 + nu_{12_f}) + V_m \cdot alpha_m \cdot (1 + nu_m) - nu_{12} \cdot alpha_1$	3.4718E-5 1/K	Коэффициент теплового расширения ламината (в направлении, перпендикулярном волокну)
alpha _{1_f}	-0.6e-6[1/K]	-6E-7 1/K	Коэффициент теплового расширения волокна (вдоль направления волокна)
alpha ₁	$(V_f \cdot alpha_{1_f} \cdot E_{1_f} + V_m \cdot alpha_m \cdot E_m) / (V_f \cdot E_{1_f} + V_m \cdot E_m)$	3.7249E-8 1/K	Коэффициент теплового расширения ламината (вдоль направления волокна)
alpha	55e-6[1/K]	5.5E-5	Коэффициент теплового расширения

m		1/К	матрицы
D_11	141.34[GPa]	1.4134E1 1 Pa	Матрица упругости ламината (вдоль направления)
D_12	3.35[GPa]	3.35E9 Pa	Матрица упругости ламината (поперек волокон)
k1	6.2[W/(m*K)]	6.2 W/(m·K)	Теплопроводность ламината вдоль направления волокон
k2	0.5[W/(m*K)]	0.5 W/(m·K)	Теплопроводность ламината, перпендикулярная направлению волокон
th	0.125[mm]	1.25E-4 m	Толщина ламината
A	25[cm]	0.25 m	Длина стороны
P0	10[W]	10 W	Поглощённая мощность пучка
ht	20[W/(m^2*K)]	20 W/(m^2·K)	Коэффициент теплопередачи
yp	0[m]	0 m	Положение пучка по оси Y

На основе данных из таблицы 8, коэффициенты теплового расширения ламината вдоль волокон и перпендикулярно им вычисляются по приведённым правилам смесей по (16 - 18), результаты которых приведены в таблице 9.

$$\alpha_{11} = \frac{V_f \alpha_{1f} E_{1f} + V_m \alpha_m E_m}{V_f E_{1f} + V_m E_m} \quad (16)$$

$$\nu_{12} = \nu_{12f} V_f + \nu_m V_m \quad (17)$$

$$\alpha_{22} = \alpha_{33} = (1 + \nu_m) V_m \alpha_m + (1 + \nu_{12f} \frac{\alpha_{1f}}{\alpha_{2f}}) V_f \alpha_{2f} - \nu_{12} \alpha_{11} \quad (18)$$

Таблица 9. - Коэффициенты теплового расширения слоев композитной оболочки.

Коэффициент теплового расширения	Значение (1/К)
{ $\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{33}$ }	{3.72E-8, 3.47E-5, 3.47E-5}

Коэффициент теплового расширения вдоль волокон на три порядка меньше поперечного из-за отрицательного значения у углеродных волокон вдоль их оси.

Граничные условия и нагрузки

К модели применяются следующие граничные условия и нагрузки:

- Конструктивные граничные условия: края при $X = 0$ и $X = 25$ см фиксированы.
- Тепловые граничные условия: По краям при $X = 0$ и $X = 25$ см задана комнатная температура, а на нижнюю поверхность оболочки нанесён конвективный поток с коэффициентом $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На верхнюю поверхность композита подаётся луч мощностью 10 Вт при $X = 12,5 \text{ см}$, $Z = 25 \text{ см}$, $Y = 0-25 \text{ см}$, с отклонением $2,5 \text{ см}$. На рисунке 8

показано, что при центральном нагреве температура максимальна в центре и распространяется радиально вдоль осей X и Y.

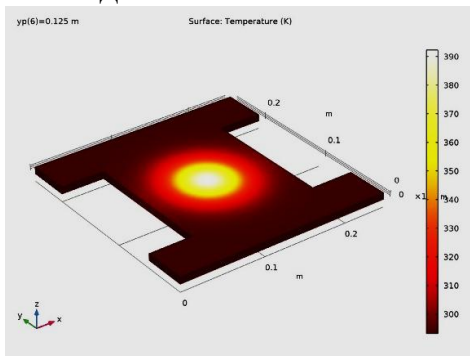


Рисунок 8. Температурный профиль при $y_p = 12,5$ см.

Ортотропия материала, и ориентация слоев создают сложную картину деформации, показанную на рисунке 9, которая не аналогична распределению напряжений.

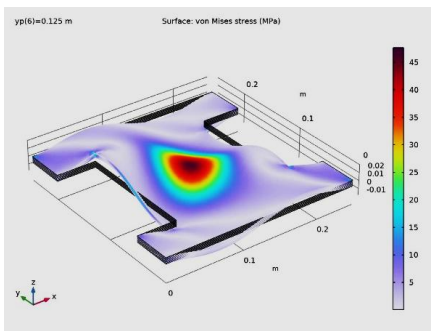


Рисунок 9. Распределение напряжений фон Мизеса в многослойной композитной оболочке при y -положении балки (y_p) = 0,125 м.

Для оценки влияния ориентации слоёв на распределение напряжений по фон Мизесу в средней плоскости построен график слоистого среза как показана на рисунке 10. Распределение и величина напряжений отличаются от верхнего слоя по сравнению с рисунком 9.

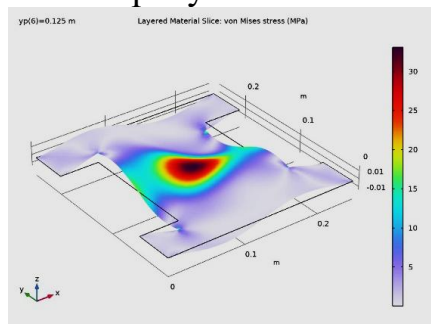


Рисунок 10. Распределение напряжений фон Мизесу в средней плоскости многослойной композитной оболочки при положении балки (y_p) = 0,125 м.

На рисунке 11 показано изменение напряжения фон Мизеса по толщине в четырёх точках оболочки. Видна неравномерность и вращательная симметрия напряжений между точками.

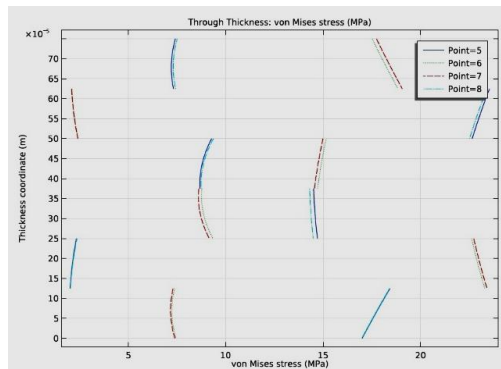


Рисунок 11. Изменение напряжения фон Мизеса по толщине в выбранных точках при $u_y = 0,125$ м.

Антисимметричная укладка очевидна на рисунках 12, 13 и 14. Например, распределения напряжений в слоях 1 и 6 аналогичны, но антисимметричны относительно средней плоскости композита.

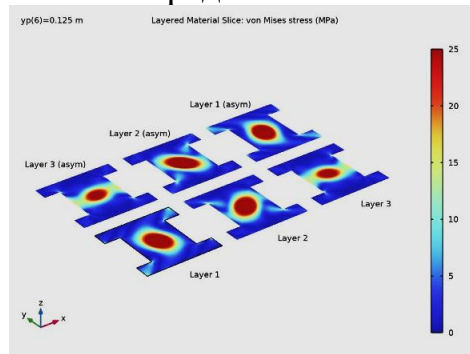


Рисунок 12. Напряжение фон Мизеса в системе координат ламината в средней плоскости каждого слоя при $u_y = 0,125$ м.

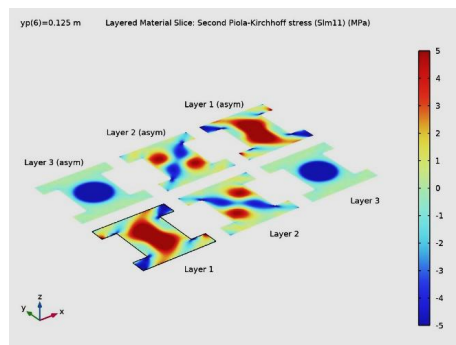


Рисунок 13. Составляющая напряжения 11 (направление волокон) в средней плоскости каждого слоя при $u_y = 0,125$ м.

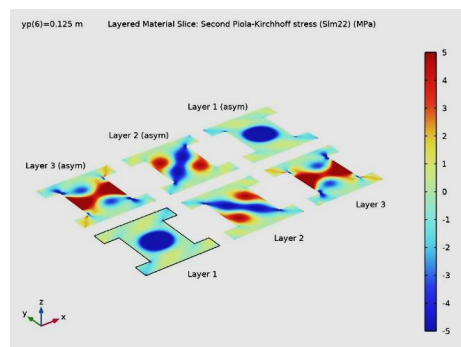


Рисунок 14. Составляющие напряжения 22 (поперечная направлению волокон) в средней плоскости каждого слоя при $u_y = 0,125$ м.

На рисунке 15 показано распределение напряжения сдвига, а также антисимметричный рисунок. Кроме того, знак напряжения меняется на противоположный при сравнении верхнего и нижнего слоев из-за антисимметрии.

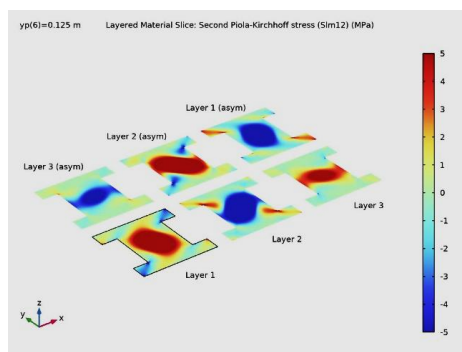


Рисунок 15. Составляющая напряжения 12 (сдвиг в плоскости) в средней плоскости каждого слоя при $u_y = 0,125$ м.

2) Определение коэффициента теплопроводности композитов на основе трехпериодической технологии с минимальной поверхностью

Исследуются однородные упругие и тепловые свойства композита на основе трехпериодической технологии с минимальной поверхностью (TPMS), которые можно регулировать изменением коэффициента Пуассона или объемной доли волокон. Анализируются влияние отрицательного коэффициента на однородные характеристики композита.

Определение модели

Элементарная ячейка гироидной трёхпериодической структуры с минимальной поверхностью как показана на рисунке 16 размерами 100 мм, а объемная доля определяется толщиной её стенок.

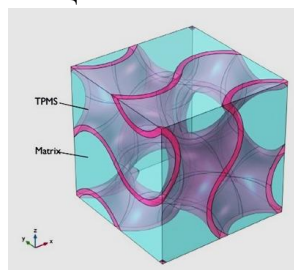


Рисунок 16. Геометрия элементарной ячейки гироида.

Свойства TPMS и матрицы

Свойства материала взяты из [7], где указано, что отношение модулей упругости TPMS и матрицы равны 20, а их значения равны 200 ГПа и 10 ГПа

соответственно. Для сравнения также рассмотрены параметры базальтового волокна и базальтовой матрицы.

Эффективной средой для численной реализации целей данной работы служит компьютерная программа COMSOL Multiphysics куда водятся параметры связующего и TPMS которые приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Параметры связующей матрицы и TPMS.

№	Название	Выражение	Значение	Описание
1	th	6[mm]	0.004 m	Толщина стенки
2	rho_m	3100[kg/m ³]	3000 kg/m ³	Плотность связующей матрицы
3	rho_f	6800[kg/m ³]	7000 kg/m ³	Плотность TPMS
4	nu_m	0.25	0.3	Коэффициент Пуассона связующей матрицы
5	nu_f	0.25	0.3	Коэффициент Пуассона TPMS
6	L	100[mm]	0.1 m	Длина ячейки
7	G_m	$E_m/(2*(1+\nu_m))$	3.8462E9 Pa	Модуль сдвига связующей матрицы
8	E_m	10[GPa]	1E10 Pa	Модуль Юнга связующей матрицы
9	E_f	18*E_m	2E11 Pa	Модуль Юнга TPMS
10	alpha_m	48E-6[1/K]	4.4E-5 1/K	Коэффициент теплового расширения связующей матрицы
11	alpha_f	0.9E-6[1/K]	8E-7 1/K	Коэффициент теплового расширения TPMS

На основе таблицы 10 были получены значения коэффициента теплопроводности композита на основе TPMS представленные в таблице 11.

Таблица 11 - Коэффициенты теплопроводности.

Коэффициент теплового расширения (1/K)		
1.6628E-5	-2.0386E-10	1.9775E-9
-2.0386E-10	1.6613E-5	-3.2889E-10
1.9775E-9	-3.2889E-10	1.6629E-5

Обычно твёрдые материалы имеют положительный коэффициент Пуассона ($\nu > 0$) [7, 9], но из таблицы 10 видно, что он может быть и отрицательным ($\nu < 0$). Такие материалы мало изучены. Коэффициент Пуассона базальтового композита исследован численно в Comsol Multiphysics.

3) Прогнозирование показателей разрушения и прочности композитного ламината из углеродного и базальтового волокна в Comsol Multiphysics

В среде COMSOL Multiphysics 6.0 выполнено прогнозирование разрушения четырёхслойного ламината на основе базальтовых и углеродных волокон с использованием их механических свойств. Расчёты проведены с применением шести полиномиальных критериев прочности и разрушения (Бу, Цай–Бу, Цай–Хилл, Хоффман, Ази–Цай–Хилл, Норрис), что позволило сопоставить значения индекса разрушения и коэффициента запаса прочности для композитного ламината на основе базальтовых и углеродных волокон и выявить различия в их прочностном поведении.

Коэффициент запаса прочности по полиномиальным критериям [9, 10] показывает, насколько материал близок к разрушению. Направление волокон задаёт анизотропию и определяет реакцию на нагрузки.

Определение модели

Объект исследования — четырёхслойный ламинат 1×1 см с толщиной слоя 50 мкм, нагруженный осевым растяжением; укладка волокон [90/–45/45/0], как показано на рисунке 17.

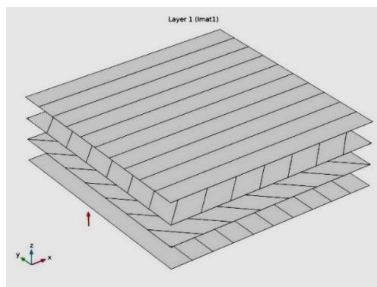


Рисунок 17. Схема последовательной укладки слоёв композитной оболочки снизу-вверх по направлению [90/–45/45/0], иллюстрирующая ориентацию волокон в каждом из слоёв.

Введение данных в Comsol Multiphysics 6.0

Механические свойства углеродных и базальтовых волокон введенные в Comsol Multiphysics 6.0 представлены в таблице 12, и в таблице 15 соответственно, а полученные результаты представлены в таблицах 13 и 14, и в таблицах 16 и 17.

Таблица 12. - Механические свойства базальтового волокна

Название	Выражение	Значение	Описание
th	0.05e-3[m]	5E-5 m	Толщина слоя
Ftotal	15[N]	15 N	Суммарная краевая нагрузка
E1	90[GPa]	9E10 Pa	Модуль Юнга (вдоль волокон)
E2	9[GPa]	9E9 Pa	Модуль Юнга (поперёк волокон в плоскости слоя)
E3	E2	9E9 Pa	Модуль Юнга (перпендикулярно плоскости ламината)

nu12	0.25	0.25	Коэффициент Пуассона (вдоль волокон → поперёк волокон в плоскости слоя)
nu23	0	0	Коэффициент Пуассона (по толщине при растяжении поперёк волокон)
nu13	0	0	Коэффициент Пуассона (толщина слоя при растяжении вдоль волокон)
G	3.46[GPa]	3.46E9 Pa	Сдвиговый модуль
Sigmats1	2500[MPa]	2.5E9 Pa	Прочность на растяжение (вдоль волокон)
Sigmats2	750[MPa]	7.5E8 Pa	Прочность на растяжение (поперёк волокон в плоскости слоя)
Sigmats3	Sigmats2	7.5E8 Pa	Прочность на растяжение (по толщине слоя)
Sigmacs1	400[MPa]	4E8 Pa	Прочность на сжатие (вдоль волокон)
Sigmacs2	100[MPa]	1E8 Pa	Прочность на сжатие (поперёк волокон в плоскости слоя)
Sigmacs3	Sigmacs2	1E8 Pa	Прочность на сжатие (по толщине слоя)
Sigmass23	4.3[MPa]	4.3E6 Pa	Сдвиговая прочность (поперёк волокон в плоскости слоя- по толщине слоя)
Sigmass13	Sigmass23	4.3E6 Pa	Сдвиговая прочность (вдоль волокон-по толщине слоя)
Sigmass12	Sigmass23	4.3E6 Pa	Сдвиговая прочность (вдоль волокон → поперёк волокон в плоскости слоя)

Таблица 13. – Полученный коэффициент запаса прочности композитного ламината из базальтового волокна

№	Критерий	Значение
1	Коэффициент запаса прочности по критерию Цай–Ву для ортотропного материала	3.8801
2	Коэффициент запаса прочности по критерию Хоффмана	3.8819
3	Коэффициент запаса прочности по критерию Цай–Хилла в условиях плоского напряжённого состояния	3.5750
4	Коэффициент запаса прочности по критерию Аззи–Цай–Хилл	3.5750
5	Коэффициент запаса прочности по критерию Норриса	3.5767
6	Коэффициент запаса прочности по критерию Цай–Ву для анизотропного материала	3.8801

Таблица 14. – Полученный индекс разрушения композитного ламината из базальтового волокна

№	Критерий	Значение
1	Индекс разрушения по критерию Цай–Ву	0.031438
2	Индекс разрушения по критерию Хоффмана	0.031370
3	Индекс разрушения по критерию Цай–Хилла	0.078245
4	Индекс разрушения по критерию Аззи–Цай–Хилла	0.078245
5	Индекс разрушения по критерию Норриса	0.078170
6	Индекс разрушения по критерию Цай–Ву для анизотропного материала	0.031438

Таблица 15. - Механические свойства углеродного волокна

Название	Выражение	Значение	Описание
th	0.05e-3[m]	5E-5 m	Толщина слоя
Ftotal	15[N]	15 N	Суммарная краевая нагрузка
E1	200[GPa]	2E11 Pa	Модуль Юнга (вдоль волокон)
E2	20[GPa]	2E10 Pa	Модуль Юнга (поперёк волокон в плоскости слоя)
E3	E2	2E10 Pa	Модуль Юнга (перпендикулярно плоскости ламината)
nu12	0.15	0.15	Коэффициент Пуассона (вдоль волокон → поперёк волокон в плоскости слоя)
nu23	0	0	Коэффициент Пуассона (по толщине при растяжении поперёк волокон)
nu13	0	0	Коэффициент Пуассона (толщина слоя при растяжении вдоль волокон)
G	12[GPa]	1.2E10 Pa	Сдвиговый модуль
Sigmats1	2800[MPa]	2.8E9 Pa	Прочность на растяжение (вдоль волокон)
Sigmats2	700[MPa]	7E8 Pa	Прочность на растяжение (поперёк волокон в плоскости слоя)
Sigmats3	Sigmats2	7E8 Pa	Прочность на растяжение (по толщине слоя)
Sigmacs1	700[MPa]	7E8 Pa	Прочность на сжатие (вдоль волокон)
Sigmacs2	150[MPa]	1.5E8 Pa	Прочность на сжатие (поперёк волокон в плоскости слоя)
Sigmacs3	Sigmacs2	1.5E8 Pa	Прочность на сжатие (по толщине слоя)
Sigmass23	2.6[MPa]	2.6E6 Pa	Сдвиговая прочность (поперёк волокон в плоскости слоя- по толщине слоя)
Sigmass13	Sigmass23	2.6E6 Pa	Сдвиговая прочность (вдоль волокон-по

			толщине слоя)
Sigmass12	Sigmass23	2.6E6 Pa	Сдвиговая прочность (вдоль волокон → поперёк волокон в плоскости слоя)

Таблица 16. – Полученный коэффициент запаса прочности композитного ламината из углеродного волокна

№	Критерий	Значение
1	Коэффициент запаса прочности по критерию Цай–Ву для ортотропного материала	1.8639
2	Коэффициент запаса прочности по критерию Хоффмана	1.8640
3	Коэффициент запаса прочности по критерию Цай–Хилла в условиях плоского напряжённого состояния	1.8198
4	Коэффициент запаса прочности по критерию Аззи–Цай–Хилл	1.8198
5	Коэффициент запаса прочности по критерию Норриса	1.8198
6	Коэффициент запаса прочности по критерию Цай–Ву для анизотропного материала	1.8639

Таблица 17. – Полученный индекс разрушения композитного ламината из углеродного волокна

№	Критерий	Значение
1	Индекс разрушения по критерию Цай–Ву	0.27545
2	Индекс разрушения по критерию Хоффмана	0.27542
3	Индекс разрушения по критерию Цай–Хилла	0.30195
4	Индекс разрушения по критерию Аззи–Цай–Хилла	0.30195
5	Индекс разрушения по критерию Норриса	0.30195
6	Индекс разрушения по критерию Цай–Ву для анизотропного материала	0.27545

1.3.3. Определение прочности и жёсткости композитов на основе базальтовых, углеродных и стеклянных волокон средствами искусственного интеллекта

В данном исследовании определяется и сравнивается некоторые физико-механические свойства (прочность на разрыв при растяжении и изгибная жёсткость) композитного ламината (панели) стандартных размеров 1261x190 мм, толщиной – 8 мм на основе базальтового и углеродного волокна и стекловолокна средствами искусственного интеллекта ИИ.

Некоторые физико-механические параметры базальтовых пород заимствованы из [11], посвящённого исследованию микромеханических характеристик композитного цилиндра, а тепловые параметры - из работы [12].

Прочность на разрыв при растяжении

Предел прочности при растяжении — это наибольшее растягивающее напряжение, которое материал способен выдержать до своего разрушения. Данный показатель отражает сопротивление материала действию растягивающих сил и определяется экспериментально в ходе испытаний на растяжение [13, 14].

Проведено сравнение прочности композиционных ламинатов (панелей) стандартных размеров 1261x190, толщиной – 8 мм на основе базальтовых и углеродных волокон и стекловолокна.

Удельная потенциальная энергия упругой деформации материала выражается формулой (19):

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (19)$$

где σ -нормальное напряжение(прочность), E - модуль упругости Юнга или модуль продольной упругости; U - удельная потенциальная энергия упругой деформации.

Таблица 18. – Физико-механические свойства волокон на основе базальта, углерода и стекла.

<i>Свойства</i>	<i>Базальтово е волокно</i>	<i>Углеродное волокно</i>	<i>Стекло (Стекловолокно)</i>
Плотность, кг/м ³	2700-3100	1700–1800	2500
Прочность на разрыв, МПа	3000 - 4840	2500 -6000	3100 - 3800
Модуль упругости, ГПа	79-93	200–300	83-86
Термостойкость, °С	700-1000	400-450	260°С-1000

Средние значения физико-механических свойств волокна из базальта, углерода и стекла, сгенерированные средствами ИИ ChatGPT и DeepSeek-R1 приведены в таблице 18. С использованием физико-механических параметров базальтовых, углеродных и стеклянных волокон определено σ , U , и E композитной панели (КП):

1. Базальт: $\sigma = 3920$ МПа, $E = 86$ ГПа.
2. Углерод: $\sigma = 4250$ МПа, $E = 250$ ГПа.
3. Стекло: $\sigma = 3450$ МПа, $E = 84.5$ ГПа.

1. КП на основе базальта:

$$\begin{aligned}\sigma &= 3920 \text{ МПа} = 3.92 \cdot 10^9 \text{ Па} \\ E &= 86 \text{ ГПа} = 8.6 \cdot 10^{10} \text{ Па} \\ U &= \frac{(3.92 \cdot 10^9)^2}{2 \cdot 8.6 \cdot 10^{10}} = \frac{15.3664 \cdot 10^{18}}{1.72 \cdot 10^{11}} \approx 8.93 \cdot 10^7 \text{ Дж} / \text{м}^3\end{aligned}$$

2. КП на основе углерода:

$$\begin{aligned}\sigma &= 4250 \text{ МПа} = 4.25 \cdot 10^9 \text{ Па} \\ E &= 250 \text{ ГПа} = 2.5 \cdot 10^{11} \text{ Па} \\ U &= \frac{(4.25 \cdot 10^9)^2}{2 \cdot 2.5 \cdot 10^{11}} = \frac{18.0625 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{11}} \approx 3.61 \cdot 10^7 \text{ Дж} / \text{м}^3\end{aligned}$$

3. КП на основе стекла:

$$\begin{aligned}\sigma &= 3450 \text{ МПа} = 3.45 \cdot 10^9 \text{ Па} \\ E &= 84.5 \text{ ГПа} = 8.45 \cdot 10^{10} \text{ Па} \\ U &= \frac{(3.45 \cdot 10^9)^2}{2 \cdot 8.45 \cdot 10^{10}} = \frac{11.9025 \cdot 10^{18}}{1.69 \cdot 10^{11}} \approx 7.05 \cdot 10^7 \text{ Дж} / \text{м}^3\end{aligned}$$

Таким образом, удельные потенциальные энергии упругой деформации (Дж/м³) для КП с соответствующими волокнами составляют:

- КП (Базальт): $8,93 \cdot 10^7$ Дж/м³;
- КП (Углерод): $3,61 \cdot 10^7$ Дж/м³;
- КП (Стекло): $7,05 \cdot 10^7$ Дж/м³.

На рисунке 18 показано сравнение результатов прочности на разрыв (МПа) композитной панели из волокон на основе базальта, углерода и стекла.

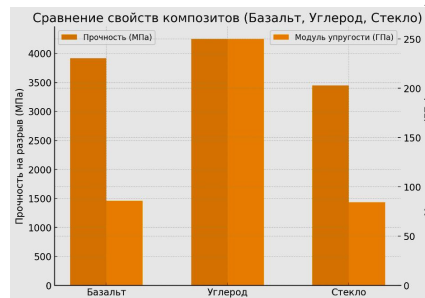


Рисунок 18. Прочности на разрыв (МПа) и модуль упругости (ГПа) КП на основе волокон из базальта, углерода и стекла.

Изгибная жёсткость (ортотропного) композиционного ламината.

Изгибная жёсткость – это способность элемента сопротивляться изгибу, характеризуемая произведением модуля упругости материала (E) на момент инерции его сечения (I). Чем больше эта величина, тем меньше прогиб и деформация под действием нагрузки [15].

Проведено сравнение изгибной жесткости композиционных ламинатов (панелей) стандартных размеров 1261x190 мм, толщиной – 8 мм на основе базальтовых и углеродных волокон и стекловолокна.

Изгибная жесткость D выражается через модуль упругости и момент инерции сечения формулой (3.27):

$$D = E \cdot I$$

(20)

где E – модуль упругости композита (Па),

I – момент инерции сечения определяется по формуле (3.28):

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

(21)

Для расчета используем следующие исходные данные:

Длина панели $L = 1261 \text{ мм} = 1.261 \text{ м}$; ширина панели $b = 190 \text{ мм} = 0.190 \text{ м}$;

толщина $h = 8 \text{ мм} = 0.008 \text{ м}$ и

Осевой момент инерции (момент инерции сечения):

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0.190 \cdot (0.008)^3}{12} \approx 8.11 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Тогда для жесткости панели получим:

$$D = E \cdot 8.11 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4.$$

Для базальтовой КП:

$$E = 86 \text{ ГПа} = 86 \cdot 10^9 \text{ Па},$$

$$D_{\text{basalt}} \approx 698 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

Для углеродной КП:

$$E = 250 \text{ ГПа} = 250 \cdot 10^9 \text{ Па},$$

$$D_{\text{carbon}} \approx 2028 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

Для стеклянной КП:

$$E = 84.5 \text{ ГПа} = 84.5 \cdot 10^9 \text{ Па},$$

$$D_{\text{glass}} \approx 685 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

Таблица 19. – Сравнительные данные изгибной жесткости композиционной панели размерами 1261x190 мм, толщиной 8 мм для трех типов волокон.

Материал	Среднее значение модуля упругости E , ГПа	Момент инерции I , м ⁴	Изгибная жесткость $D = E \cdot I$, Н·м ²
Базальт	86	$8,11 \cdot 10^{-9}$	698
Углерод	250	$8,11 \cdot 10^{-9}$	2028
Стекловолокно	84,5	$8,11 \cdot 10^{-9}$	685

На основе таблицы 19 построен график изгибной жесткости композитных панелей как показано на рисунке 19.

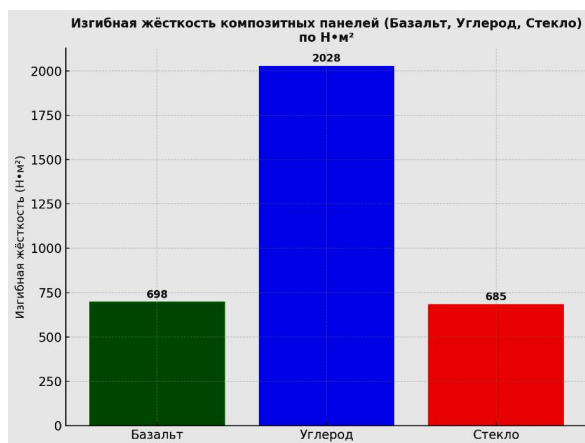


Рисунок 19. Изгибная жесткость композитных панелей из волокон базальта, углерода и стекла.

Выводы:

1. Проведен анализ структурной целостности четырехслойного, композитного ламината из углеродных волокон посредством параметров, называемых индексом разрушения и коэффициентом запаса прочности с использованием шести полиномиальных критериев разрушения.
2. Продемонстрированы основные этапы моделирования физических процессов в композитных материалах и определены механические, прочностные свойства углеродного и базальтового волокон в программном продукте конечно-элементного анализа Comsol Multiphysics с определением модели со свойствами материалов и с граничными условиями.
3. По результатам численного моделирования индекса разрушения и коэффициента запаса прочности композитного ламината из углеродных и базальтовых волокон установлено, что коэффициент запаса прочности у композитного ламината из базальтового волокна выше чем у углеродного в 2.02 раза, а индекс разрушения у композитного ламината из базальтового волокна является в 6,32 раза ниже, чем у углеродного волокна. Из полученных данных можно утверждать, что материал с более прочными механическими и прочностными характеристиками является композитный ламинат из базальтового волокна.

1.3.4. Получение водорода на основе электрофизической ионизации воды: сравнительный анализ

Глобальный переход к зеленой энергетике ставит перед научным сообществом задачу разработки эффективных и экономичных способов получения водорода (H₂), который рассматривается как одно из ключевых топлив будущего. В настоящее время основным промышленным методом

получения «зеленого» водорода является электролиз воды ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Однако, как отмечено авторами, современные промышленные электролизеры потребляют значительное количество энергии ($\approx 3,9\text{--}4,1$ кВт·ч на $1 \text{ м}^3 \text{ H}_2$), что при низшей теплотворной способности водорода $\approx 3,0$ кВт·ч/ м^3 делает процесс экономически невыгодным без субсидий или в условиях высоких цен на электроэнергию [16]. При этом капитальные затраты на электролизеры часто окупаются только при условии низких эксплуатационных расходов, в первую очередь, за счет снижения потребления электричества [17].

Анализ публикаций за последние пять лет демонстрирует устойчивый прогресс в разработке энергоэффективных методов получения водорода. Начиная с 2019 года, когда промышленные электролизеры демонстрировали КПД 50–70% при щелочном электролизе [18], исследования постепенно сместились в сторону инновационных подходов. В 2021 году прорывом стало создание низковольтного электролиза с одновременным выделением водорода на обоих электродах [19]. Этот метод, основанный на окислении природных альдегидов, позволил снизить энергозатраты без потери производительности. К 2023 году акустоплазменный разряд в жидкофазных средах достиг рекордного КПД 60–70%, превзойдя традиционные электролизные системы по энергоэффективности [20]. Параллельно в 2024 году начались эксперименты с фотоиндуцированным расщеплением воды на катализаторах из оксида титана, что открыло перспективу прямого использования солнечной энергии [21].

Современные разработки 2025 года сосредоточены на экономической составляющей: гибридные катализаторы на основе фталоцианина кобальта снижают стоимость электролизеров, а протонообменные мембраны для сточных вод решают проблему дефицита пресной воды [22]. При этом сохраняется интерес к химическим методам, таким как реакция магния с водой, где безопасность процесса компенсирует зависимость от реакционной способности металла [23].

Общая тенденция отражает переход от простого повышения КПД к комплексной оптимизации – сочетанию энергоэффективности, снижения капитальных затрат и экологической устойчивости [17, 24].

В связи с этим актуальным становится поиск альтернативных или модифицированных методов ионизации и активации воды, которые позволили бы снизить удельные энергозатраты. В данной работе исследуются два подхода:

1. *Электрофизическая ионизация (ЭФИ) при низких напряжениях.*
2. *Электрохимический метод, основанный на химической реакции активного металла (алюминия) с водой в щелочной среде (каустическая сода).*

Целью исследования является сравнительный анализ этих методов с акцентом на их энергетическую эффективность и потенциал для масштабирования, а также анализ последних литературных данных в области энергоэффективного получения водорода.

1. Методика исследования

1.1. Электрофизическая ионизация (ЭФИ)

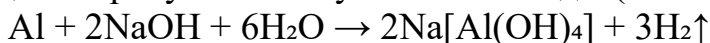
Исследование проводилось с использованием установки, позволяющей подавать низкое напряжение (до 29 В) на электроды, погруженные в воду. Основные варьируемые параметры:

- Напряжение (U) – 10 В.
- Площадь одного электрода (A) – 17,55 см².
- Расстояние между электродами (d) – 1 мм.
- Объем воды (V_{H_2O}) – 500 мл.
- Плотность тока (j) – 3,4 мА/см².
- Время процесса (t) – 30 мин.
- Измеряемый параметр: объем полученного водорода (V_{H_2}).

Расчет глубины ионизации: Глубина ионизации (L) рассчитывалась как отношение объема разложенной воды к площади поверхности электрода. Объем разложенной воды определялся через объем полученного водорода по закону Фарадея и стехиометрии реакции электролиза. Упрощенная формула имеет вид: $L = (V_{H_2} * M \cdot 10^{-3}) / (\rho A k)$, где M – молярная масса воды (18 г/моль), ρ – плотность воды (1 г/см³), k – стехиометрический коэффициент (для полного разложения 2 моль H₂O на 2 моль H₂, $k=1$). В работе приведен результат: $L = 3,11 \cdot 10^{-8}$ см.

1.2. Электрохимический способ (реакция алюминия с щелочью)

Исследование проводилось на основе химической реакции алюминия (Al) с водой в присутствии каустической соды (NaOH) по уравнению:



Варьируемые параметры (см. Таблицу 1):

- Объем воды (V_{H_2O}): 300 мл (постоянно).
- Масса NaOH: 30 г (постоянно).
- Масса Al: от 13 г до 18 г (варьируется). Измеряемый параметр: объем полученного водорода (V_{H_2}).

2. Результаты научных экспериментов

2.1. Электрофизическая ионизация

При заданных параметрах ($U=10$ В, $A=17,55$ см², $d=1$ мм) и использовании 500 мл воды за 30 минут объем полученного водорода составил 250 мл. Результаты показывают, что при низком напряжении можно получить значительный объем водорода. Однако расчетная глубина ионизации (L) составила лишь $3,11 \cdot 10^{-8}$ см, что указывает на то, что активным воздействию подвергается крайне тонкий приэлектродный слой воды.

2.2. Электрохимический способ

Результаты экспериментов представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Объем полученного водорода электрохимическим способом.

№	Вода, мл	Каустическая сода, г	Алюминий, г	Водород, мл
1	300	30	13	140
2	300	30	14	160
3	300	30	15	180
4	300	30	16	180
5	300	30	17	180
6	300	30	18	180

Максимальный объем водорода (180 мл) был получен при использовании 15 г алюминия, дальнейшее увеличение массы Al не приводило к росту выхода H₂, что, вероятно, указывает на ограничение реакции либо по концентрации NaOH, либо по времени проведения эксперимента.

3. Анализ полученных данных.

3.1. Сравнение ЭФИ и электрохимического способа

Прямое сравнение методов в контексте энергоэффективности является ключевым. Электрохимический способ (Al+NaOH) не требует внешнего источника электроэнергии в момент проведения реакции, однако его полную эффективность следует оценивать с учетом энергозатрат на производство исходных реагентов (Al и NaOH). Производство 1 кг первичного алюминия требует около 15 кВт·ч электроэнергии [25], а производство NaOH также является энергоемким (электролиз рассола).

ЭФИ при 10 В демонстрирует потенциал для существенного снижения эксплуатационных расходов за счет работы при низком напряжении, что напрямую коррелирует с выводом из обзора литературы о перспективности низковольтных систем [19]. За 30 минут из 500 мл воды получен 250 мл H₂. Потребленная энергия составила $W = UIt = U(jA)t = 10 \text{ В} (0,0034 \text{ А/см}^2 \cdot 17,55 \text{ см}^2) \cdot 1800 \text{ с} \approx 1075 \text{ Дж} \approx 0,0003 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Удельные энергозатраты в данном эксперименте составили $(0,0003 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / 0,00025 \text{ м}^3) = 1,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$, что уже ниже порогового значения в 3 кВт·ч/м³ и значительно ниже показателей промышленного электролиза (4 кВт·ч/м³). Факт работы при $U=10 \text{ В}$ против 1,7-2,0 В в промышленных электролизерах в сочетании с крайне малой плотностью тока ($j=3,4 \text{ мА/см}^2$ против 200-1000 мА/см²) и получение столь низких удельных затрат указывает на высокий потенциал метода.

3.2. Потенциал ЭФИ

Критическим параметром ЭФИ является глубина ионизации ($3,11 \cdot 10^{-8} \text{ см}$). Этот результат говорит о том, что механизм ионизации крайне локализован и, вероятно, связан с образованием микроплазмы или локальных

электрических пробоев в приэлектродном слое [20, 26]. Если удастся увеличить глубину ионизации, или, что более реалистично, оптимизировать геометрию электродов и частоту импульсов для более эффективного воздействия на весь объем воды, выход водорода может быть значительно увеличен. В сравнении с неклассическими методами получения водорода, такими как акустоплазменный разряд [20], ЭФИ имеет схожую концепцию воздействия на воду неклассическим электрическим разрядом, который может иметь высокий КПД (60–70%).

Выводы:

1. Электрофизический метод получения водорода, реализованный при низком напряжении (10В), продемонстрировал потенциально высокую энергоэкономичность. Рассчитанные удельные энергозатраты ($\sim 1,2$ кВт·ч/м³) оказались ниже показателей традиционного электролиза и порогового значения, определяемого низшей теплотой сгорания водорода, что соответствует главной цели исследования.
2. Крайне малая расчетная глубина ионизации ($3,11 \cdot 10^{-8}$ см), наблюдаемая в эксперименте по ЭФИ, с одной стороны, указывает на высокую локальную эффективность процесса, а с другой — подчеркивает значительный потенциал для его оптимизации. Увеличение выхода водорода представляется достижимым за счет целенаправленного подбора рабочих параметров, таких как геометрия и материал электродов, межэлектродное расстояние, частота и форма подаваемого сигнала, а также введение в воду добавок-активаторов.
3. Электрохимический метод на основе реакции алюминия с щелочью (Al + NaOH) продемонстрировал ограниченный и не scaling выход водорода (максимум 180 мл в условиях эксперимента). Его общая экономическая и энергетическая эффективность является низкой вследствие высокой стоимости и значительных косвенных энергозатрат на производство реагентов [25]. Это делает данный метод менее привлекательным для крупномасштабного производства «зеленого» водорода по сравнению с перспективными методами электролиза, такими как оптимизированная ЭФИ.

Планы дальнейших исследований

На основании проведенного анализа сформированы следующие перспективные направления для дальнейшей работы:

1. Оптимизация электрофизической ионизации. Ключевой задачей является увеличение глубины ионизации и, как следствие, объема разлагаемой воды. Для этого планируется: разработка реакторов с новой архитектурой электродов, например, с использованием пористых, сетчатых структур или систем с импульсной подачей напряжения; исследование влияния частотно-импульсных режимов подачи напряжения на энергоэффективность, скорость процесса и выход водорода и апробация методов физико-химической активации процесса, включая использование ультразвуковой кавитации для

дегазации и перемешивания приэлектродного слоя, а также добавление минимальных количеств инертных электролитов для повышения проводимости среды.

2. Гибридизация метода ЭФИ. Для преодоления фундаментальных энергетических барьеров процесса планируется исследование синергетических эффектов при комбинации ЭФИ с гетерогенным катализом.

Будут изучены: электроды с нанесенными каталитическими покрытиями на основе доступных и стабильных материалов (например, оксиды или соли переходных металлов: Ni, Co, Mn); влияние катализаторов на снижение потенциала инициирования ионизации, стабильность процесса и общий энергетический КПД системы.

3. Масштабирование и технологический аудит. Для оценки практической применимости и конкурентоспособности метода запланированы: проектирование и создание опытно-лабораторной установки с увеличенной производительностью и непрерывным режимом работы; проведение всестороннего технико-экономического анализа (ТЭА) на основе данных с пилотной установки, включая точное определение удельных энергозатрат ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$) и предварительную оценку капитальных затрат и сравнительный анализ экономических и эксплуатационных показателей с существующими промышленными технологиями получения водорода.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Созданная математическая модель позволяет анализировать распределение напряжений и деформаций в цилиндрического изделия из базальтовых горных пород под действием распределенной нагрузки. Уравнения движения и условия прочности, представленные в данной статье, могут быть использованы для численного моделирования оптимальных параметров цилиндра и оценки ее надежности.

2. На основе микромеханического анализа, проведенный с использованием Comsol Multiphysics, установлено, что собственные частоты и формы мод напряжений в базальтовой композитной трубе сильно зависят от объемной доли и плотности базальтового волокна и расплава, при этом увеличение этих параметров приводит к снижению собственной частоты колебаний и волны напряжений на многослойный и эквивалентный однослойный базальтовый ламинат составляет порядка 0.2 %.

3. Проведенный в COMSOL Multiphysics сравнительный анализ ламинатов из углеродных и базальтовых волокон, с учётом их механических и прочностных параметров, показал, что базальтовый ламинат демонстрирует значительно лучшие прочностные характеристики: его коэффициент запаса прочности в 2,02 раза выше, а индекс разрушения в 6,32 раза ниже, чем у углеродного ламината, согласно шести полиномиальным критериям разрушения.

4. Электрофизический метод получения водорода, реализованный при низком напряжении (10В), продемонстрировал потенциально высокую энергоэкономичность. Рассчитанные удельные энергозатраты ($\sim 1,2$ кВт·ч/м³) оказались ниже показателей традиционного электролиза и порогового значения, определяемого низшей теплотой сгорания водорода, что соответствует главной цели исследования.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Шакирзянов, Р. А. Динамика и устойчивость сооружений [Текст]: учеб. пособие / Р. А. Шакирзянов, Ф. Р. Шакирзянов - Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013, - 120 стр.
2. Лаврович, Н. И. Оценка надежности и долговечности деталей по параметрам колебательного процесса. Динамика систем, механизмов и машин [Текст] / Н. И. Лаврович // Тез. докл. междунаро. конференция. 26-28 октября. - 1999. – Омск. – С. 88-89.
3. Основные свойства базальтовых волокон производства компании "Каменный Век" [Электронный ресурс] / Интернет ресурс: https://basfiber.com/image/catalog/prin/Kam_Vek_mech_svoistva.pdf (Дата обращения: 24.10.2025).
4. Сравнительные свойства БНВ и стекловолокна [Электронный ресурс] / Интернет ресурс: <https://meltrock.ru/info/sravnitelnye-svoystva-bnv-i-steklovolokna/> (Дата обращения: 24.10.2025).
5. Экспериментальное определение теплопроводности композиционных материалов в широком диапазоне значений при комнатной температуре [Текст] / [А. Н. Чистов, М. Ю. Кладов, И. Б. Пронин и др.] // Наука и инновации. - 2019. - №9.- С.1-16.
6. Chawla, K. Numerical predictions for the effect of negative Poisson's ratio on thermoelastic properties of triply periodic minimal surface-based composites / R. Kiran // Results Mater. 2022. Vol. 14. Pp. 100273.
7. Ландау, Л. Д. Теория упругости [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // Наука, - 1965. – 204 с.
8. Karsh, P. K. Spatial vulnerability analysis for the first ply failure strength of composite laminates including effect of delamination / P. K. Karsh, T. Mukhopadhyay, S. Dey // Composite Structures. 2018. Pp. 554-567. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.078>
9. Gholizadeh, S. A review of non-destructive testing methods of composite materials / S. Gholizadeh // Procedia Structural Integrity. 2016. Pp. 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008>
10. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. ГОСстандарт России. ИПК Издательство стандартов, Москва. (2000).
11. Маматов, Э. У. Определение прочностных характеристик базальтового композита в COMSOL Multiphysics / Э. У. Маматов, Ы. Т. Ташполотов // Бюллетень науки и практики. – 2023. – Т. 9, № 7. – С. 276-285.

12. Маматов, Э. У. Тепловое расширение многослойной композитной оболочки / Э. У. Маматов, Ы. Ташполотов // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 12-1. – С. 46-53.
13. Хаджиева С. С. Испытание материалов на растяжение и их свойств //Механика и технология. – 2025. – Т. 6. – №. Спец выпуск 1. – С. 58-63.
14. Прочность на разрыв против. Прочность на растяжение [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ru.hlc-metalparts.com/news/breaking-strength-vs-tensile-strength-17308349166593024.html>
15. Разин С. Н., Коваленко Н. И., Турыгин А. Б. Способ определения изгибной жесткости волокна //Вестник. №4 (16).- 2024 – С. 53-57.
- 16.1.Кочетков, О. В., Кузнецов, В. А. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 4. – С. 384-394.
- 17.2.IRENA. Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Part II - Technology Review of Hydrogen Carriers. – International Renewable Energy Agency, 2023.
- 18.3.Иванов, А. В. Электролиз воды в промышленных генераторах водорода // Сборник тезисов конференции «Водород. Технологии. Будущее». – М., 2019.
- 19.4.Sheng, W., et al. Efficient hydrogen production from water using a single-atom catalyst and light // Nature Energy. – 2021. – Vol. 6, № 11. – P. 1070-1078.
- 20.5.Bruggeman, P. J., et al. Plasma-liquid interactions: a review and roadmap // Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – Vol. 32, № 5. – P. 053001.
- 21.6.Wang, Q., et al. Advanced catalyst designs for sustainable hydrogen production from water splitting // Advanced Materials. – 2024. – Vol. 36, № 10. – P. 2307910.
- 22.7.Евдокимов, А. В. Ученые разработали гибридный катализатор для дешевого получения водорода из воды // Онлайн-журнал «Энергия+». – 2025.
- 23.8.Eriksson, S., & Granberg, F. Hydrogen generation from aluminum-water reactions: A review // International Journal of Energy Research. – 2022. – Vol. 46, № 10. – P. 13189-13206.
- 24.9.Николаев, В. Л., Симонов, В. А., Симонов, А. В. Получение водорода в акустоплазменном разряде в жидкости // Физика и техника плазмы и плазменных технологий. – 2023.
- 25.10.European Aluminium. Environmental Profile Report: Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. – 2018.
- 26.11.Sirotkin, N. A., et al. Plasma-assisted electrochemical processes: new opportunities for water treatment and hydrogen production // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022. – Vol. 55, № 33. – P. 333001.

Приложения

1. СПИСОК НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ, ОСНОВАННЫХ НА ПРОЕКТЕ.

1.1. Статьи, опубликованные в системе Web of Science:

№	Название статьи	Scopus Author ID, ORCID № doi.	Название журнала, год, номер, страницы, ссылка	Общая страница	Авторы
1	<i>Не имеется</i>				

1.2. Статьи, опубликованные в системе Scopus:

№	Название статьи	Scopus Author ID, ORCID № doi.	Название журнала, год, номер, страницы, ссылка	Общая страница	Авторы
1	Extraction of valuable elements from industrial waste in the Kyrgyz Republic based on the process of electrophysical ionization	https://doi.org/10.5109/7363500	EVERGREE N - Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, Vol. 12, Issue 02, pp. 1154-1166, June, 2025. www.tj.kyushu-u.ac.jp)	14с.	Ибраимов Т.К., Сатыбалдинев А.Б., Маматов Э.У., Ташполотов Ы., Садыков Э.С.

1.3. Статьи опубликованные в системе РИНЦ:

№	Название статьи	Scopus Author ID, ORCID № doi.	Название журнала, год, номер, страницы, ссылка	Общая страница	Авторы
1	Разработка модифицированн	DOI: https://doi.org/1	Научное обозрение.	8с.	Сатыбалдыев А.Б., Ташполотов

	ой модели равновесия комплексобразо вания	0.17513/srt s.1502	Технические науки. 2025. № 2. С. 39- 46; URL: https://s cience- engineering.ru /ru/article/vie w?id=1502		Ы., Ибраимов Т.К.
2.	Определение прочности и жесткости композитов на основе базальтовых, углеродных и стеклянных волокон средствами Искусственного интеллекта		Научно- информацио нный журнал Материалове дение НАН КР, 2025 №1(42) с.72- 80	9с.	Маматов Э.У. Ташполотов Ы.,
3.	Технология получения водорода на основе электрофизическ ой ионизации с использованием машинного обучения	https://doi. org/10.336 19/2414- 2948/122/1 4	Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №1. С. 111- 116. https://doi.org /10.33619/241 4- 2948/122/14 Ссылка в AGRIS - https://agris.f ao.org/search/ en/records/69 721a810fe18a 4f7582c8a6 РИНЦ https:// elibrary.ru/co ntents.asp?id= 88799572&se lid=88799579	7с	Сулайман уулу З., Темирбаевой А.Ж, Ташполотова Ы.

2. Конференциянын материалдары: авторлор, докладдын аталышы //

1. Ташполотов Ы., Маматов Э.У. Международная научно-практическая конференция «Рахматулининские-Ормонбековские чтения», посвященная 80-летию чл.-корр. НАН КР, д.т.н., профессора Ормонбекова Тынымбека Ормонбековича. 3-4 октября 2025 года .

2. Международная научно-практическая конференция на тему «Применение наноразмерных систем в современной полупроводниковой микроэлектронике и фотовольтаике», посвященная 80-летию со дня рождения академика Академии Наук Республики Узбекистан Сиражиддина Зайнабидинова. 18-19.12.2025 года в Андижанском государственном университете. Ташполотов Ы. доклад на пленарном по теме: «Инвариантность поверхностных сил конденсированных систем: экспериментальное доказательство дальнего действия и дискретной иерархии».

3. Международная научно-практическая конференция на тему: "Национальная энергетическая независимость в эпоху возобновляемых источников энергии и цифровых технологий: инновации, будущее и социальное влияние в Ферганской области". 7-8 ноября 2025 года, *Ташполотов Ы. выступил на пленарном доклад по теме: «Устойчивое развитие энергетической отрасли через внедрение технологии получения водорода: перспективы сотрудничества в рамках ЕАЭС».*

3. Книги: не имеется

3.1. Монографии: не имеется

3.2. Учебно-методические пособия: не имеется

4. ПАТЕНТЫ, АВТОРСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА:

1. Сулайман уулу З., Ташполотов Ы. Способ получения водородно-воздушной смеси (Заявка подана, март 2025г.)

5. Акт, подтверждающий внедрение научной продукции в производство: *имеется*

6. Основные результаты полученные с 01 января 2025 года по 31 декабря 2025 года в рамках проекта «Создание композиционных наноструктурных материалов на основе базальтовых горных пород для теплоэнергетики и строительной индустрии».

6.1. ЦИФРОВЫЕ ДАННЫЕ

Руководитель проекта	Наименование проекта	Статьи в сборниках, журналах	Статьи в РИНЦ (зарубеж.)	Статьи в РИНЦ (КР)	Статьи, опубликованные в сборниках конференции	Учебники, учебные пособия	Авторство/патенты	Проведенные научные мероприятия	Акт внедрения	Защита кандидатских диссертаций	Докторские диссертации	Монографии	Другие результаты
Ташполотов Б.	Создание композиционных наноструктурных материалов на основе базальтовых горных пород для теплоэнергетики и строительной индустрии	1 и 1 в печати	2	1	2	-	1	1	1	2 соискатели подготовили диссертации		нет	

7.ФИНАНСОВЫЙ ОТЧЕТ:

Статья-лардын коду	Чыгымдардын статьяларынын аталышы	Көрсөтүлгөн (пландалган) сумма, сом	Иштетилген (алынган) сумма	Алынбаган сумма
22155100	Эмгек акы	77142,8	77142,8	0,00
22155500	Социалдык фондго чегерүүлөр	13307,08	13307,08	0,00

2212120 0	Иш сапар чыгымдары	160000	32000	128000
2121	Коммуналдык кызматтар, анын ичинде элементтери боюнча:			
2215520 0	Суу акысы			
2212110 0	Электр акысы			
2212130 0	Жылуулук энергиясы үчүн төлөм			
2212210 0	Башка коммуналдык кызматтар			
2213	Телефон жана факс байланыш кызматтары			
2215530 0	Ижарага төлөө			
3112322 0	Транспорттук кызматтар	50000	----	50000
2217	Башка кызматтарды сатып алуу	565540	----	565540
2218	Дары-дармектерди жана медициналык буюмдарды сатып алуу			
2821	Тамак-аш сатып алуу			
3112	Учурдагы ар кандай чыгымдар			