

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Фахрутдинов Руслан Рафаилович

**РАЗРАБОТКА ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и
переработки древесины

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Сафин Р.Г.

Казань – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава I СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	14
1.1 Свойства композиционных материалов	16
1.1.1 Физико-механические свойства	17
1.1.2 Теплоизоляционные свойства	19
1.1.3 Влагопоглощающая способность	22
1.1.4 Пожароустойчивость	25
1.2 Классификация древесно-полимерных композиционных материалов	29
1.3 Конструкционные древесно-полимерные композиционные материалы ...	32
1.4 Теплоизоляционные композиционные материалы на основе различных наполнителей	36
1.5 Слоистые древесно-полимерные композиционные материалы	43
Глава II ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЛОЁВ ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНО- ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	50
2.1 Объекты исследований и их основные свойства	50
2.2 Описание методики получения трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов	57
2.3 Методики испытаний и исследований трехслойных стеновых материалов на основе древесно-полимерных композитов	62
2.3.1 Оборудование для лабораторных испытаний образцов древесно-полимерных композитов	64

2.3.1.1 Оборудование для испытаний на устойчивость к атмосферным воздействиям.....	64
2.3.1.2 Оборудование для измерений теплопроводности и термического сопротивления	65
2.3.1.3 Оборудование для испытаний на прочность при растяжении, сжатии и изгибе.....	66
2.3.1.4 Оборудование для анализа микроструктуры материалов	67
2.3.1.5 Оборудование для испытаний на стойкость к истиранию	68
2.3.1.6 Оборудование для испытаний на водостойкость	68
2.3.1.7 Оборудование для оценки огнестойкости материалов.....	69
2.3.2 Методики исследований трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов.....	70
2.3.2.1 Методика исследования влагостойкости	70
2.3.2.2 Методика определения теплопроводности	71
2.3.2.3 Методика определения плотности	72
2.3.2.4 Методика определения прочностных характеристик	73
2.3.2.5 Методика исследования структуры, биостойкости, морозостойкости и горючести.....	78
Глава III АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ СЛОЁВ РАЗРАБОТАННОГО ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА	82
3.1 Анализ результатов исследований физико-механических свойств поверхностных и теплоизоляционного слоёв стенового материала	82
3.1.1 Анализ результатов исследований прочностных характеристик поверхностных слоёв стенового материала	83
3.1.2 Анализ результатов исследований вспенивания теплоизоляционного слоя стенового материала.....	91

3.1.3 Анализ результатов исследований структуры поверхностных и теплоизоляционного слоёв стенового материала.....	95
3.2 Анализ результатов исследований эксплуатационных свойств поверхностных и теплоизоляционного слоёв стенового материала	96
3.2.1 Анализ результатов исследований гигроскопичности и износостойкости поверхностных и теплоизоляционного слоёв стенового материала	97
3.2.2 Анализ результатов исследований теплофизических свойств слоёв стенового материала.....	100
3.2.3 Анализ результатов исследований огнестойкости поверхностных слоёв стенового материала.....	104
3.2.4 Анализ результатов исследований биологических свойств поверхностных слоёв стенового материала	106
Глава IV ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗРАБОТАННОГО ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	107
4.1 Технология получения трёхслойного стенового материала.....	107
4.2 Инженерная методика расчёта трёхслойного стенового материала	112
4.3 Опытно-промышленная линия производства трёхслойного стенового материала	119
4.4 Обоснование экономической эффективности внедрения технологического процесса производства трёхслойного стенового материала	121
4.5 Технология получения трёхслойного стенового материала на основе ДПК из текстильных отходов	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	147
Приложение А. Статистическая обработка результатов	148
Приложение Б. Расчёт трёхслойного стенового материала, как альтернативы ДСтП	153
Приложение В. Расчёт технико-экономических показателей.....	156
Приложение Г. Акт внедрения	160
Приложение Д. Дипломы и сертификаты	161
Приложение Е. Патенты.....	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время остро стоит проблема утилизации отходов древесины и полимерных материалов, в том числе на основе инновационных подходов. Одним из возможных решений проблемы является создание эффективных теплоизоляционных материалов, способных существенно повысить энергоэффективность зданий и снизить экономические затраты на строительство.

На сегодняшний день однослойные теплоизоляционные материалы ограничены в своих функциональных возможностях из-за ряда факторов. Во-первых, их однородная структура не позволяет эффективно сочетать теплоизоляционные и механические свойства, что приводит к низкой теплопроводности при недостаточной прочности. Во-вторых, такие материалы не обеспечивают достаточной устойчивости к внешним воздействиям, таким как влага или механическое давление, что снижает их долговечность и эксплуатационные характеристики. В частности, стеновой материал выполняет конструкционную, теплоизоляционную и декоративную функции, поэтому актуальна задача разработки трёхслойного стенового материала, выполняющего данные функции и обеспечивающего их высокий уровень, в том числе за счёт их разделения между слоями.

Разработка трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов (ДПК) способствует комплексному решению проблемы утилизации отходов, предлагая индустрии строительных материалов новый, экологически чистый материал, обладающий высокими эксплуатационными свойствами. Эксперты прогнозируют, что в ближайшие годы мировой рынок древесно-полимерных композитов будет расти на 9 % ежегодно, что подчеркивает перспективность данного сегмента. Общий объем рынка теплоизоляционных материалов в России по итогам 2023 г. составлял около 39,6-40,66 млн. м³. Согласно прогнозам до 2026 года, рынок теплоизоляционных материалов, вероятно, будет находиться на уровне ежегодного потребления около 41,7-44,9 млн. м³.

Трёхслойная структура разрабатываемого композиционного стенового материала позволяет создавать конструкции с оптимальными теплофизическими и механическими свойствами, адаптируемыми к конкретным климатическим условиям.

Работа выполнена в рамках программы «ТехноСтарт» по договору №27-22 «Разработка древесно-полимерного композита из отходов древесины и полимеров» и гранта Фонда Содействия Инновациям «Студенческий стартап» по договору № 1024ГССС15-L/84296 «Разработка многослойного древесно-полимерного композиционного материала с высокими эксплуатационными свойствами», а также в рамках гранта Академии Наук республики Татарстан на тему «Разработка древесно-полимерного композиционного материала с улучшенными эксплуатационными и теплоизоляционными свойствами».

Степень разработанности темы. В процессе диссертационного исследования проанализированы работы, посвященные проблеме рационального использования древесных отходов с получением материалов теплоизоляционного назначения. Качественные показатели этих материалов и используемое технологическое оборудование рассматривались в работах ученых А.В. Ермолиной, В.А. Салдаева, В.В. Степанова, П.В. Миронова, Е.М. Разинькова, М.И. Зайцевой, С. А. Угрюмова, Т.Н. Стородубцевой, Л.А. Абдрахмановой, А.А. Лукаша, А.И. Бурнашева, А.Е. Шкуро, М.Е. Gomes и др. [1, 30, 32, 56, 58, 70, 74, 88-89, 92-94, 104, 107-108, 111, 119-120, 126-130, 142, 148]. В работах данных авторов представлены исследования по созданию и технологии получения теплоизоляционных материалов, где в качестве наполнителя использовались отходы лесопромышленного комплекса.

Вопросами в области создания наполненных полимерных материалов занимались ученые С.И. Вольфсон, М. В. Филичкина, В.А. Золотухин, Е.А. Рюткянен, Н.В. Сиротинкин, В.П. Сучков, Д.Ф. Яковенко, А.А. Мольков, И.М. Галиев, В.Г. Бурындин, Т.А. Горшкова, Р.Р. Хасаншин, R.M. Johnson и др. [12, 20, 24-28, 32, 34, 75-76, 78, 81, 132, 139, 141, 150]. В работах данных авторов рассматривались возможные пути введения различных наполнителей в

полимерную, в частности, пенополиуретановую матрицу с целью получения материалов с заданными технологическими и эксплуатационными свойствами и снижения их стоимости.

Исследования особенностей формирования адгезионных связей между полимером и древесиной рассматривались в работах исследователей А.А. Аксомитного, В.В. Глухих, И. Н. Мусина, D.G. Dikobe и др. [6, 24, 32, 76, 92, 120, 132, 146, 147]. В этих исследованиях анализировались закономерности образования и разрушения адгезионных связей, а также пути повышения адгезионной прочности данных материалов.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключается в создании трёхслойного стенового материала на основе ДПК и разработка технологии его производства.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) проведение аналитического обзора современных методов производства древесно-полимерных композиционных материалов (ДПКМ) и существующих технологий переработки древесных отходов, а также изучение теоретических исследований в данной области;
- 2) разработка методик исследований, включающих испытания трёхслойных стеновых материалов на основе ДПК, направленных на оценку их теплопроводности, прочностных характеристик (при растяжении, сжатии, изгибе), влагостойкости, атмосферной устойчивости, водостойкости, стойкости к истиранию, огнестойкости, биостойкости, морозостойкости и анализа микроструктуры;
- 3) проведение комплексного исследования эксплуатационных и теплоизоляционных свойств трёхслойного стенового материала с целью определения рационального состава его слоёв;
- 4) разработка инженерной методики расчёта, позволяющей рекомендовать рациональные параметры изделий в зависимости от содержания древесного наполнителя и климатических зон предполагаемого применения материала;
- 5) разработка технологии получения трёхслойного стенового материала на

основе древесного наполнителя и полимерных связующих.

Предмет и объект исследования. Предметом исследования является технология получения трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов. Объектом исследования являются древесные частицы и композиционный материал для отдельных слоёв материала.

Научная новизна:

1. Получены физико-механические (прочностные, термомеханические, структурные), эксплуатационные (гигроскопичные, износостойкие, теплофизические, термические, биологические) характеристики ДПК в зависимости от вида и содержания древесного наполнителя, связующего полимера и технологических добавок.

2. Доказана целесообразность введения дорогостоящих модификаторов только в конструкционный поверхностный слой стенового материала.

3. Предложена методика расчёта, позволяющая рассчитать оптимальные толщины каждого слоя стенового материала, изготовленного из ДПК, в зависимости от соотношения компонентов и условий эксплуатации.

4. Разработана технология производства трёхслойного стенового материала на основе ДПК (патент РФ на изобретение № 2 800 911). Структура материала включает:

- конструкционный поверхностный слой, состоящий из полимера (30 – 35 масс.%), древесных частиц волокнистого типа размером от 1 до 2,5 мм (54 – 56 масс.%), изоцианата (7 – 10 масс.%), технологической добавки – технический углерод N330 или полиэтиленовый воск (2 – 3 масс.%), красителя – сополимер этиленвинилацетатный EVA (1 – 2 масс.%);

- декоративный поверхностный слой, состоящий из полимера (20 – 26 масс.%), древесных частиц волокнистого типа размером от 2,5 до 10 мм (70 – 76 масс.%), технологической добавки – технический углерод N330 (2 – 3 масс.%), красителя – КА-2 (1 – 2 масс.%);

- теплоизоляционный слой между поверхностными слоями, состоящий из полиола (10 – 12,5 масс. %), древесных частиц в виде древесных волокон

размером от 10 до 15 мм (75 – 80 масс.%), изоцианата (10 – 12,5 масс.%).

Теоретическая значимость работы:

- раскрыто влияние свойств связующего, наполнителя и технологических добавок на характеристики трёхслойного стенового материала, состоящего из древесно-полимерного композита;
- изложены основные положения и этапы создания многослойного стенового материала для разработки новых изделий и технологий;
- проведена модернизация существующих методик расчёта и алгоритмов, обеспечивающих получение новых результатов, включающих разработку оптимального состава трёхслойного стенового материала с учетом требуемых характеристик, климатических особенностей и типов используемого сырья.

Практическая значимость работы заключается в формулировании методических рекомендаций и предложений для разработки трёхслойного стенового материала, включающих в себя этапы выбора оптимальных параметров материалов, методов обработки и улучшения эксплуатационных характеристик изделий для повышения качества и конкурентоспособности продукции; в разработке ресурсосберегающей технологии для эффективного использования древесных отходов и производства трёхслойного стенового материала на основе ДПК с высокими эксплуатационными и теплоизоляционными свойствами.

Полученные результаты исследований приняты к внедрению в ООО НПО «Политехнологии» (г. Казань) и внедрены в учебный процесс по дисциплине «Современные древесно-композиционные материалы» в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования послужили характеристики свойств исходных компонентов, которые выступают в качестве основных факторов, влияющих на физико-механические, теплофизические и эксплуатационные характеристики трёхслойного стенового материала на основе ДПК. Теоретическую базу исследований составили труды ученых, занимающихся вопросами

использования отходов деревообрабатывающих предприятий для производства композиционных материалов, а также нормативные документы, определяющие качественные характеристики трёхслойного стенового материала на основе ДПК. Практическую основу составили результаты лабораторных испытаний физико-механических, теплофизических и эксплуатационных свойств материала и достоверность научных результатов исследований, полученных с использованием стандартных методик.

Достоверность результатов исследований обусловлена тем, что:

- в ходе экспериментальных работ результаты были получены с использованием сертифицированного оборудования, проведением калибровки приборов;
- использованы современные методики сбора и обработки исходной информации;
- инженерная методика расчёта трёхслойного стенового материала разрабатывалась на основе классических уравнений теплопереноса;
- математическое моделирование проведено с использованием программ Mathcad 15, EXCEL и языка программирования Python;
- научные результаты, полученные автором, согласуются с опубликованными ранее экспериментальными данными других исследователей и не противоречат существующим представлениям.

Личное участие автора состояло в проведении экспериментов, анализе полученных данных и интерпретации результатов, разработке экспериментальных стендов и установок для проведения необходимых испытаний и измерений, в подготовке основных публикаций по выполненной работе, включая статьи, доклады и презентации на конференциях и семинарах. Автору принадлежат основные идеи работ, опубликованных в соавторстве.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Основные результаты диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины: п. 2. «Химия, физико-химия и биохимия

основных компонентов биомассы дерева и иных одревесневших частей растений, композиты, продукты лесохимической переработки» (пункты 1, 2, 3 научной новизны); п. 4. «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» (пункт 4 научной новизны).

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости физико-механических и эксплуатационных характеристик ДПК от вида и содержания древесного наполнителя, связующего полимера и технологических добавок.
2. Разработанный состав трёхслойного стенового материала на основе древесных частиц и связующего полимера.
3. Технология изготовления трёхслойного стенового материала на основе ДПК.
4. Методика расчета, позволяющая выбрать рациональные толщины слоёв композиционного материала в зависимости от климатических условий, содержания и свойств древесного наполнителя, типа матрицы.
5. Рекомендации по промышленному внедрению разработанного трёхслойного стенового материала на основе ДПК.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

– на международных конференциях: «Модели и методы повышения эффективности инновационных исследований» (Воронеж, 2019 г.), «Инновационные технологии, оборудование и материалы» (Казань, 2020 г.), «Исследование путей развития научно-технического потенциала общества в стратегическом периоде» (Волгоград, 2022) «Наука и технологии в лесопромышленном комплексе» (Брянск, 2023 г.);

– на всероссийских конференциях: «Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса» (Воронеж, 2022 г.), «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (Казань, 2023 г.);

– на научных сессиях ФГБОУ ВО «КНИТУ» (Казань, 2019-2023 гг.).

Результаты исследований отмечены дипломом победителя Всероссийского инженерного конкурса «ВИК 2019» в номинации «Технологии материалов», грантами Академии наук РТ (2019 - 2020 гг.), дипломом победителя научно-исследовательских проектов аспирантов КНИТУ «ТехноСтарт» (2021 г.), дипломом победителя открытого конкурса инновационных идей «Пространство инноваций-2022» в номинации «Технологическая инновация» (2022 г.), грантом фонда содействия инновациям «Студенческий стартап» (2022 г.), дипломом победителя в конкурсе 50 инновационных идей для Республики Татарстан в номинации «Старт инноваций» (2023 г.), стипендией Правительства Российской Федерации по приоритетным направлениям (2023 - 2024 гг.).

Публикации. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК, 1 статья в издании, входящем в реферативную базу Scopus, 2 патента на изобретение, 5 публикаций – в прочих изданиях.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 167 страницах, включает 58 рисунков и 23 таблицы. Библиографический список включает 155 наименований цитируемых работ, из них 143 источника российских авторов и 12 наименований работ зарубежных исследователей.

Глава I СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Древесно-полимерные композиционные материалы представляют собой материалы, состоящие из древесных волокон или иных частиц, связанных полимерным связующим. Они объединяют в себе преимущества древесины (например, лёгкая обрабатываемость, естественный внешний вид и текстура) с преимуществами полимера (например, долговечность и устойчивость к влаге).

Современные древесно-полимерные композиты предъявляют высокие требования к эксплуатационным характеристикам, что обусловлено их широким применением в различных отраслях строительства и инженерных системах [146]. Эти требования можно классифицировать следующим образом:

1. Устойчивость к внешним воздействиям. Одним из ключевых критериев для ДПКМ является их способность сохранять физико-механические свойства при воздействии различных агрессивных факторов окружающей среды, таких как повышенная влажность, осадки, ультрафиолетовое излучение и температурные перепады. Введение в полимерную матрицу стабилизирующих и модифицирующих добавок предотвращают деградацию материала и обеспечивают его долговременную эксплуатацию. Исследования показывают, что включение в полимерную матрицу специальных стабилизаторов, антиоксидантов и УФ-абсорбентов существенно повышает устойчивость материала к деструктивным процессам фотодегradации и окисления. В этом контексте важным фактором является также гидрофобизация древесного наполнителя, что позволяет минимизировать водопоглощение и предотвратить развитие набухания и деформации материала [102]. Модификаторы на базе высокодиспергируемых каучуков увеличивают износостойкость при отрицательных температурах, способствуя улучшению термоформования тонких плит из полипропилена и полиэтилена.

2. Экологическая устойчивость. Использование переработанных полимеров и отходов древесной промышленности в качестве исходного сырья для производства композитов позволяет существенно снизить антропогенное воздействие на окружающую среду. Более того, технологии переработки способствуют уменьшению выбросов CO_2 и минимизации энергетических затрат при производстве.

3. Долговечность и механическая прочность. В работах по изучению механических свойств древесно-полимерных композитов [153] установлено, что долговечность материала напрямую зависит от природы связующего компонента, степени дисперсности древесного наполнителя и уровня его адгезии с полимерной матрицей. Введение дополнительных модифицирующих компонентов, таких как силаны, олигомеры и фторсодержащие соединения, позволяет существенно повысить когезионные свойства материала, увеличивая его сопротивляемость к механическим разрушениям.

4. Эстетическая и структурная вариативность. Технологии варьирования эстетических характеристик ДПКМ включают использование интеркалированных структур, содержащих нанослоистые наполнители, такие как монтмориллониты и органофильные глины, что позволяет значительно улучшить текстурные свойства поверхности. Путём использования методов интеркаляции и деламации возможно создание композитных систем с контролируемой анизотропией физических свойств, обеспечивающих высокую степень воспроизведения натуральных текстур дерева при одновременном повышении механической прочности материала. Использование технологий термомеханического вспенивания и инъекционной экструзии позволяет варьировать не только внешние эстетические свойства композита, но и его внутреннюю пористую структуру.

Строгие стандарты и нормативы, разработанные для древесно-полимерных композитов, предполагают постоянное совершенствование методов оценки качества и безопасности этих материалов, что отражает высокие требования к их применению в строительных отраслях.

1.1 Свойства композиционных материалов

Композиционные материалы представляют собой многокомпонентные системы, включающие матрицу и армирующие элементы, которые взаимодействуют между собой и влияют на конечные свойства материала [22, 62].

Основные компоненты и их влияние на свойства композиционных материалов (рис. 1.1):

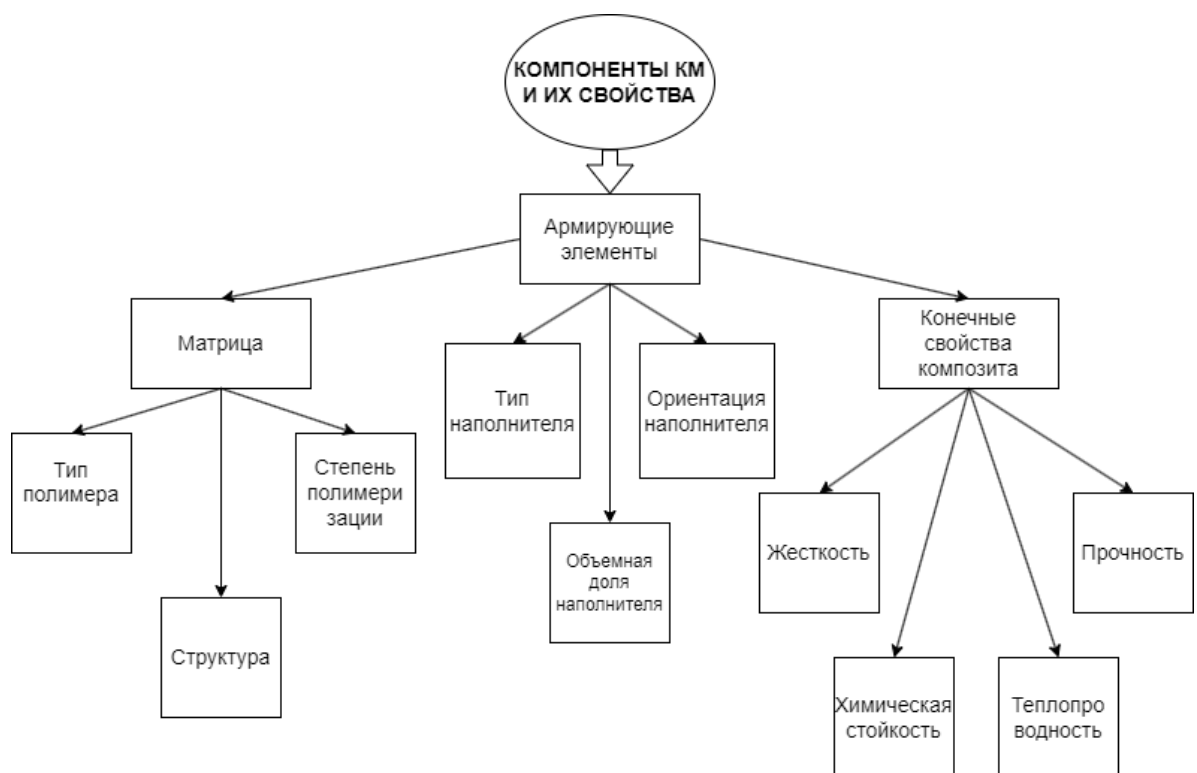


Рисунок 1.1 – Взаимосвязь компонентов композиционного материала и их влияние на свойства

1. Матрица:

- тип полимера: полимеры для матрицы обладают различной прочностью, теплопроводностью и химической стойкостью, что непосредственно влияет на механические и термические свойства композита;
- структура матрицы: кристаллическая или аморфная структура матрицы влияет на прочность и устойчивость к усталости композита;

- степень полимеризации: для полимерных матриц степень полимеризации определяет молекулярный вес материала и его механические свойства.

2. Армирующие элементы:

- тип наполнителя: стекловолокно, углеволокно, наночастицы и другие наполнители имеют такие свойства, как высокая прочность, жесткость и легкость, которые оказывают положительное влияние на механические и термические свойства композита;
- ориентация наполнителя: ориентирование наполнителя в матрице может значительно увеличить механическую прочность в определенных направлениях;
- объемная доля наполнителя: количество наполнителя в матрице влияет на множество свойств, включая прочность, жесткость и вес материала.

3. Адгезионные свойства матрицы и наполнителя:

- сцепление между компонентами: качество сцепления матрицы и наполнителя влияет на механические свойства композита, такие как прочность и устойчивость к усталости;
- обработка поверхности наполнителя: химическая обработка поверхности наполнителя улучшает сцепление с матрицей, повышая прочность и долговечность композита.

Исследования в области композиционных материалов направлены на оптимизацию вышеперечисленных параметров и понимание взаимодействия между компонентами для создания материалов с определенными свойствами, подходящими для конкретных случаев в различных отраслях промышленности [65, 95].

1.1.1 Физико-механические свойства

Анализ физико-механических свойств ДПКМ включает в себя оценку

параметров, таких как прочность, упругость, износостойкость, устойчивость к влаге и температурным воздействиям, а также других характеристик [22, 26].

Прочность и упругость являются ключевыми в числе физико-механических свойств. Они определяют – насколько материал способен выдерживать нагрузку и как быстро восстанавливает свою форму после деформации.

Высокая степень межфазной адгезии между полимерной матрицей и древесным наполнителем способствует значительному повышению модуля упругости при использовании технологических добавок, обладающих функциональными группами, которые активно взаимодействуют с полимерным связующим [6, 17]. Современные методы модификации наполнителя, такие как плазмохимическая обработка, позволяют повысить прочность композиционных материалов за счёт улучшения адгезионных свойств и увеличения межфазной энергии связи.

Анализ физико-механических свойств ДПКМ требует рассмотрения многокомпонентной системы в контексте её гетерогенной природы и сложных взаимодействий на макро- и микроскопическом уровнях (рис. 1.2) [39].

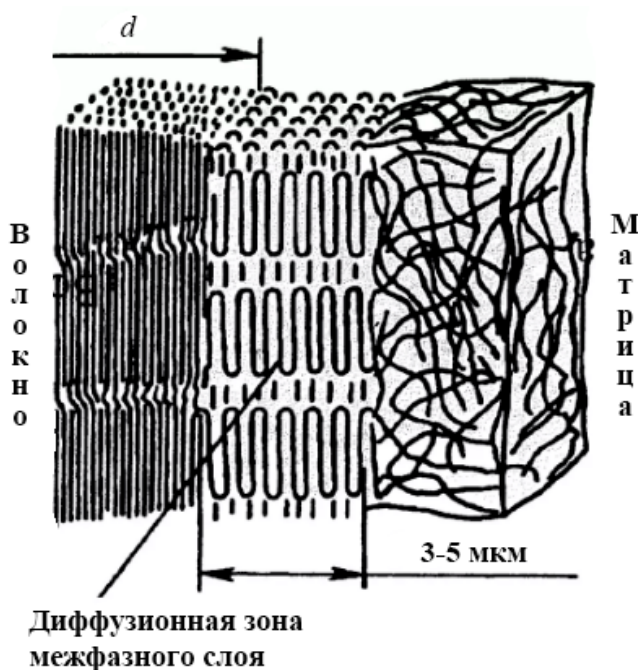


Рисунок 1.2 – Модель микроструктуры термопластичных композиционных материалов с близкими по химической природе компонентами

Прочностные характеристики определяются рядом параметров, включая межфазное взаимодействие полимер-наполнитель, кристаллизацию полимера, размер частиц наполнителя и степень его диспергирования в полимерной матрице [68].

ДПКМ характеризуются сложным поведением при статических испытаниях на растяжение, сопровождающимся развитием микротрещин в полимерной матрице или отслоении наполнителя от полимера, что в конечном счёте приводит к разрушению материала [36].

При испытаниях на сжатие композитных материалов особое внимание уделяется анализу эффекта "столбового" разрушения, характерного для материалов с волокнистой структурой. В процессе сжатия такие материалы склонны к продольному расслаиванию вследствие недостаточной прочности на сдвиг между слоями или фазами композита.

Износостойкость композитов является важнейшим показателем эксплуатационных характеристик и напрямую зависит от их состава. Введение в полимерную фазу нанодисперсных добавок, таких как оксиды металлов или углеродные нанотрубки, позволяет значительно повысить стойкость материала к абразивному воздействию и термическому старению.

Современные методы испытаний на сдвиг позволяют оценить как мгновенные, так и длительные эффекты воздействия нагрузок на структуру материала для изучения возможности использования материалов в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок, где сдвиговые напряжения могут стать основной причиной деградации структуры и возникновения трещин [142].

Анализ результатов исследований физико-механических свойств служит основой для моделирования и прогнозирования поведения материалов при эксплуатационных нагрузках, а также для оптимизации их состава и структуры.

1.1.2 Теплоизоляционные свойства

Теплотехнические свойства композиционных материалов оказывают

влияние на терморегуляцию и энергосбережение зданий и различных сооружений. При оценке теплотехнических показателей необходимо учитывать фазовое взаимодействие, термомеханическую устойчивость, а также анизотропность структуры композиционного материала, что требует применения сложных математических моделей и методов численного моделирования. К основным показателям, определяющим термическое поведение материалов, относятся:

1. Теплопроводность – способность материала к передаче тепловой энергии вследствие теплового градиента. При создании многокомпонентных композиционных материалов снижение данного показателя осуществляется за счёт введения полимерных связующих с низким коэффициентом теплопроводности, а также применения специальных наполнителей (аэрогели, микрокапсулированные вещества и низкотеплопроводные древесные волокна).

2. Удельный тепловой поток – рассматривается при нестационарной теплопередаче, где учитывается коэффициент температуропроводности и интегральная тепловая инерция материала. Низкий удельный тепловой поток свидетельствует о хороших теплоизоляционных свойствах материала. Характер теплового потока напрямую зависит от когерентности фазовых переходов в материале, а также от структурных дефектов на микроуровне, таких как пористость, неоднородность распределения наполнителя и наличие микроразрывов в полимерной матрице.

3. Температурная устойчивость или термостабильность композиционных материалов – определяется их способностью сохранять эксплуатационные свойства при изменении внешних температурных условий среды. В условиях высокотемпературной эксплуатации важным показателем является точка стеклования и термоокислительная деградация полимерной матрицы. Поскольку стеклование изменяется вследствие различных степеней полимеризации или модификации добавками, физические свойства материала так же меняются. Отношение эффекта стеклования (T_g) к степени полимеризации, показанное на рисунке 1.3, демонстрирует эту зависимость.

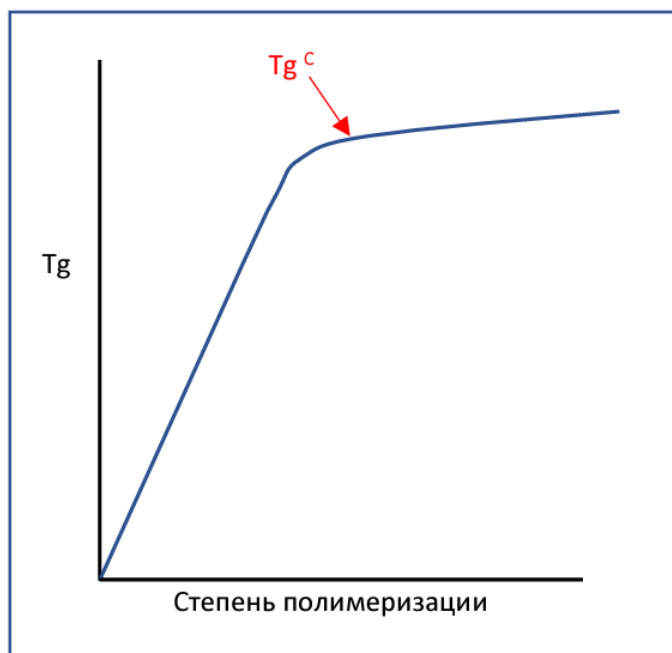


Рисунок 1.3 – Взаимосвязь T_g со степенью полимеризации, показывающая критическое значение T_g для полимерных свойств материалов

При температуре выше точки стеклования T_g физические свойства материала претерпевают резкие изменения. Разрушаются лиофилизированные материалы, в результате срок хранения сокращается, также как при ускоренном взаимодействии между субстанцией и вспомогательным материалом.

4. Теплоемкость – способность материала аккумулировать тепловую энергию при нагревании. Композиты с высокой удельной теплоемкостью обладают свойством сглаживать резкие температурные колебания, что предотвращает появление термических напряжений в материале. Это достигается за счёт применения технологических добавок в виде наночастиц, таких как оксиды металлов, повышающих теплоемкость материала.

5. Влагостойкость и гигроскопичность – характеризуют количество влаги, проникающей в структуру композиционного материала, что приводит к изменениям его термодинамических характеристик за счет увеличения теплопроводности и снижения теплового сопротивления. В качестве предотвращения негативного воздействия влажности на свойства композиционных материалов, в их состав включают гидрофобизирующие добавки, а также применяют специальные покрытия, препятствующие

проникновению влаги в поры материала.

Теплоизоляционные свойства композиционных материалов обусловлены их сложной многокомпонентной структурой. Современные методы исследования, такие как термогравиметрический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия позволяют получить детализированные данные о поведении материалов в широком диапазоне температурных и влажностных условий, что является основой для их применения в промышленных установках [137].

1.1.3 Влагопоглощающая способность

Влагопоглощение композиционных материалов представляет собой процесс, включающий в себя капиллярную адсорбцию, диффузию и проникновение влаги через межфазные границы, что оказывает влияние на эксплуатационные свойства материалов.

Влагопоглощающие свойства наполненных материалов, в первую очередь, определяются их структурой, элементами которой являются полимерное связующее – матрица, наполнитель и межфазный слой (зона). Из модельного представления, изображенного на рисунке 1.4, следует, что граница раздела двух разнородных фаз представляет собой не поверхность, а межфазную зону, включающую в себя несколько слоев – разрыхленный слой матрицы, межфазный слой и приповерхностный слой.

Влагопоглощающие свойства зависят от природы армирующего наполнителя, полимерной матрицы, а также морфологической структуры, которая может изменяться в зависимости от типа композита и условий его обработки:

1. Армирующий наполнитель. Волокна неорганического происхождения, такие как стекловолокно, обладают минимальной влагопоглощаемостью, поскольку их структура практически не содержит гидрофильных групп, способных взаимодействовать с молекулами воды. Использование же

органических наполнителей, таких как древесные или целлюлозные волокна, увеличивает коэффициент водопоглощения. Натуральные волокна, ввиду своей пористой структуры и высокого содержания гидроксильных групп, способны впитывать значительное количество влаги через процессы адсорбции и капиллярного всасывания.

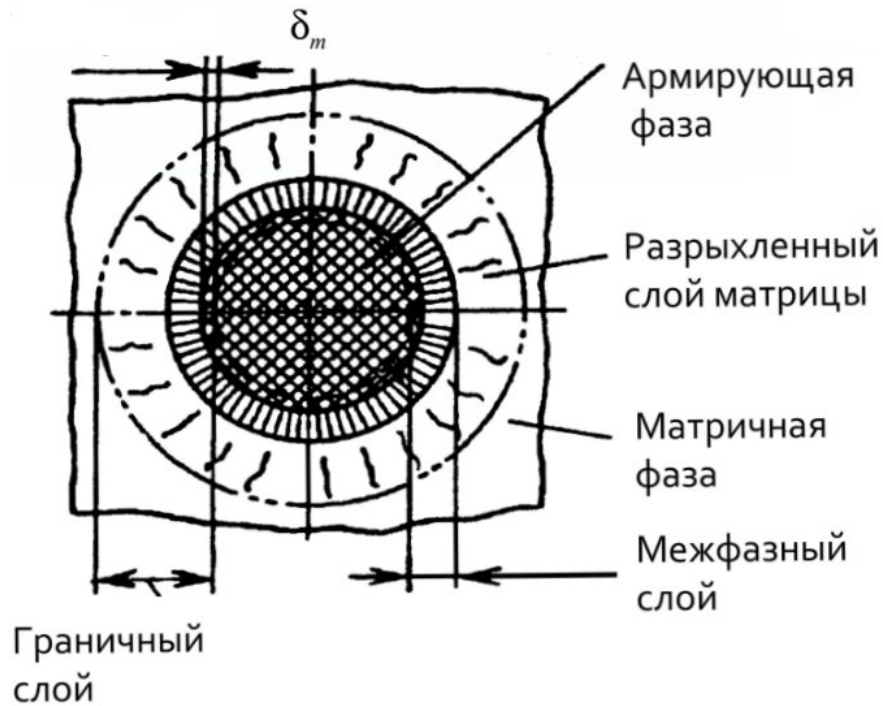


Рисунок 1.4 – Модельное представление о межфазном слое в системе полимер-твердое тело

2. Полимерная матрица. Влагопроницаемость полимерной матрицы (связующего компонента) обусловлена его химической структурой, степенью кристаллизации и наличием функциональных групп, способных вступать во взаимодействие с водой. Эпоксидные смолы и полиимиды обладают высокой степенью гидрофобности за счет своей плотной сетчатой структуры, препятствующей проникновению молекул воды внутрь материала. В то же время полиэфиры и термопласты, содержащие полярные группы, такие как карбонильные и гидроксильные, подвержены значительному влагопоглощению, что негативно сказывается на их эксплуатационных свойствах.

3. Технологические добавки. Введение в полимерную матрицу различных

технологических добавок, таких как графеновые включения, позволяет создавать многофазовые системы, в которых проникновение влаги происходит за счёт увеличения диффузии, что приводит к значительному уменьшению влагопоглощения [142].

4. Межфазные взаимодействия. Недостаточная адгезия между компонентами композита может привести к образованию микротрещин и полостей, через которые влага проникает в материал.

5. Модификация поверхности. Предварительная обработка поверхности армирующих наполнителей в виде плазменной обработки, гидрофобизирующих покрытий или химическая модификация поверхности повышает водостойкость композита. [27, 72].

К преимуществам влагостойких композитов относят увеличенный срок службы, уменьшение риска гниения или разрушения из-за воздействия влаги. К недостаткам относят более высокую стоимость материалов и более сложные процессы производства [15, 64, 73-74, 115].

Исследование гигроскопичности древесно-полимерного композитного материала проводится для оценки его поведения под воздействием влажности среды и воды в условиях эксплуатации. Анализ результатов такого исследования даёт ценную информацию о способности материала противостоять влаге и воде в различных климатических условиях [101].

Важно отметить, что поглощение воды композитом может способствовать разрыву химических связей в молекулах полимера, особенно при повышенных температурах. Это явление более характерно для полимеров, получаемых методом поликонденсации.

Гигроскопичность композитных материалов зависит от пористости, концентрации целлюлозного волокна. Древесное волокно, которое часто используется в составе ДПК, имеет открытые поры, что способствует увеличению водопоглощения изделий из ДПК. Избавиться от пористости в ДПК почти невозможно, и, следовательно, водопоглощение является неизбежным свойством таких материалов.

В таблице 1.1 указаны данные по водопоглощению различных композиционных материалов. Значения указывают на процентное содержание воды, которую способен впитать каждый материал относительно своей массы [150].

Таблица 1.1 – Водопоглощение композиционных материалов

Композиционный материал	Влагопоглощение, %
Бетонополимер	1
Немодифицированный бетон	3 – 5
Полимербетон	0,2 – 1,5
Фибролит	35 – 45
Арболит	40 – 85
Цементно-стружечные плиты	1,5 – 16
Древесно-полимерный композит	Средняя
Опилкобетон	Низкая
Ориентированно-стружечная плита	Средняя
Королит	Высокая
Древесно-стружечная плита	Высокая
Древесноволокнистая плита	Средняя

Согласно представленным данным, бетонополимеры, полимербетон, цементно-стружечные плиты и опилкобетон демонстрируют низкое водопоглощение, что указывает на их способность сохранять свои свойства при воздействии воды. Ориентированно-стружечная плита, древесноволокнистая плита и древесно-полимерный композит характеризуются средними показателями водопоглощения. В то время как фибролит, арболит, королит и древесно-стружечная плита поглощают значительное количество воды, что может влиять на их свойства и стабильность формы в условиях повышенной влажности окружающей среды [130, 141].

1.1.4 Пожароустойчивость

Пожароустойчивость композиционных материалов – важный аспект их безопасности и применения в условиях, где существует риск возгорания. Основные виды механизмов повышения огнестойкости композиционных материалов (рис. 1.5):

1. Огнезащитные наполнители. Одним из наиболее перспективных подходов к повышению огнестойкости полимерных композиционных материалов является введение неорганических гидратированных соединений, таких как гидроксид алюминия ($\text{Al}(\text{OH})_3$) и гидроксид магния ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), способных к эндотермическому разложению при высоких температурах. Процесс деструкции данных соединений сопровождается выделением инертных газов, преимущественно водяного пара, что способствует охлаждению поверхности материала и снижению интенсивности горения. Особенностью этих наполнителей является их способность блокировать дальнейшее распространение пламени через образование защитной оксидной пленки, что замедляет процесс пиролиза полимерной матрицы [134].

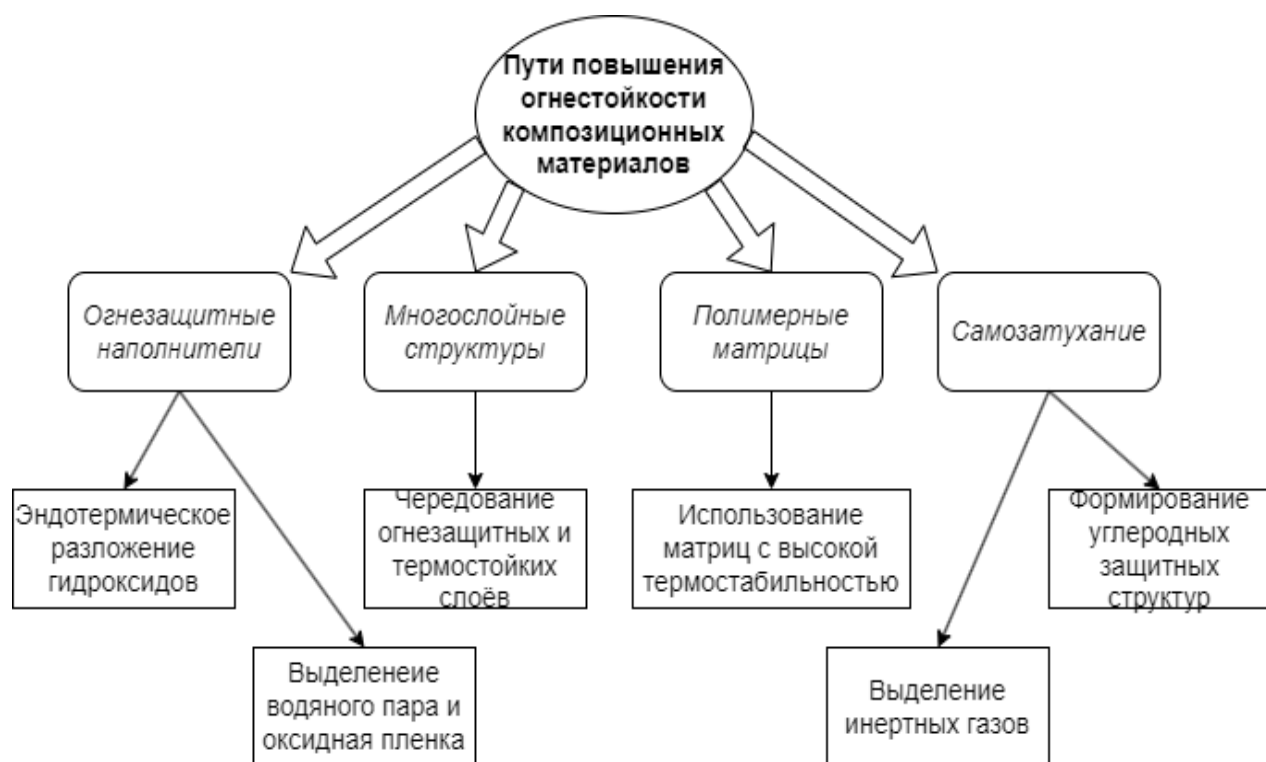


Рисунок 1.5 – Механизмы повышения огнестойкости композиционных материалов

2. Термостойкие полимерные матрицы. Полимерные матрицы с высоким уровнем термостабильности, такие как полиамиды и кремнийорганические полимеры, проявляют высокую сопротивляемость термоокислительному разрушению благодаря наличию в их структуре сильных ковалентных связей

(например, C–N, C–Si), что существенно повышает температуру деструкции и минимизирует выделение горючих летучих продуктов при нагревании [151]. Современные исследования также акцентируют внимание на возможностях синтеза гибридных полимерных матриц с внедрением наночастиц оксидов металлов, таких как оксид титана (TiO_2) и оксид цинка (ZnO), что дополнительно усиливает огнезащитные свойства композита за счет блокировки цепных реакций горения.

3. Многослойные и барьерные структуры. Применение многослойных структур, состоящих из чередующихся слоев огнезащитных материалов и механически стойких компонентов, позволяет создавать композиты с улучшенными показателями огнестойкости. Внедрение слоёв из керамических материалов, обладающих высокой термостойкостью и низкой теплопроводностью между слоями полимерной матрицы может эффективно предотвратить термическое разрушение конструкции при воздействии пламени. Важную роль в этом играют барьерные покрытия на основе фосфорсодержащих соединений, которые при нагревании образуют термостабильную фосфатную пленку, препятствующую тепловому разрушению полимерной матрицы [155].

4. Огнезащитные аддитивы. Для повышения огнестойкости композитов применяются различные аддитивы, такие как органофосфаты, бромированные антипирены и оксиды металлов. Эти вещества способствуют подавлению реакций радикального горения за счет создания в газовой фазе негорючих продуктов и уменьшения количества горючих летучих соединений, образующихся в процессе термического разрушения полимеров. Введение синергетических компонентов, например, в виде наночастиц графена или углеродных нанотрубок, усиливает огнезащитные свойства композитов [149, 144].

Отдельное внимание уделяется механизмам ингибирования горения и самозатухания. Один из наиболее эффективных способов достижения самозатухания заключается в применении соединений, способных к выделению инертных газов (например, фосфоорганических или галогенсодержащих антипиренов), которые снижают концентрацию кислорода в зоне горения и

подавляют цепные реакции окисления. Важным аспектом является использование материалов, способных к карбонизации и формированию защитных углеродных структур, что обеспечивает предотвращение распространения пламени и минимизирует риск вторичного воспламенения [150].

Область применения пожаростойких композитов включает строительство (огнезащитные структурные элементы, огнестойкие облицовочные материалы), авиацию и автомобильную промышленность (пожаростойкие обшивки и панели), электронику (огнестойкие изоляционные материалы) и другие области, где требуется высокая степень пожароустойчивости [151].

Композиционные материалы с повышенной пожаростойкостью включают в себя огнезащитные композиты на основе стекловолокна или углеволокна с огнестойкими матрицами, а также огнестойкие углепластиковые композиты, используемые в авиации.

Преимущества пожаростойких композитов включают повышенный уровень безопасности, низкую токсичность при возгорании и сохранение структурной прочности в экстремальных условиях. Недостатками могут быть более высокая стоимость и ограничения в применении в определенных сферах из-за более высокого веса или других характеристик.

Антипирены – это вещества или добавки, используемые для уменьшения или предотвращения горения материалов и продуктов [131, 38].

Антипирены широко применяются в различных отраслях, включая строительство, транспорт и электронику. Например, они добавляются в строительные материалы, такие как пенопласт, древесноволокнистые плиты и гипсокартон для улучшения пожарной безопасности [93].

Преимущества использования антипиренов включают повышение пожаробезопасности материалов и защиту жизни и имущества. Однако недостатками могут быть ухудшение механических свойств материала и дополнительные расходы на производство изделий с антипиренами.

В таблице 1.2 представлены показатели огнестойкости различных композиционных материалов. Огнестойкость рассматриваемых материалов

варьируется от высокой до низкой в зависимости от их типа и состава.

Таблица 1.2 – Оценка огнестойкости композиционных материалов

Композиционный материал	Огнестойкость
Бетонополимер	Высокая
Немодифицированный бетон	Высокая
Фибролит	Средняя/Высокая
Полимербетон	Средняя
Арболит	Средняя
Цементно-стружечные плиты	Средняя
Древесно-полимерный композит	Средняя
Древесноволокнистая плита	Средняя
Ориентированно-стружечная плита	Средняя
Королит	Низкая
Древесно-стружечная плита	Низкая
Опилкобетон	Низкая

Композитные материалы, такие как бетонополимер, немодифицированный бетон обладают высокой огнестойкостью. В то время как материалы, включающие древесные компоненты, такие как опилкобетон, королит [82], древесно-стружечные плиты – низкие показатели огнестойкости.

1.2 Классификация древесно-полимерных композиционных материалов

Древесно-композитные материалы могут быть разделены на две основные группы: с модифицированной древесиной и с древесной композицией. Для модифицированной древесины ключевой является обработка, которая изменяет ее структуру, а древесная композиция представляет собой сочетание древесных и других материалов внутри композита [28, 57, 71].

Согласно составу компонентов, ДКМ можно разделить на следующие категории: однокомпонентные, двухкомпонентные, многокомпонентные. Компонентами считаются различные наполнители, вяжущие вещества и другие материалы, входящие в состав композиции.

С точки зрения структуры и расположения компонентов, ДКМ можно разделить на три основные группы:

- ДКМ с каркасной структурой, такие как пропитанная древесина и

клееные древесные системы. В таких ДКМ главным компонентом является массивная древесина, которая формирует каркас и определяет внешний вид материала;

- ДКМ с матричной структурой, где вяжущее вещество служит матрицей для объединения различных компонентов и обеспечивает материалу способность выдерживать разнообразные нагрузки. К таким материалам относятся древесностружечные и древесноволокнистые плиты, цементностружечные и гипсоволокнистые плиты, древесно-клеевые композиции и древесно-полимерные плиты;

- ДКМ с комбинированной структурой, которые объединяют характеристики разных видов структур.

Существует возможность применять в качестве основного наполнителя другие лигноцеллюлозные материалы, такие как растительные волокна, полученные из сельскохозяйственных культур или их отходов [12, 18, 29]. Это, например, волокна из льна, конопли, джута, кенафа и других растений, а также стебли хлопчатника, солома, лоза, кострец льна и конопли, жом сахарного тростника, отходы семян хлопка, рисовая и подсолнечная шелуха, и т.д.

С учетом геометрии наполнителя, ДКМ можно разделить на шесть основных групп:

- материалы, созданные на основе массивной древесины;
- ДКМ, для изготовления которых используют листовой шпон – тонкие листы древесины, полученные путем лущения, строгания или пиления брусев;
- материалы, содержащие дискретные частицы различной формы и размера, такие как древесные частицы, растительные частицы и др.;
- ДКМ, включающие волокна – древесные и растительные (например, хлопковые, джутовые, льняные);
- материалы, содержащие порошкообразные наполнители, такие как древесная мука, технологический или шлифовальный порошок;
- материалы, объединяющие в себе элементы из разных групп наполнителей.

Древесно-композитные материалы могут быть классифицированы в зависимости от природы используемого связующего вещества и метода получения.

По природе вяжущего:

- ДКМ с использованием полимерного вяжущего. Они содержат искусственные полимеры в качестве связующего вещества. Это, например, модифицированная древесина, клееные деревянные конструкции, фанера, древесно-слоистые плиты, древесно-стружечные плиты, древесноволокнистые плиты, древесно-клеевые композиции и др. [131];

- неорганические ДКМ, где матрицей служат минеральные вещества, такие как цемент, гипс, магнезиальные вяжущие и жидкое стекло. Примерами являются арболит, фибролит, ксилолит, королит, тирсобетон, а также плиты и изделия из древесных частиц, пропитанных жидким стеклом [140];

- металлизированные ДКМ – включают материалы, в которых древесина пропитана металлами с низкой температурой плавления или соляными растворами, которые затем восстанавливаются в чистые металлы.

По методу получения:

- ДКМ пропитанные (получаются путем пропитки материала);
- ДКМ прессованные (производятся методами прессования, которые могут включать плоское прессование, экструзию, штамповку и другие процессы);
- ДКМ пропитано-прессованные (создаются путем комбинирования нескольких методов, включая пропитку и последующее прессование) [116].

Вспененные твердые полимеры, известные как микроэлементные композиты или губчатые материалы, представляют собой класс материалов, широко применяемых в разных областях. По оценкам, мировой рынок пенопластовых продуктов оценивается в 14 млрд. долларов США и ожидается его дальнейший рост со ставкой примерно 14 % в течение следующих 5 лет. Этот рост, в значительной мере, обусловлен впечатляющим спросом со стороны Китая, который в настоящее время составляет 26 % мирового производства полистирола и 34 % потребления полиуретана [11, 96].

Вспененные материалы создаются путем введения пузырьков газа в структуру материала, что придает им низкую плотность. Эти материалы широко используются из-за малого веса, хорошей теплоизоляции, плавучести, способности поглощать энергию и вибрации.

Существует два основных типа пен: с открытыми и закрытыми клетками. Пены с открытыми клетками применяются там, где важны комфорт и звукопоглощение, например, в матрасах и акустических панелях. С другой стороны, пены с закрытыми клетками обладают высокой плотностью и могут использоваться как конструкционные материалы в строительстве и автомобильной промышленности.

Вне зависимости от типа, пенопласты состоят из твердой (полимерной) и газовой фаз. Для их получения применяются два метода: физический (использование инертных газов) и химический (использование химических выдувных агентов) [19].

Таким образом, классификация ДКМ предоставляется как систематизированный способ понимания их разнообразия и свойств, что позволяет выбирать наиболее подходящие материалы для конкретных производств и оптимизировать их характеристики.

1.3 Конструкционные древесно-полимерные композиционные материалы

Конструкционные композиционные материалы находят широкое применение в строительной индустрии благодаря своим выдающимся характеристикам, таким как прочность, жесткость и стойкость к воздействию окружающей среды. К числу таких материалов можно отнести: цементно-известковая смесь [105], ксилолит [139], гипсовый композит [75], плиты из ориентированной стружки (ОСБ) [129], плиты древесно-стружечные (ДСП) [111], древесноволокнистые плиты (ДВП) [127], массы древесные прессовочные (МДП) [34], древесно-полимерный композит (ДПК) [110].

ДПК представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из трёх

ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ:

- 1) частицы измельченной древесины, выступающие в роли армирующего наполнителя;
- 2) термопластичные полимеры (поливинилхлорид, полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП)), которые образуют матричную фазу материала;
- 3) комплекс модификаторов – химические добавки, улучшающие адгезионные свойства, стойкость к старению и влагопоглощение (до 5 % в составе материала).

Одним из ключевых преимуществ ДПК является возможность использования возобновляемых ресурсов (древесные волокна) и перерабатываемых полимеров, что повышает экологическую привлекательность данного типа материалов [30].

Особого внимания заслуживают армированные волокнами полимеры, которые обеспечивают высокие механические характеристики при относительно низкой плотности материала [31]. Однако значимым ограничением данных композитов является их неспособность выдерживать высокие температуры, что может ограничивать область их применения, особенно в условиях повышенной термической нагрузки.

Для повышения эксплуатационных характеристик композитов, таких как стойкость к окислению, разрабатываются различные технологические решения. В частности, для углеродно-матричных композитов предлагается использование защитных покрытий, обработка волокон, а также введение межслойных добавок и различных типов армирующих волокон в цементную матрицу. Это позволяет повысить долговечность материала, снизить его склонность к термоокислительной деструкции и улучшить эксплуатационные свойства.

Аналогичные задачи решаются и при разработке новых типов композиционных материалов на основе древесных наполнителей, что нашло отражение в работах С.А. Угрюмова [126-130], которые посвящены исследованию и разработке ресурсосберегающей технологии создания новых видов композиционных материалов на основе древесных наполнителей, костры

льна и синтетических олигомеров. В ходе исследования автором были проведены обширные экспериментальные работы, направленные на анализ процессов смачивания, адгезии и поверхностных явлений при производстве композиционных материалов на основе указанных компонентов. Автором решается проблема несоответствия между сложившейся системой организации использования древесных ресурсов и предлагается общая концепция, в основу которой положен системный подход к организации ресурсосбережения (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Реализация общей концепции повышения эффективности производства древесных композиционных материалов

Основные научные результаты работы включают в себя разработку методик определения смачивающей способности и поверхностного натяжения компонентов композиционных материалов, а также исследование термодинамических свойств и их влияния на процесс склеивания наполнителей и костры льна клеевыми составами на основе синтетических олигомеров. Кроме того, автором были разработаны модифицированные клеевые композиции с целью повышения их смачивающей способности и адгезионных свойств, а также математические модели, оценивающие влияние основных технологических факторов на свойства композиционных материалов на основе костры льна.

Работа Стородубцевой Т.Н. [120] посвящена исследованию структуры и механических свойств древесного композиционного материала с использованием математической модели. Основная цель работы заключалась в разработке модели, которая позволит теоретически изучить влияние различных параметров на механические свойства ДКМ, таких как концентрация и фракционный состав древесины, технология получения и внешние воздействия. В ходе исследования была разработана математическая модель структуры ДКМ, основанная на методе динамики частиц, которая активно применяется в различных областях науки и техники. Модель представляет собой алгоритмическую, а не аналитическую зависимость, что означает, что выходные характеристики модели рассчитываются с использованием дискретизации пространства и времени, а также соответствующего алгоритма расчета. Полученные результаты показали оптимальный состав материала, при котором достигается наилучшее сочетание прочности и деформируемости. Кроме того, выявлено, что увеличение эффективности производства изделий из ДКМ может способствовать решению ряда экологических проблем и созданию новых рабочих мест.

Бурындин В.Г. [20] в своей работе занимался исследованиями в области синтеза, свойств и применения карбамидоформальдегидных смол (КФС) в производстве древесно-композитных материалов, изучением синтеза и свойств концентрата и карбамидоформальдегидных смол на его основе, оптимизацией

процессов получения КФС для производства древесностружечных плит (ДСтП) и фанеры с целью снижения токсичности и улучшения качества материалов, изучением влияния химического состава смол на их свойства и токсичность, разработкой статистических моделей процессов производства КФС с заданными свойствами для получения экологически безопасных материалов, исследованием изменения функционального состава и свойств КФС при их хранении, изучением влияния циклических азотсодержащих структур на свойства смол и материалов на их основе. Работа В.Г. Бурындина представляет собой комплексное исследование, направленное на разработку новых технологий и материалов, способствующих снижению токсичности и улучшению качества древесно-композитных изделий.

Анализ вышеперечисленных исследований показывает значительные достижения в разработке древесно-полимерных композитов и связанных технологий. Однако, выявленные ограничения, такие как узкая сфера применения моделей и технологий, создают возможности для дальнейших исследований. Эти работы открывают перспективы для улучшения свойств и расширения применения древесно-полимерных композитов.

1.4 Теплоизоляционные композиционные материалы на основе различных наполнителей

В последние десятилетия особое внимание уделяется разработке и применению инновационных теплоизоляционных материалов в строительстве. Их использование позволяет значительно повысить энергоэффективность зданий, снизить затраты на отопление и кондиционирование, а также обеспечить комфортные условия проживания и работы.

К теплоизоляционным плитам относится такой материал, как термoporит. Его производят из цемента, извести, органических или минеральных волокнистых наполнителей, хлорной извести и жидкого стекла [82]. Эти плиты плотностью от 700 до 1300 кг/м³, разного формата используются в качестве

конструкционно-теплоизоляционного материала в каркасном строительстве.

Относительно недавно появился другой экологически безопасный строительный материал для внутренней отделки систем пола, стен, перегородок и потолка – это гипсоопилочные блоки. В его состав входят гипс 83 %, стружка 15 %, вода 2 %. Эти блоки используются в помещениях: объектах социальной сферы, медицинских учреждениях, школах, детских садах, санаториях, в жилых, общественных, промышленных и административных зданиях.

Решением вопроса утилизации отходов коры стал королит. Данный материал представляет собой конструктивно-теплоизоляционную плиту на базе коры и минеральных вяжущих. Материал используется для теплоизоляции зданий и сооружений.

Кроме королита разработан теплоизоляционный материал – плита из цельной коры, которая представляет собой листовой материал длиной до 3 м, шириной 0,39 – 1,19 м и толщиной 22 – 25 мм. Производят их прессованием цельной коры древесины ели, пихты или лиственницы без вяжущих и клеевых веществ.

Также производят торфяные теплоизоляционные изделия в виде плит, скорлуп и сегментов. Плиты используют для теплоизоляции конструкций промышленных зданий, холодильников и холодильных установок.

Пористость торфяных теплоизоляционных плит обеспечивается однородной волокнистой структурой, предоставленной маленькими сообщающимися порами. Абсолютное значение пористости торфяных плит колеблется в пределах 84 – 91 % [13].

Кроме торфяных плит, широко используется и плиточная минеральная вата, которая не боится высоких температур, а также их перепадов; находясь под воздействием высоких температурных значений, минеральная вата не тлеет и не источает резкие химические запахи; этот материал может контактировать с агрессивными химическими веществами, не сильно теряя при этом своих начальных высоких показателей, например, по паропроницаемости; изделие является гибким и принимает нужную форму, либо положение в зависимости от монтажа [96].

Современные теплоизоляционные материалы предлагают широкий спектр решений для эффективной теплоизоляции зданий. Одним из таких материалов является плитный утеплитель на базе базальтового волокна выдерживающий высокие температуры. Долговечность высококачественного базальтового утеплителя в среднем составляет около 50 лет. Материал обладает высокими звукоизоляционными свойствами, не боится температурных изменений, устойчив к воздействиям высоких нагрузок [90].

Среди доступных теплоизоляционных решений следует отметить пенополистирольные плиты, которые являются более экономичным вариантом по сравнению с минеральными аналогами. Этапы технологического процесса производства пенополистирола включают в себя вспенивание сырья, просушивание материала, формование. Пенополистирольные плиты подходят для обустройства частных жилых домов благодаря своему легкому весу, что облегчает установку и транспортировку. Они отличаются плохой гигроскопичностью и устойчивостью к воздействию влаги [119].

Кроме того, одним из перспективных теплоизоляционных материалов являются перлитцементные утеплители, которые производятся на основе перлита, смешиваемого с цементом и асбестовой пульпой. Данные утеплители получили своё распространение благодаря следующим положительным свойствам:

- не подвержены воздействию негативных факторов внешней среды;
- являются экологически безвредными для человека;
- не токсичны;
- устойчивы к действию агрессивных химических средств.

Следует отметить, что средняя плотность теплоизоляционных материалов невысока по сравнению с большинством других строительных материалов, так как значительную часть объема занимают поры. В настоящее время в строительстве применяется широкий спектр теплоизоляционных материалов с разной плотностью, которая колеблется в диапазоне от 17 до 400 кг/м³ в зависимости от их назначения.

Известно, что чем ниже средняя плотность сухого материала, тем лучше его теплоизоляционные характеристики при различных условиях, которые сопутствуют строительным конструкциям.

Теплоизоляционные материалы маркируются в зависимости от их плотности. Классификация теплоизоляционных материалов по плотности указана в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Классификация теплоизоляционных материалов по плотности

Обозначение	Группа материалов	Марки по плотности, кг/м ³				
		15	25	35	50	75
ОНП	Особо низкой плотности					
НП	Низкой плотности	100	125	150	175	-
СП	Средней плотности	200	225	250	300	350
Пл	Плотные	400	450	500	600	-

Толщина слоев теплоизоляционной панели может варьироваться в зависимости от величины перепада температур, а также множества факторов, учитываемых в расчетах, таких как исходные материалы и структура панели. Важно отметить, что эти параметры могут изменяться в зависимости от технических требований и целей проектирования.

Современные теплоизоляционные материалы, включая утеплители в форме панелей, обеспечивают эффективное решение различных строительных задач (утепление фасадов, кровель, полов, перекрытий и коммуникаций) с высокой энергоэффективностью и использованием местного сырья, включая вторичное [79]. В данном контексте значимый вклад внесли работы ряда исследователей, которые детально изучили различные аспекты создания и применения таких композитов.

В.А. Салдаев и др. [92] разработали технологию получения древесно-полимерного теплоизоляционного материала с улучшенными эксплуатационными свойствами (рис. 1.7), высокими теплофизическими

показателями и низкой рыночной стоимостью. Ярким примером этого направления является производство и применение древесно-полимерных композитов, состоящих из пенополиуретана, смешанного с технологической щепой.

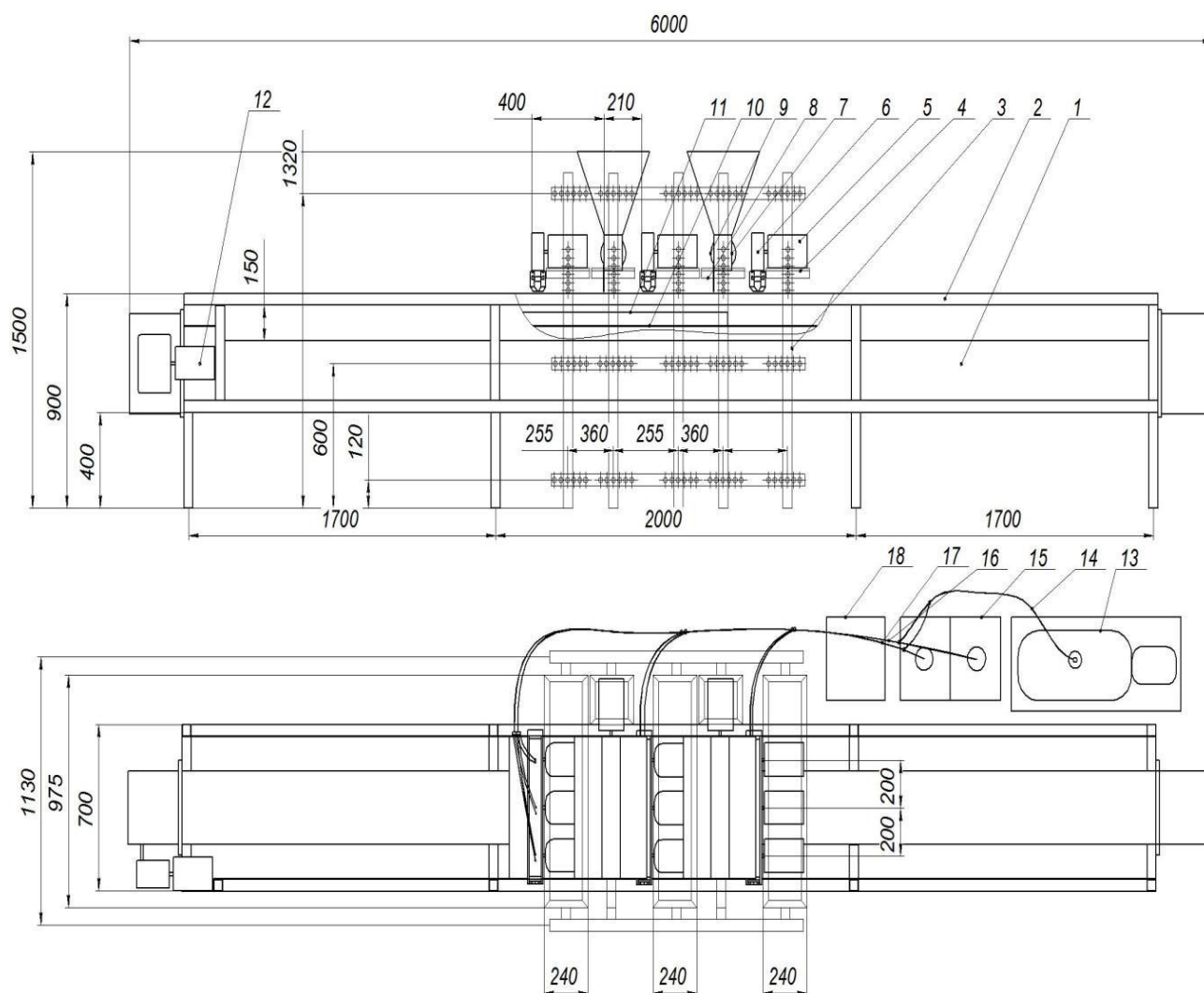


Рис. 1.7 – Опытно-промышленная установка для получения древесно-полимерного теплоизоляционного материала: 1 – конвейер; 2 – рама конвейера; 3 – рама заливочного узла; 4 – опора двигателя; 5 – электродвигатель; 6 – заливочная головка; 7 – бункер щепы; 8 – опора двигателя бункера; 9 – привод иллюзного затвора; 10 – лента конвейера; 11 – форма; 12 – привод конвейера; 13 – компрессор; 14 – шланг подачи сжатого воздуха; 15 – пеногенератор; 16 – шланг подачи компонента «А»; 17 – шланг подачи компонента «Б»; 18 – вакуум насос

Авторами разработан и экспериментально обоснован состав древесно-полимерного теплоизоляционного материала. Выявлено соотношение исходных

компонентов, которое необходимо выдерживать в следующих диапазонах: технологическая щепа 56 – 68 масс. %, полиол 17,6 – 12,8 масс. %, полиизоцианат 26,4 – 19,2 масс. %, антипирен 0,08 – 0,09 л/кг. Данный материал обладает низкой рыночной стоимостью.

А.Е. Шкуро и В.В. Глухих [32, 142] занимались разработкой древесно-полимерных композитов с термопластичными полимерными матрицами и наполнителями сельскохозяйственного происхождения, проводя исследования их физических и механических свойств. Была доказана целесообразность использования древесно-полимерных плит в качестве теплоизоляционного материала. В рамках исследования авторы систематизировали и проанализировали имеющиеся литературные данные, касающиеся технологий получения и характеристик древесно-полимерных композитов с наполнителями, которые получают на основе отходов сельского хозяйства.

В работе Степанова В.В. [119] описывается разработка аппаратного оформления производства теплоизоляционных материалов на органическом наполнителе, минеральном вяжущем и полимерных компонентах (рис. 1.8).

Технология направлена на переработку древесных отходов в высокоэффективный композиционный материал со значительными теплоизоляционными свойствами. Процесс включает дозированную подачу древесного заполнителя (технологической щепы) в смеситель, где она смешивается с раствором стекла натриевого для обработки наполнителя. Далее в смесь добавляют портландцемент, химическую добавку (хлорид кальция) и воду, а затем техническую пену для получения однородной массы. Готовая масса затем направляется в форму, где происходит формование плитного материала. После отверждения материал подвергается атмосферной выдержке и наносится полимерная оболочка из пенополиуретана. На заключительном этапе материал подвергается технологической выдержке, необходимой для завершения всех химических и физико-механических процессов, после чего он готов к эксплуатации.

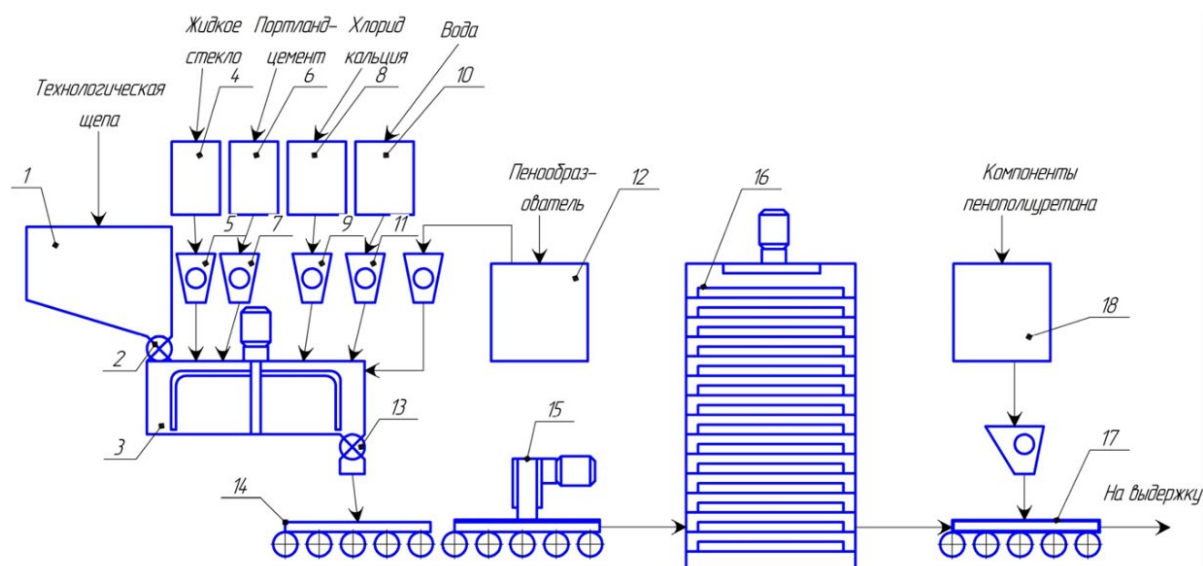


Рисунок 1.8 – Схема производства теплоизоляционного материала: 1 – бункер для щепы; 2 – питатель; 3 – смеситель; 4 – емкость для раствора стекла натриевого; 5 – питатель; 6 – бункер для портландцемента; 7 – питатель; 8 – емкость для хлорида кальция; 9 – питатель; 10 – емкость для воды; 11 – питатель; 12 – пеногенератор; 13 – питатель; 14 – форма; 15 – под прессовочное устройство; 16 – камера гидратации; 17 – специализированная форма; 18 – заливочная машина.

Работа А.А. Лукаша [70] посвящена исследованию комплексной переработки древесины мягких лиственных пород (МЛП) с целью создания материалов и изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами. В ходе исследования были выявлены пути повышения эффективности переработки указанной древесины. Основываясь на аналитических и экспериментальных методах, разработана обобщенная модель комплексной переработки, учитывающая различные аспекты процесса, включая использование различных видов сырья и минимизацию затрат. В работе также рассмотрены вопросы создания ячеистой конструкции в теплоизоляционных материалах и исследования структуры физико-технических свойств древесных композитов из отходов механической обработки.

Исходя из анализа работ вышеприведённых авторов, можно сделать вывод, что значительный прогресс был достигнут в области разработки древесно-полимерных композитов и теплоизоляционных материалов. Салдаев В.А. и его коллеги предложили технологию создания теплоизоляционного материала с

низкой рыночной стоимостью, но ограниченными прочностными характеристиками. Исследования А.Е. Шкуро и В.В. Глухих показали целесообразность использования древесно-полимерных плит с сельскохозяйственными наполнителями, но практическое применение таких материалов для теплоизоляции остаётся недостаточно изученным. В работе Степанова В.В. предложена инновационная технология переработки древесных отходов, однако ограниченная адаптивность технологии к различным типам сырья создаёт трудности в её масштабировании. Исследования А.А. Лукаша по комплексной переработке мягкой лиственной древесины внесли вклад в создание эффективных моделей производства, но их применимость ограничена условиями крупномасштабного производства.

Таким образом, исследователи далеко продвинулись в решении актуальных задач разработки новых материалов и технологий, однако, остаются аспекты, требующие дальнейшего совершенствования. В частности, необходимо улучшать прочностные свойства материалов, расширять их практическое применение и повышать адаптивность технологий. Это обосновывает необходимость продолжения исследований в данном направлении, с акцентом на устранение выявленных ограничений и улучшение эксплуатационных характеристик.

1.5 Слоистые древесно-полимерные композиционные материалы

Слоистые древесно-полимерные композиционные материалы (СДПКМ) представляют собой многослойные структуры, включающие как природные компоненты (древесные волокна), так и синтетические полимеры, что позволяет объединить в одном материале такие свойства, как прочность, лёгкость и устойчивость к внешним воздействиям. Технология производства СДПКМ подразумевает чередование слоев древесных волокон и полимерных матриц, что обеспечивает возможность модификации эксплуатационных свойств материала в зависимости от требований к конечному изделию [53].

СДПКМ включают несколько слоев, каждый из которых выполняет определённую функциональную задачу. Обратный слой зачастую представляет собой декоративное покрытие, обладающее улучшенными эстетическими и защитными характеристиками. Лицевой слой может быть выполнен из полимерных покрытий с высокой стойкостью к ультрафиолетовому излучению и химическому воздействию, что увеличивает долговечность материала. Внутренние слои обычно состоят из древесных волокон, пропитанных термореактивными или термопластичными полимерами, такими как полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), поливинилхлорид (ПВХ), или более сложные матрицы на основе пенополиуретанов (ППУ).

Основной структурный компонент СДПКМ – древесные волокна, обеспечивающие высокий модуль упругости материала, в то время как полимерная матрица увеличивает пластичность и изоляционные свойства. Древесные волокна, обладающие высокой степенью анизотропии, оказывают значительное влияние на прочностные характеристики конечного материала.

Механические свойства слоистых ДПКМ зависят от соотношения модулей упругости компонентов, толщины слоев и направления укладки волокон.

Основные эксплуатационные свойства СДПКМ определяются как составом материала, так и структурой слоёв. Одной из ключевых характеристик является высокая устойчивость к внешним воздействиям. Полимерная матрица выполняет функцию барьера, защищая древесные волокна от воздействия влаги, химических агентов и ультрафиолетового излучения, что препятствует биологической деструкции. В отличие от натуральной древесины, СДПКМ обладают высокой стойкостью к грибковым инфекциям и насекомым, что увеличивает их долговечность [126].

Теплоизоляционные свойства СДПКМ обусловлены низкой теплопроводностью полимерной матрицы и пористой структурой древесных волокон. Согласно модели теплопередачи в многослойных материалах, общее термическое сопротивление определяется суммой сопротивлений отдельных слоев.

Использование методов поверхностной модификации, таких как плазменная обработка или нанесение защитных покрытий на основе акрилатов или полиуретанов, позволяет дополнительно повысить стойкость СДПКМ к агрессивным внешним условиям и улучшить их долговечность [135].

Ламинированный древесно-полимерный композит (ЛДПК) — это материал, получаемый путем объединения нескольких слоев бумаги или картонной основы, пропитанных меламиновой смолой, и подверженный воздействию высокого давления и температуры. Процесс изготовления включает подготовку основы, пропитку смолой, склеивание и формование, а затем покрытие материала защитной ламинированной пленкой [3].

ЛДПК обладает рядом характеристик, делающих его популярным материалом в различных областях. Он декоративен, имитирует текстуру и цвет натуральных материалов, при этом обладает хорошей механической прочностью. Материал устойчив к влаге, что делает его идеальным для применения в условиях повышенной влажности.

Область применения ЛДПК включает производство мебели и декоративных элементов, создание декоративных напольных покрытий, отделку стен и потолков в интерьерах, а также изготовление различных декоративных элементов, включая столешницы и панели.

Преимущества слоистых древесно-полимерных композитов (ЛДПК) заключаются в их декоративных характеристиках, высокой механической прочности и простоте эксплуатации. В то же время, существуют определённые ограничения: возможные повреждения ламинирующего покрытия при длительном воздействии повышенных температур и влажности, а также сравнительно меньшая несущая способность по сравнению с массивной древесиной, что может ограничивать их применение в конструкционных задачах [4, 5].

Древесно-полимерная композитная фанера — это инновационный строительный материал, который сочетает в себе преимущества древесины и полимера.

Процесс производства древесно-полимерной композитной фанеры

включает смешивание натуральных древесных волокон с полимером, таким как полипропилен. Затем полученная смесь прессуется при высоком давлении и температуре, что позволяет получить прочные и структурно однородные листы материала.

Древесно-полимерная композитная фанера обладает такими свойствами, как устойчивость к влажности, стойкость к гниению и насекомым, а также высокую прочность и долговечность [32, 91].

К преимуществам древесно-полимерной композитной фанеры относится устойчивость к агрессивным средам, долгий срок службы, экологичность и легкость монтажа. Недостатком может быть более высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами.

Текущие исследования направлены на улучшение существующих технологий путём внедрения новых материалов, совершенствования процессов производства и поиска решений, способных минимизировать недостатки традиционных композитных материалов.

И.Я. Хасаншин [83] в своей работе описал способ производства многослойных конструкционных материалов типа сэндвич. Способ производства включает операции укладки в обогреваемую форму двух облицовочных слоев формовочного пресс-материала и теплоизоляционного слоя из пористого открытоячеистого пенополиуретана или фенольно-резольного пенопласта между ними, термопрессования, выдержки, извлечение из формы. В качестве облицовочных слоев применяют полиэфирный стеклонеполненный пресс-материал – растекающийся препрег. Для увеличения жесткости пенопласта производят его предварительную обработку органическим растворителем для открытия пор и пропитки суспензией из эпоксидной смолы, полиэтиленполиамин и неорганического порошкового материала. Данное решение обеспечивает повышение огнестойкости, адгезии и прочности на изгиб получаемой сэндвич-конструкции и оптимизацию технологичности процесса. Материал относится к области композиционных материалов, используемых в строительстве, судостроении, автомобильной, аэрокосмической отраслях и

касается способа производства многослойных конструкционных материалов типа сэндвич.

Работы Галиева И.М. [25-28] посвящены исследованию и разработке технологии производства многослойных напольных настилов на основе древесно-полимерных композитных материалов (рис. 1.9).

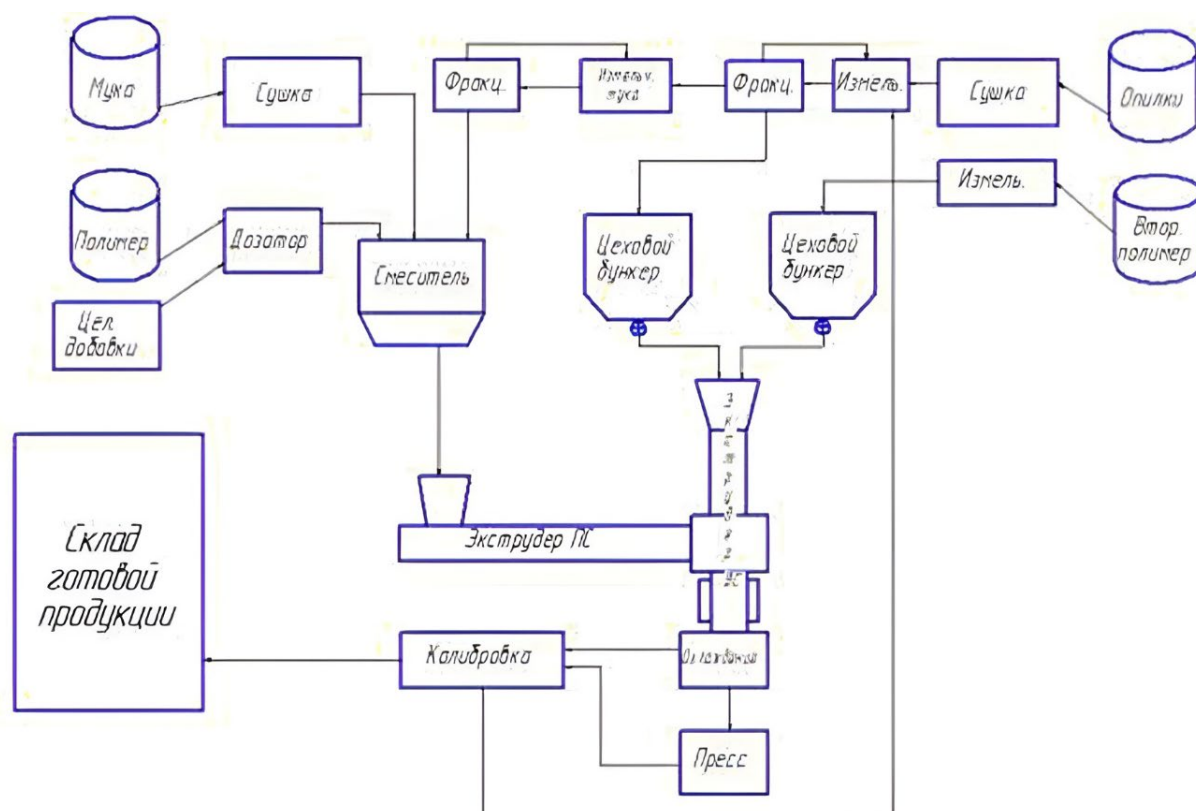


Рисунок 1.9 – Технологическая схема производства напольного настила из древесно-полимерного композита

В рамках своих исследований Галиев И.М. фокусировался на теоретическом обосновании, экспериментальном анализе и практическом применении новых методов и технологий в производстве напольных покрытий. Работы Галиева И.М. включали исследование влияния состава материалов на прочностные и эксплуатационные свойства многослойных напольных настилов; экспериментальное определение оптимального соотношения компонентов в составе напольных настилов для достижения высоких прочностных характеристик и долговечности; анализ конструкционных особенностей изделий, таких как наличие внутреннего слоя с наполнителем волокнистого типа

и его влияние на улучшение прочностных свойств материала; разработка алгоритма расчета, позволяющего выбирать состав композита в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик напольного настила; проведение технико-экономического анализа, подтверждающего эффективность внедрения разработанных технологий в производство и оценивающего экономический эффект от их применения.

Т.А. Горшкова [34] предложила технологию изготовления многослойных теплоизоляционных панелей на основе полимерных материалов (рис. 1.10).

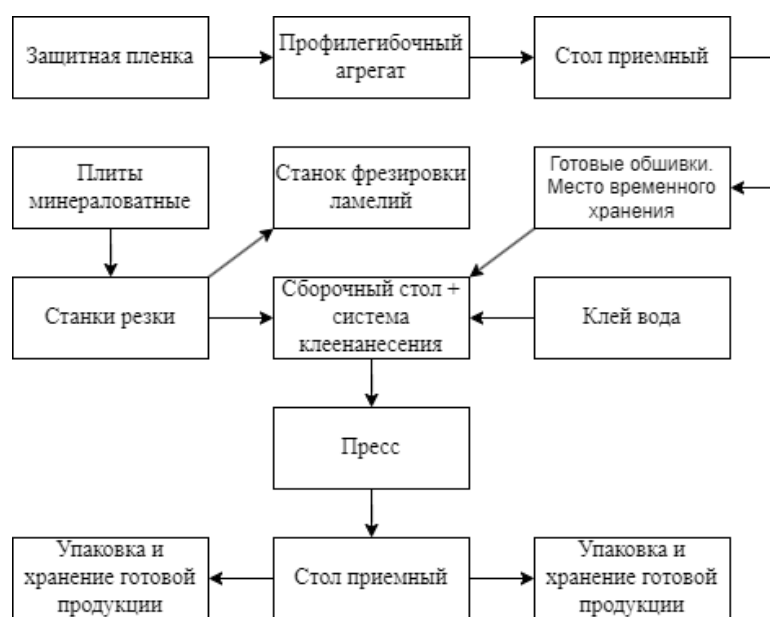


Рисунок 1.10 – Технологическая схема производства панелей

Строительная панель предназначена для утепления кровли или стен сооружения и включает в себя наружную и внутреннюю обшивки. Целью данной работы являлось усовершенствование технологии изготовления многослойного теплоизоляционного материала на основе композитного полимера, которая исключает некоторые недостатки существующих технологий. Изменение имеющихся технологий за счёт выбора новых материалов и изменения технологии сборки привело к упрощению монтажа панели, повышению надёжности и долговечности сооружения в целом, улучшению экологических характеристик строительной панели, снижению стоимости материала,

отсутствию ограничения в дополнительной нагрузке.

Анализ проведённых исследований в области многослойных конструкционных и теплоизоляционных материалов показывает значительный прогресс в разработке перспективных технологий и композитов. Учёные заложили теоретические и экспериментальные основы, предложив эффективные подходы к созданию многослойных конструкций, таких как сэндвич-материалы и напольные покрытия на основе древесно-полимерных композитов. Однако выявленные проблемы, связанные с выбором теплоизоляционных слоёв, недостаточной детализацией процессов производства и ограниченной применимостью материалов, требуют своего решения. В рамках настоящего исследования решаются задачи усовершенствования состава материалов, оптимизации технологических процессов и внедрения комплексных методик, что позволит существенно повысить эксплуатационные свойства многослойных композитов и расширить их область применения в строительной и других отраслях промышленности.

Глава II ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЛОЁВ ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Анализ современного состояния науки и технологий изготовления ДПКМ показал наличие большого количества разработанных композиционных материалов теплоизоляционного, конструкционного, декоративного назначения.

Одновременное выполнение вышеперечисленных функций возможно при создании трёхслойного материала на основе древесно-полимерных композитов, состоящего из поверхностных слоёв конструкционного и декоративного назначения и внутреннего теплоизоляционного слоя. Наружные слои, соприкасающиеся с атмосферной средой, кроме прочностных и декоративных характеристик должны отличаться малой влагопоглощающей способностью, высокой биостойкостью. Поэтому в качестве связующего для древесных частиц следует применять полимеры: полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), полистирол (ПС), сан-пластик (САН), с введением технологических добавок.

Теплоизоляционный слой целесообразно располагать между поверхностными слоями, имеющими высокие прочностные показатели. Для уменьшения теплопроводности теплоизоляционного слоя в качестве связующего наиболее целесообразно применять пенополиуретан (ППУ).

Задачей исследования является подбор концентрации связующих компонентов, технологических добавок и рациональных геометрических размеров древесного наполнителя в каждом из слоёв стенового материала на основе древесно-полимерных композитов с целью достижения требуемых показателей.

2.1 Объекты исследований и их основные свойства

Процесс подбора компонентов для трёхслойного стенового материала (рис. 2.1) основывался на оптимизации механических, теплотехнических и эксплуатационных характеристик каждого из слоёв.



Рисунок 2.1 – Трёхслойный материал на основе ДПК

Выбор *пенополиуретана (ППУ)* в качестве материала для теплоизоляционного слоя обусловлен его низкой теплопроводностью [88]. На рисунке 2.2 видно, что при толщине слоя в 80 мм ППУ по теплопроводности эквивалентен слою из бетона толщиной 3440 мм. Выбор ППУ обусловлен не только его высокими теплоизоляционными свойствами, экологической безопасностью, но и сроком службы, который составляет 25 – 50 лет.

Теплоизоляционный слой состоит из *крупнодисперсных древесных частиц* [41], смешанных с *полиолом* марки ЛапС 48-40 и с *изоцианатом* марки WANNATE PM-200. Выбор этих компонентов был обусловлен их высокой химической совместимостью и устойчивостью к различным воздействиям, включая влагу и температуру.

На этапе выбора полимерного связующего и наполнителя учитывались такие параметры, как теплопроводность, прочность, стойкость к влаге и атмосферным воздействиям. В качестве наполнителя использовался различный фракционный состав *древесных отходов*, преимущественно хвойных пород древесины. Абсолютная влажность древесных частиц варьировалась в диапазоне от 10 до 90 %.



Рисунок 2.2 – Сравнение пенополиуретана с другими материалами

Теплоизоляционный слой включал в свой состав *древесные частицы* в виде древесных волокон в соответствии с ГОСТ 15815-83 [27], получаемых в результате измельчения древесного сырья или его отходов. В рамках проведенных исследований использовались древесные волокна, предназначенные специально для создания трёхслойного стенового материала на основе ДПК. Максимальные геометрические размеры древесных частиц в виде древесных волокон, применяемых в созданном стеновом материале, не превышают 20 мм по длине, что позволило обеспечить однородность структуры и улучшение адгезионных свойств.

В состав теплоизоляционного слоя был включен пенополиуретан (ППУ) – материал, получаемый путем реакции между двумя компонентами: полиолом и изоцианатом. *Полиолы* представляют собой компоненты, включающие в себя органические соединения с активными группами гидроксила. Второй компонент – *изоцианат* вводится в реакцию в качестве полимеризирующего компонента. В процессе формирования ППУ эти компоненты смешиваются, что инициирует химическую реакцию полимеризации.

Изоцианат – синтетическая смола, содержащая свободные или блокированные изоцианатные группы, основанные на ароматических, алифатических или циклоалифатических изоцианатах. На основе данных смол готовится связующее для водостойких плит [17, 67].

Изоцианат (используемый, в том числе, в качестве технологической добавки

в конструкционном поверхностном слое) может активизировать химические группы соединений, что усиливает взаимодействие между различными фазами композитного материала. Такие изменения свойств материала, вызванные добавлением изоцианата, способствуют улучшению его структуры и свойств. Увеличение плотности и укрепление межфазных взаимодействий способствуют повышению прочности и стойкости материала к разрушению.

Изоцианаты представляют собой высокоактивные химические соединения, которые широко применяются в производстве полиуретановых материалов. Однако они относятся к классу веществ, обладающих выраженной токсичностью, что требует строгого соблюдения мер безопасности при работе с ними. Эти вещества, включая наиболее распространённые метилendifенилдиизоцианат (MDI) и толуилendifиизоцианат (TDI), используются в производстве пенополиуретана, покрытий, клеев и других материалов. Основная опасность, связанная с изоцианатами, заключается в их воздействии на органы дыхания, кожу и слизистые оболочки, а также риск возникновения острых и хронических аллергических реакций. Летальные случаи вероятны при нарушении техники безопасности: отсутствии вентиляции, отсутствии индивидуальных средств защиты (масок, респираторов) и при длительном воздействии.

При работе с изоцианатами необходимо соблюдать требования, установленные нормативными документами, в том числе: ГОСТ 12.1.007-76 "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности"; ГОСТ 12.1.044-89 "ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения"; ГОСТ 12.1.005-88 "ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны".

Характеристики полиола и изоцианата, применяемых для формирования теплоизоляционного слоя, представлены в табл.2.1.

В качестве полимеров для производства поверхностных слоёв использовались: *полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), полистирол (ПС), сан-пластик (САН)*. Их добавление в состав древесно-полимерного композита улучшало прочностные

характеристики и сопротивляемость к атмосферным воздействиям.

Таблица 2.1 – Технические характеристики компонентов теплоизоляционного слоя полиола и изоцианата

Показатель	Полиол	Изоцианат
Массовая доля воды, %	2,5 – 4,0	–
Массовая доля NCO-групп, %	–	30 – 32
Плотность, г/см ³ (25 °С)	1 – 1,1	1,2 – 1,25
Вязкость, МПа·с (25 °С)	100 – 300	150 – 250
Стабильность при хранении, мес	3	6
Температура хранения, °С	15 – 20	15 – 20

Полиэтилен (ПЭ) — это полимерный материал, который широко используется в различных сферах промышленности благодаря своей прочности, устойчивости к химическим воздействиям, низкой стоимости и легкости обработки. Он обладает высокой степенью электроизоляции и не подвержен коррозии.

Полипропилен (ПП) представляет собой термопластичный полимер, который относится к классу полиолефинов. Полипропилен обладает высокими физическими и химическими свойствами. Характеристики полипропилена включают высокую термическую стабильность, прочность, химическую инертность и устойчивость к воздействию влаги.

Полистирол (ПС) — это синтетический ароматический полимер, получаемый полимеризацией стирола. Он широко используется в промышленности и быту благодаря своей легкости, низкой стоимости и простоте обработки. Полистирол бывает как в твердом виде (например, для производства одноразовой посуды и упаковки), так и в виде вспененного материала (пенополистирола), который часто используется для теплоизоляции и амортизации ударов. Этот материал отличается хорошими диэлектрическими свойствами, низким водопоглощением, а также устойчивостью к большинству химических веществ. Однако полистирол обладает сравнительно низкой ударопрочностью и чувствителен к ультрафиолетовому излучению.

САН-пластик (сополимер стирола и акрилонитрила) имеет аморфную структуру и относится к группе сополимеров стирола. Он является прозрачным

материалом со светопропусканием до 87 %. Материал характеризуется высокой жесткостью (прочность при растяжении 65 – 85 МПа) и лучшей стойкостью к удару. Имеет высокую теплостойкость (температура размягчения по Вика 105 – 110 °С). Для поверхностных слоёв материала устанавливались следующие требования к древесному наполнителю: допустимое количество коры в измельченной древесине не должно превышать 10 % от общей сухой массы наполнителя; древесные частицы, полученные из кусковых отходов деревообработки и лесопиления, не должны содержать плесени, грибков и инородных включений [41, 98].

Конструкционный поверхностный слой включал *древесные частицы волокнистого типа* [42], которые образуются в результате измельчения древесного сырья в дефибраторе, а также измельчения отходов, получаемых при обработке пиломатериалов. В работе использовались древесные частицы волокнистого типа размерами 0,5 – 4 мм.

Декоративный поверхностный слой содержит *древесные частицы волокнистого типа* [41] производимые путем измельчения отходов деревообрабатывающих производств на роторных станках с ножевым валом, а также путем дополнительного измельчения в дефибраторе. Применялись древесные частицы волокнистого типа размерами 0,5 – 20 мм.

В качестве технологической добавки использовался *дикумилпероксид* марки CAS № 80-43-3. Из априорной информации было установлено, что содержание дикумилпероксида составляет от 8 % до 10 % в массе [60]. Дикумилпероксид используется как инициатор полимеризации, отвердитель полиэфирных смол, вулканизирующий агент. Его химическая структура и высокая реакционная активность позволяют использовать его в качестве эффективного ингибитора распространения огня и катализатора для ускорения реакций при формировании древесно-полимерных композитов [60].

При формировании внешних поверхностных слоев важно обеспечить совместимость между полимерами, не обладающими полярными свойствами, и древесным наполнителем. Эту задачу решают путем введения в состав поверхностных слоев при массовой доле, равной 2 – 3 % [124], *диоксида титана R298*,

полиэтиленового воска (аналог ПВ-200), *технического углерода* N330, которые увеличивают предел прочности на растяжение и износостойкость [35], уменьшают гистерезис, т.е. материал становится более устойчивым к деформациям.

Эти добавки способствовали улучшению взаимодействия между полимерной матрицей и древесными частицами, что положительно сказалось на эксплуатационных свойствах готового продукта.

В качестве красителя конструкционный поверхностный слой содержит *сополимер этиленвинилацетатный* (EVA), а декоративный поверхностный слой содержит *меловую добавку* КА-2.

Одним из необходимых условий для производства изделий с устойчивыми характеристиками является стабилизация объема древесного наполнителя, что благотворно влияет на процесс формирования структуры. В идеальной модели древесные частицы равномерно распределены в связующем агенте, ориентированы вдоль изделия, расстояние между ними одинаково, а связующее полностью заполняет пустоты (рис. 2.3).

Расположение древесного наполнителя имеет значение при разрыве поперек волокон независимо от породы, предел прочности намного ниже, чем вдоль волокон.

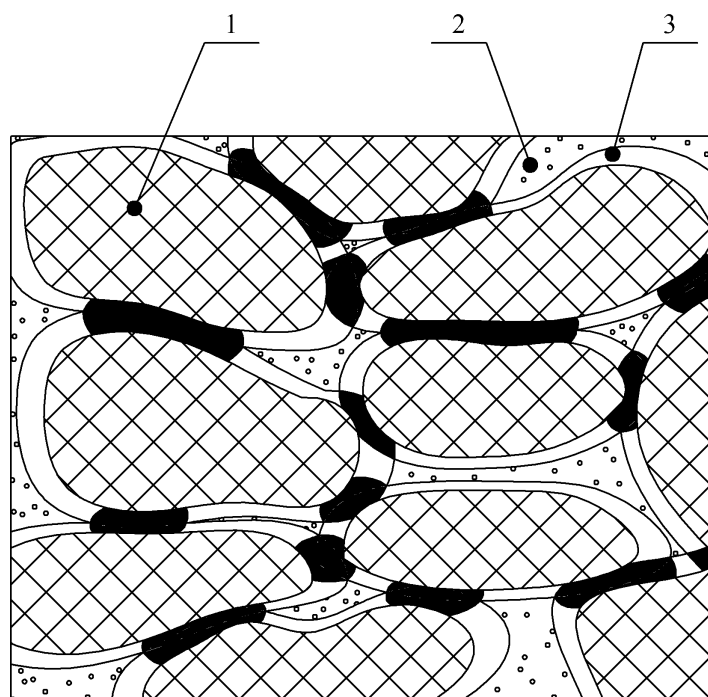


Рисунок 2.3 – Модель композиционного материала из наполнителя и полимерного связующего: 1 – древесные частицы; 2 – полимерное связующее; 3 – граничный слой

Это значение приводится в зависимости от породы древесины. Ориентация древесных частиц вдоль изделия позволяет улучшить прочностные характеристики материала и обеспечить соблюдение требований в процессе эксплуатации.

Кроме того, стабилизация объема наполнителя способствует минимизации внутренних напряжений и деформаций при производстве, что увеличивает общие эксплуатационные свойства композита, такие как стойкость к усадке и растрескиванию.

2.2 Описание методики получения трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов

Процесс изготовления трёхслойного материала включает в себя смешение таких компонентов, как полиол, изоцианат, древесные частицы определенного размера и типа, а также создание древесно-полимерных плит путем прессования древесных частиц, полимеров и технологических добавок [133].

Для получения древесных частиц волокнистого типа использовался дефибратор (рис. 2.4).

Дефибратор выполняет механическое измельчение древесных частиц, разрушая структуру древесного сырья и превращая его в волокнистую массу.



Рисунок 2.4 – Лабораторный дефибратор для измельчения

Применение дефибратора в производстве ДПК позволяет оптимизировать механические характеристики материала при формовании и создании стеновых материалов.

Фракционирование древесных частиц производилось методом просеивания через сита с размерами ячеек 0,5 – 20 мм.

Для приготовления и гомогенизации смеси компонентов, включая древесные частицы, полимеры и другие добавки применялся лабораторный вальцовый смеситель (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Лабораторный вальцовый смеситель

Лабораторный вальцовый смеситель использовался для проведения исследований с целью определения оптимальных пропорций компонентов.

Для прессования смеси при заданной температуре использовался испытательный пресс модели АПВМ-901 (рис. 2.6).

Испытательный пресс АПВМ-901 применялся для прессования материалов с возможностью контроля и регулирования температуры в процессе работы. Присутствие двух нагревательных элементов в виде плит позволяет создавать оптимальные условия при формовании материала.



Рисунок 2.6 – Испытательный пресс АПВМ-901

На рисунках 2.7 и 2.8 представлены схемы процесса получения трёхслойного древесно-полимерного материала.

Создание поверхностных слоёв (рис. 2.7) в виде древесно-полимерных композитов, состоящих из древесных частиц, полимера и технологических добавок, включает следующие этапы: измельчение щепы в древесные частицы до размеров 0,5 – 20 мм, обработка мелкой фракции в щелочной среде, дозирование и смешивание всех компонентов в вальцевом смесителе, распределение смеси в формах, прессование материала и получение конструкционного или декоративного поверхностных слоёв.

Одним из условий получения готового изделия с устойчивыми показателями является равномерность распределения компонентов. Равномерность распределения древесных частиц в связующем агенте или в так называемой “матрице” достигается путём качественного смешивания компонентов в вальцевом смесителе (рис. 2.5).

Получение образцов древесно-полимерных композитов для конструкционного поверхностного слоя включает ряд этапов. Один из полимеров в зависимости от номера образца помещают в вальцовый смеситель,

а после нескольких циклов вращения в вальцовом смесителе при помощи весов дозируют мелкие древесные частицы волокнистого типа и опрыскивают смесь раствором изоцианатной смолы в ацетоне, либо насыпают измельченные с помощью дефибратора гранулы дикумилпероксида с технологической добавкой

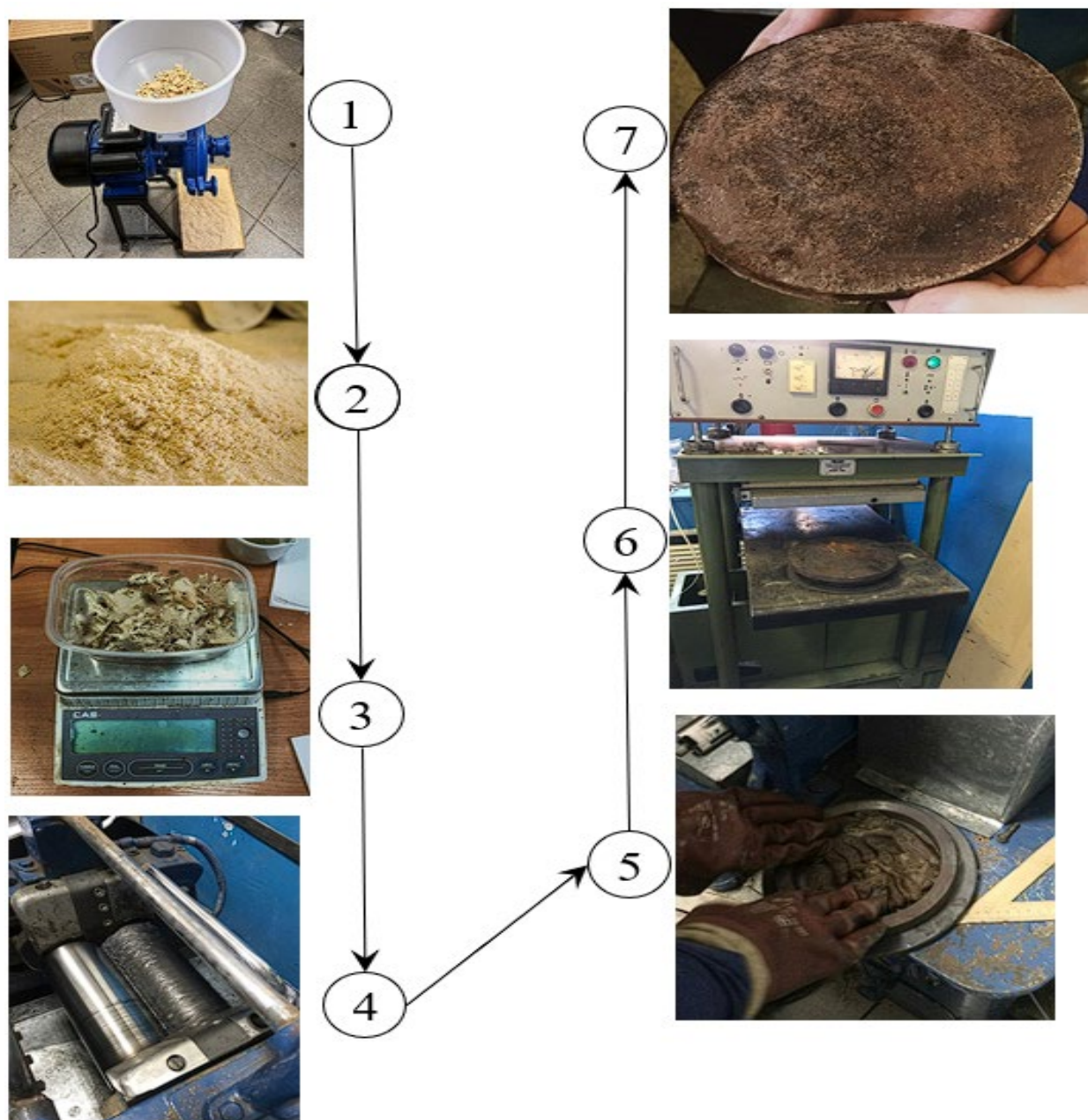


Рисунок 2.7 – Схема получения конструкционного и декоративного поверхностных слоёв трёхслойного древесно-полимерного материала: 1 – измельчение сырья в древесную щепу с помощью дефибратора; 2 – обработка мелких частиц в щелочной среде; 3 – дозирование компонентов с помощью лабораторных весов; 4 – смешивание компонентов в вальцовом смесителе; 5 – распределение смеси в специальных формах; 6 – прессование материала с помощью пресса; 7 – получение готового изделия



Рисунок 2.8 – Схема получения теплоизоляционного слоя трёхслойного древесно-полимерного материала

в виде технического углерода. Процесс смешивания происходит при температуре 165 ± 5 °С в течение 15 мин. Процесс получения декоративного поверхностного слоя происходит по той же методике, как и для конструкционного, но уже без добавления изоцианата или дикумилпероксида и со средней фракцией древесных частиц.

Полученный полуфабрикат помещают в форму, а затем в испытательный обогреваемый пресс марки АПВМ-901 (рис. 2.6) и уплотняют при давлении 8 МПа в течение 10 мин, а затем при давлении 4 МПа в течение 20 мин.

Температура при прессовании поддерживается на уровне 175 °С. При этом поверхность формы покрывается высокотемпературной пленкой, обеспечивающей выемку изделия из формы без повреждения. В результате этих действий получают образцы ДПК в виде плит диаметром 320 мм и толщиной 11 мм (рис. 2.9).

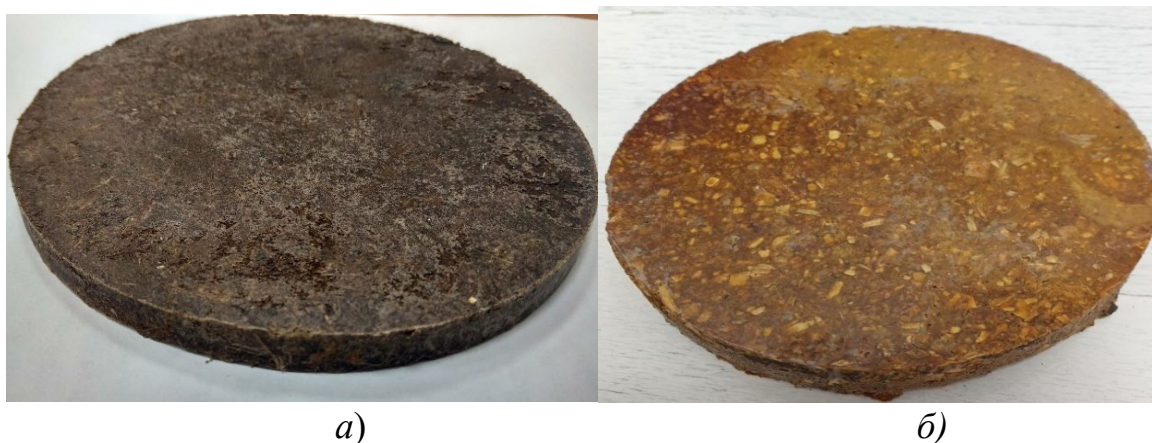


Рисунок 2.9 – Древесно-полимерный композит: а) без изоцианата; б) с изоцианатом

Перед получением смеси для теплоизоляционного слоя, компоненты пенополиуретана А и Б (изоцианат и полиол) и плиты ДПК охлаждают в климатической камере до температуры $-4 - +2$ °С (рис. 2.11).

Следующим этапом является подготовка формы на поверхности одной из плит ДПК, на которую укладывается тщательно перемешанная смесь из ППУ и крупные древесные частицы, полученные на центробежном стружечном станке.

Далее происходит процесс дозирования и тщательного смешивания ППУ с древесными частицами и равномерное выкладывание на подготовленную форму; закрытие второй плитой ДПК; уплотнение смеси и завершение реакции с последующим затвердеванием.

В результате получают готовое изделие в виде трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов (рис. 2.8).

2.3 Методики испытаний и исследований трехслойных стеновых материалов на основе древесно-полимерных композитов

Для изучения физических, механических и химических свойств, а также оценки качества образца [136] был создан экспериментальный комплекс. Данный комплекс состоит из набора стандартного сертифицированного исследовательского оборудования.

Виды проведённых исследований ДПК для трёхслойного стенового

материала представлены на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Виды исследований образцов ДПК для трёхслойного стенового материала

Исследования направлены на определение качественных характеристик материала для определения соответствия нормативно-техническим требованиям.

Количество образцов для каждого исследования определяется методикой испытаний с учётом допустимой погрешности.

Опытные образцы для проведения испытаний изготавливаются в соответствии с установленными стандартными рекомендациями и техническими условиями. Геометрические параметры образцов определяются индивидуально

для каждого вида испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ и разработанными методиками. Длина и ширина образцов измеряются в трех различных точках с помощью микрометра.

Количество измерений толщины зависит от геометрической формы испытуемого материала.

Все испытания проводятся с учётом климатических и эксплуатационных условий, которым может подвергаться материал в реальных условиях эксплуатации. После проведения каждого испытания результаты фиксируются и сравниваются с нормативно-техническими требованиями.

2.3.1 Оборудование для лабораторных испытаний образцов древесно-полимерных композитов

В процессе исследований древесно-полимерного композита для создания трёхслойного стенового материала проводятся эксперименты, которые позволяют оценить его свойства и потенциал для различного применения, а также определить оптимальные пропорции компонентов и условия производства, необходимые для достижения требуемых характеристик в соответствии с нормами и требованиями.

Дополнительно разрабатываются методики испытаний, позволяющие дать адекватную оценку качественных показателей изделия, которые не предусмотрены нормативно-технической документацией.

2.3.1.1 Оборудование для испытаний на устойчивость к атмосферным воздействиям

Для изучения атмосферного влияния на внешний вид и целостность изготовленного объекта проводились климатические испытания. На рисунке 2.11 показана климатическая камера марки СМ-55/50-80 СБ. Эта камера представляет собой специализированное оборудование, предназначенное для проведения

испытаний материалов и изделий в различных климатических условиях.



Рисунок 2.11 – Климатическая камера марки СМ-55/50-80 СБ

2.3.1.2 Оборудование для измерений теплопроводности и термического сопротивления

Для определения теплопроводности и термического сопротивления трёхслойного стенового материала применяется прибор ИТП-МГ4 "250" (рис. 2.12).

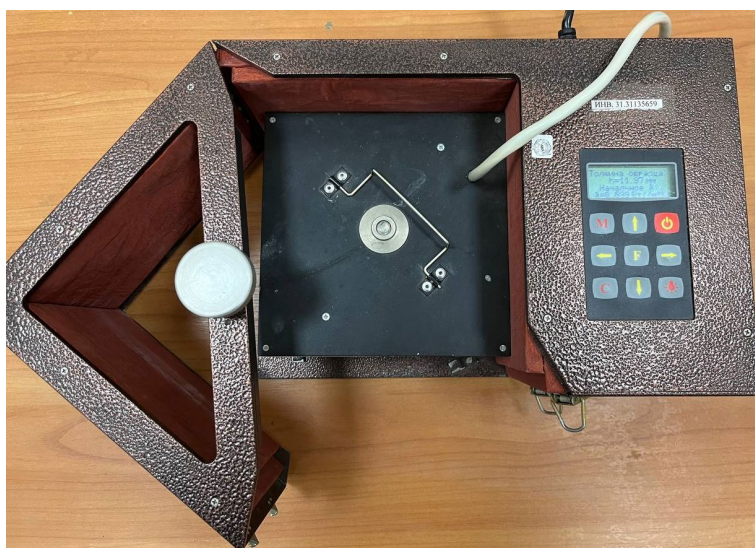


Рисунок 2.12 – Измеритель теплопроводности стационарный ИТП-МГ4 "250"

Вся полученная информация автоматически записывается в архиве и снабжается датой и временем проведения измерений.

2.3.1.3 Оборудование для испытаний на прочность при растяжении, сжатии и изгибе

Проведение испытаний на растяжение, сжатие и изгиб осуществлялось на универсальной испытательной машине ИР 5082-50. На рисунке 2.13 представлены специальные насадки для проведения испытаний.

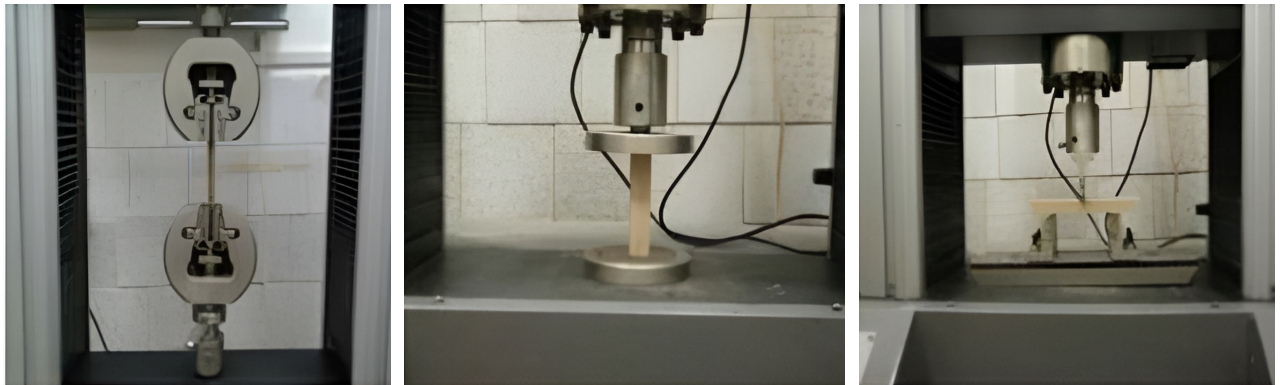


Рисунок 2.13 – Специальные насадки для исследования механических свойств: а) предела прочности на растяжение; б) предела прочности на сжатие; в) предела прочности на изгиб

Эти насадки представляют собой инструменты, специально разработанные для измерения различных параметров прочности материала при различных воздействиях.

Насадка для измерения предела прочности на растяжение позволяет определить силу, необходимую для разрушения материала при растяжении.

Насадка для измерения предела прочности на сжатие предназначена для определения силы, требуемой для разрушения материала при сжатии. Этот параметр необходим для оценки способности материала выдерживать давление и компрессию.

Насадка для измерения предела прочности на изгиб позволяет определить изгибающее усилие и оценить устойчивость материала к изгибу.

2.3.1.4 Оборудование для анализа микроструктуры материалов

Для визуальной оценки взаимодействия древесных частиц с полимерным материалом, в частности, с пенополиуретаном, влияния технологических параметров и свойств исходных компонентов на образование единой древесно-полимерной структуры, применялся микроскопический анализ, который выполнялся с использованием микроскопа марки DMS 300 (рис. 2.14).

Микроскопический анализ с использованием DMS 300 позволяет проводить следующие виды исследований:

- 1) исследование фазовых границ;
- 2) оценка морфологии и распределения наполнителей;
- 3) анализ микроструктурных изменений при различных технологических параметрах;
- 4) выявление аномалий и дефектов.



Рисунок 2.14 – Микроскоп марки DMS 300

Использование такого микроскопа в рамках исследований позволяет понять микроструктуру древесно-полимерных композитов и оптимизировать их

состав для достижения лучших механических, физических и химических характеристик.

2.3.1.5 Оборудование для испытаний на стойкость к истиранию

Истираемость является значимым критерием в характеристике стенового материала.

Для определения стойкости к истиранию опытных образцов использовалась установка со шлифовальной шкуркой и держателем, с закрепленным в нем образцом с возможностью контроля прилагаемой нагрузки. Процесс исследования представлен на рисунке 2.15.

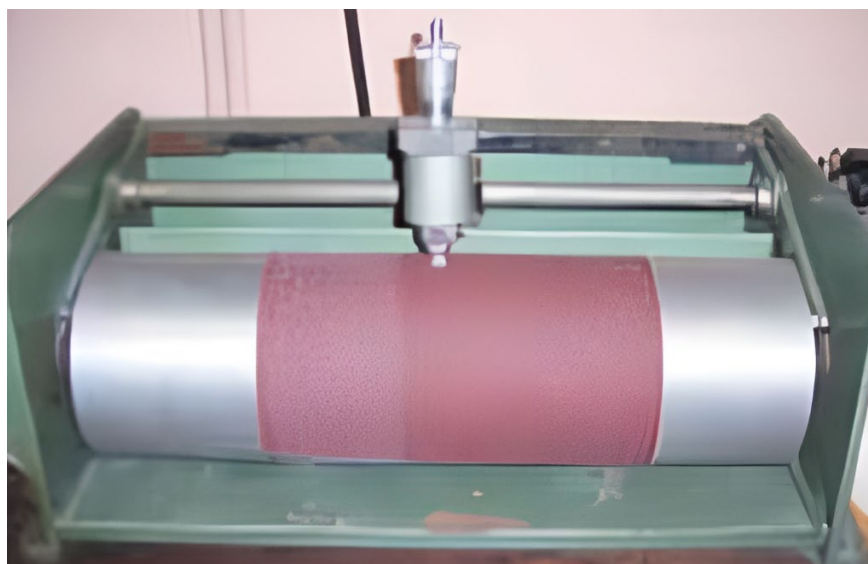


Рисунок 2.15 – Определение показателя истирания ДПК

Эта установка позволяет получить количественные показатели, характеризующие степень износа материала в условиях механического воздействия.

2.3.1.6 Оборудование для испытаний на водостойкость

Важнейшим показателем для строительных материалов является водостойкость. Как правило, водо- и влагопоглощение ухудшают свойства материала, увеличивают теплопроводность и среднюю плотность, а также

уменьшают прочность. Для исследования процесса водо- и влагопоглощения использовался эксикатор с установленной в нем сетчатой подставкой (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Внешний вид эксикатора с образцами

2.3.1.7 Оборудование для оценки огнестойкости материалов

Испытание опытного образца на огнестойкость выполнялось на установке, предназначенной для определения горючести твердых неметаллических веществ и материалов. Схема и внешний вид установки представлены на рисунке 2.17.

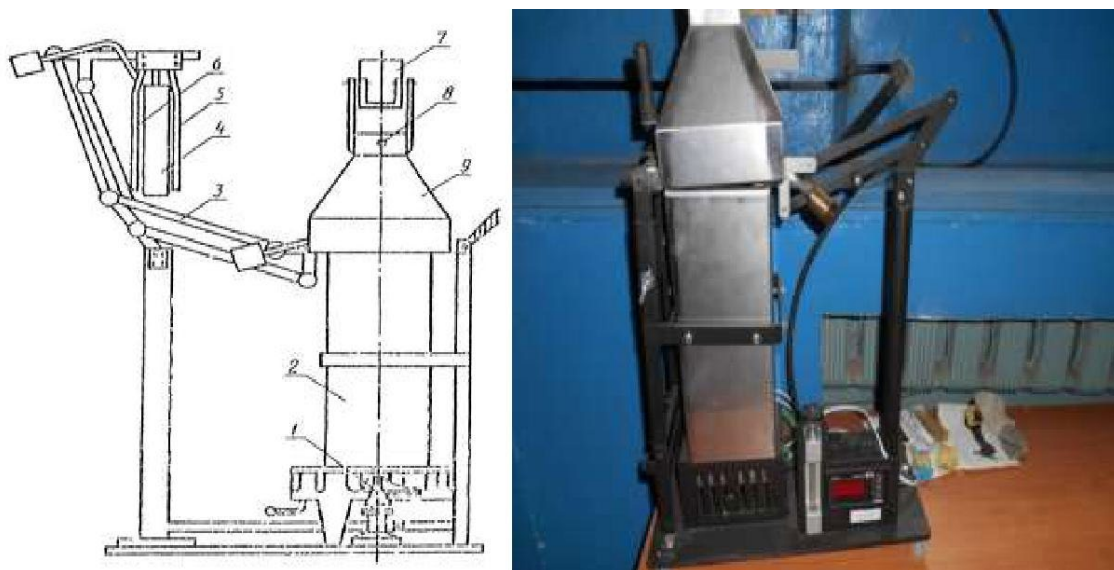


Рисунок 2.17 – Установка для определения группы горючести материала: 1 – горелка; 2 – реакционная камера; 3 – механизм закрепления образца; 4 – опытный образец; 5, 6 – держатели материала, 7 – зеркало; 8 – термоэлектрический преобразователь; 9 – зонтик

Сущность исследования заключается в определении горючести испытуемого материала при заданных температурных режимах и изучении поведения материала в данных условиях. Полученные показатели позволяют определить группу горючести испытуемых образцов.

2.3.2 Методики исследований трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов

Для обоснования выбора вида и концентрации используемого древесного наполнителя и связующего проведены экспериментальные исследования и проанализированы данные, определяющие зависимости эксплуатационных свойств изделия от количественного содержания в нем древесных частиц, связующего и технологических добавок в виде изоцианата или дикумилпероксида.

При обработке данных для построения эмпирических зависимостей используются среднеарифметические значения результатов повторных экспериментов.

2.3.2.1 Методика исследования влагостойкости

Водо- и влагопоглощение определяется испытанием образцов с размерами, равными 50х50 мм согласно ГОСТ 4650-2014 (ISO 62:2008) [46].

Любой загрязнитель поверхности образца для испытания, который может повлиять на поглощение воды, удаляется с помощью очищающего средства, которое не изменяет свойств полимера, предварительно определив степень стойкости полимера к нему в соответствии с ГОСТ 12020. После очистки, перед началом испытания образцы высушиваются при температуре 23 °С и относительной влажности 50 % в течение не менее 2 ч. Для предотвращения загрязнения образцов используются чистые перчатки.

Для определения водопоглощения образцы высушивают для испытания в климатической камере (рис. 2.11) при температуре 50 ± 2 °С в течение не менее 24 ч, затем охлаждают до температуры окружающей среды в эксикаторе

(рис. 2.16) и взвешивают.

Затем испытуемые образцы помещают в контейнер, заполненный дистиллированной водой.

Содержание воды при насыщении измеряют при повторной выдержке образцов и повторном их взвешивании через установленные промежутки времени. Через указанные промежутки времени ± 1 ч испытуемые образцы извлекают из воды, удаляют воду с поверхности и взвешивают каждый образец с точностью до 0,1 г [46] в течение 1 мин после извлечения из воды.

Водопоглощение вычисляют в процентах к массе высушенного образца по формуле:

$$B = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100, \quad (2.1)$$

где m , m_1 – масса высушенного образца и масса образца после выдержки в воде, соответственно, г.

За результат принимают среднее арифметическое значение трёх экспериментов и округляют до 0,1 %.

Для исследования влагопоглощения из изделия вырезают образец размером 50x50 мм и толщиной, равной толщине изделия [46]. После этого образец высушивают до постоянной массы и взвешивают.

Испытуемый материал высушивается до абсолютно сухого состояния при температуре $102 \pm 0,5$ °C и охлаждается до комнатной температуры. Образцы взвешиваются с точностью 0,01 г и устанавливаются на сетчатую подставку, которая находится в эксикаторе так, чтобы образцы не касались друг друга. Затем дно сосуда заливается дистиллированной водой так, чтобы уровень был ниже сетчатой подставки, на которой находится изучаемый объект (рис. 2.16). Первое взвешивание проводят по истечении одних суток, минимальная продолжительность эксперимента 30 суток.

2.3.2.2 Методика определения теплопроводности

Определение теплопроводности полученных образцов производится

измерителем теплопроводности ИТП-МГ4 «250» согласно ГОСТ 15173-70 (СТ СЭВ 2899-81) и ГОСТ 7076-99 [40, 49].

Управляя нагревателем и холодильником, программное устройство прибора устанавливает на поверхностях образца заданные температуры и поддерживает их до тех пор, пока тепловой поток, проходящий через измеряемый образец, не стабилизируется. По истечении необходимого времени производится автоматическое вычисление значений теплопроводности и запись результата в архив.

В процессе испытаний измеряется плотность теплового потока, температура противоположных граней (нагреваемой и "холодной"), а также толщина испытуемого образца. По результатам измерений вычисляется термическое сопротивление и теплопроводность испытуемого материала.

Суть метода измерения теплопроводности материала заключается в измерении плотности созданного теплового потока, который проходит через испытуемый образец перпендикулярно к лицевым граням при различных температурах этих граней. С помощью полученных данных с учётом толщины образца теплопроводность рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{q}{\frac{\Delta T}{d}}, \quad (2.2)$$

где d – толщина образца, мм; q – плотность теплового потока, проходящего через образец, Вт/м²; ΔT – разность температур между противоположными гранями образца, °С.

Образцы должны быть высушены, иметь форму прямоугольного параллелепипеда, иметь плоскую поверхность, толщина должна быть меньше длины ребра лицевой грани минимум в 5 раз, например, лицевые грани 150×150 мм, толщина образца в пределах 10 – 30 мм. Измерения проводятся при температуре окружающей среды 22 ± 1 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 5 %.

2.3.2.3 Методика определения плотности

Определение плотности образцов производится в соответствии с ГОСТ

17177-94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний» [43].

Время выдерживания образцов перед испытанием при температуре 22 ± 5 °C и влажности воздуха 50 % составляет 24 ± 2 часа.

Высушивание образцов до постоянной массы производится при температуре 105 ± 5 °C.

Образцы материалов считаются высушенными до постоянной массы, если потеря их массы после повторного высушивания в течение 0,5 ч не превышает 0,1 %.

Плотность поверхностных слоёв определяется на образцах размером $20 \times 20 \times 20 \pm 1$, которые не превышают предельных отклонений от правильной формы, установленных в нормативных документах для конкретного типа изделия.

Плотность теплоизоляционного слоя определяется на образцах размером $30 \times 30 \times 30 \pm 1$ мм.

Путем взвешивания на весах с точностью до 0,01 г определяется масса образца, а с помощью штангенциркуля измеряются его геометрические размеры. После произведенных замеров вычисляется объем образца.

Далее плотность (кг/м³) вычисляется по формуле:

$$\rho = m_i / V, \quad (2.3)$$

где m_i – масса высушенного образца, кг; V – объем опытного образца, м³.

2.3.2.4 Методика определения прочностных характеристик

Исследования по определению прочностных показателей проводятся по ГОСТ 4670-91 [48].

Твердость определяется на образцах, имеющих форму плоской пластины, размером $20 \times 20 \pm 1$ мм и толщиной не менее 4 мм. Испытание проходит следующим образом: образец устанавливается на неподвижную плиту испытательной машины, между образцом и подвижной плитой помещается металлический шарик диаметром 5 мм и производится вдавливание в

испытываемый материал. Твердость рассчитывается по соотношению:

$$H = F/f, \quad (2.4)$$

где H – показатель твердости, Н/мм²; F – сопоставленная сила вдавливания, Н; f – площадь проекции отпечатка, мм².

Исследование образцов на прочность при растяжении проводится согласно ГОСТ 11262-80 [36]. Сущность метода заключается в кратковременном воздействии на образец с постоянной скоростью деформирования. Испытуемый материал должен иметь форму прямоугольного сечения с закрепленными накладками на концах, длину не менее 250 мм, ширину $25 \pm 0,5$ мм и толщину не менее 5 мм.

Для определения предела прочности на растяжение (рис. 2.13а) опытные образцы вплотную устанавливаются в захваты многофункциональной разрывной машины. Испытания проводятся при равномерном нагружении с постоянной скоростью до полного разрушения образца. По времени сам процесс занимает 60 – 90 с. Управление процессом осуществляется при помощи персонального компьютера, прикладная программа которого приводит в движение испытательную машину, обрабатывает полученную информацию и строит графические зависимости.

Отклонения геометрических размеров рабочей зоны не должны превышать более 0,05 мм. Испытание ведется до полного разрушения исследуемого объекта.

Рекомендуемая скорость испытания 5 – 10 мм/мин. Предел прочности при растяжении определяется формулой:

$$\sigma_{\text{раст}} = \frac{F_{pp}}{A_0}, \quad (2.5)$$

где F_{pp} – разрушающая нагрузка, Н; A_0 – начальное поперечное сечение образца, мм².

При определении сопротивления материала на сжатие образцы изготавливаются в форме прямоугольной призмы основанием 20×10 мм и длиной вдоль торца 10 мм.

Образцы перед испытанием кондиционируются в соответствии с ГОСТ 12423-66. Испытание продолжается до очевидного перехода условного предела

прочности, что определяется по диаграмме машины и заметному увеличению скорости деформирования образца.

При испытании материала на сжатие (рис. 2.13б) используется приспособление для равномерного нагружения образца, представляющее собой две самоустанавливающиеся одна относительно другой пластины из закаленной стали, которые соприкасаются сферическими поверхностями.

За величину показателя прочности принимают напряжение при 10 %-ном сжатии образца. Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, (МПа) определяют из соотношения:

$$\sigma_{сж} = \frac{F}{S}, \quad (2.6)$$

где F – нагрузка при 10 %-ной деформации образца, Н; S – начальная площадь поперечного сечения образца, мм².

За результат принимают среднее арифметическое значение не менее трёх испытаний.

Для определения прочности на изгиб используется разрывная машина со специальной насадкой. Эта насадка состоит из двух параллельных опор с закругленными краями, расстояние между ними регулируется в соответствии с методикой исследований. Посередине опор находится нагрузочный клин с закругленной поверхностью, который может вертикально перемещаться относительно опор. Подвергаемый испытаниям образец находится между этими опорами, нагрузка при этом равномерно увеличивается при постоянной скорости. На рисунке 2.13 (в) изображен внешний вид этой насадки во время проведения эксперимента.

Прогибы измеряют с погрешностью не более 0,1 мм индикатором часового типа ИЧ-10. В ходе эксперимента замечают вид разрушения – отслоение наполнителя или разрушение обшивок.

По результатам измерений строится график зависимости прогиба материала от нагрузки.

Определение прочности при изгибе изучаемого материала проводится

согласно ГОСТ 4648-2014 [45]. Испытуемый материал должен иметь форму прямоугольного сечения с рекомендуемыми размерами в длину 80 ± 2 мм, ширину $30 \pm 0,5$ мм и толщину – 10 мм. Перед испытанием исследуемый материал измеряют и вычисляют среднеарифметическое значение ширины образца с погрешностью до 0,1 мм, толщину с погрешностью 0,01 мм. Расстояние между опорами рассчитывают соотношением: $L = (16 \pm 1) h_{\text{ср}}$, где $h_{\text{ср}}$ – средняя толщина испытуемого образца, мм. Рекомендуемая скорость испытания 2 мм/мин.

Изгибающее напряжение $\sigma_{\text{и}}$ при максимальной разрушающей нагрузке F_p определяется из выражения:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{3 \cdot F_p \cdot L_v}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (2.7)$$

где F_p – разрушающее усилие, Н; L_v – расстояние между опорами, м; b , h – ширина и толщина образца соответственно, мм.

В ходе эксперимента измеряют прогибы при двух значениях нагрузки усилий $F_1 = (0,05-0,1) \times F_p$ и $F_2 = 0,2 F_p$. Отсчеты при выбранных значениях сил производят до получения стабильных показаний.

Модуль упругости определяется по диаграмме деформирования для нагрузок и прогибов, соответствующих значениям относительной деформации 0,1 % и 0,3 %.

Модуль упругости $E_{\text{и}}$ вычисляется по формуле:

$$E_{\text{и}} = \frac{(F_2 - F_1) \cdot L_v^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot (f_2 - f_1)}, \quad (2.8)$$

где $F_1 = (0,05-0,1) \times F_p$ и $F_2 = 0,2 F_p$ – усилия при нагружении образца, Н; f_1 , f_2 – прогибы, соответствующие нагрузкам F_1 и F_2 , мм; L_v – расстояние между опорами, м; b , h – ширина и толщина образца соответственно, мм.

За результат измерения пределов прочности и модуля упругости при изгибе принимают среднеарифметическое значение для всех образцов.

Испытания на стойкость к истиранию поверхности стенового материала проводятся по ГОСТ 11012-69 [35]. Метод заключается в подготовке образца, который включает определение плотности с точностью 0,01 г/см³, притирку к

поверхности шкурки (до появления следа износа на всей исследуемой поверхности образца) и взвешивание опытного образца с точностью 0,01 г [35]. Далее при помощи шлифующей машины проводят истирание с прилагаемой нагрузкой 19,62 Н на определенном пути. Путь истирания образца и эталона должен быть кратным целому числу оборотов цилиндра и составлять не менее 10 м [35].

Длину пути истирания L , (м) вычисляют по формуле:

$$L=n \cdot l, \quad (2.9)$$

где n – число оборотов цилиндра машины за время испытания, l – длина пути истирания за один оборот цилиндра, определенная с учетом перенесения образца через планку, прикрепляющую шкурку, м.

Испытуемый образец квадратного сечения должен иметь размеры $10 \times 10 \pm 0,4$ мм, высоту 10 – 20 мм или цилиндрическую форму диаметром 10 мм высотой 10 – 20 мм. Образцы не должны иметь видимых невооруженным глазом дефектов, при этом имея гладкую ровную поверхность. После испытания испытуемый образец взвешивают с точностью 0,01 г [35], показателем истирания считается величина потери объема в мм^3 на 1 м пути и рассчитывается по формуле:

$$V_i = K \frac{m - m_1}{\rho L} 1000, \quad (2.10)$$

где K – коэффициент, показывающий истирающую способность шкурки (при показателе истирания $1,20 \pm 0,02 \text{ мм}^3/\text{м}$ шкурка считается эталонной, $K=1$); m – масса исследуемого образца до испытания, г; m_1 – масса исследуемого образца после испытания, г; ρ – плотность исследуемого образца, $\text{г}/\text{см}^3$; L – длина пути истирания, м.

Определение удельного сопротивления выдергиванию шурупов проводится с помощью multifunctionальной разрывной машины. Шурупы подбираются по ГОСТ 1145-80 [37]: исполнение 1 (стандартное исполнение шурупа, определенное в соответствии с требованиями соответствующего стандарта), диаметр 4 мм.

Определение удельного сопротивления выдергиванию шурупов

проводится по стандартной методике на опытных образцах, имеющих размеры $30 \times 30 \times 30 \pm 0,5$ мм. Нарезная часть заворачиваемых шурупов должна превышать толщину испытуемого образца не менее чем на 4 мм и должна выступать с обратной стороны не менее чем на 3 мм. Образец с предварительно закрученным шурупом устанавливается в захват испытательной машины так, чтобы ось шурупа совпадала с осью захвата для выдергивания. Полученные результаты вычисляют с точностью 0,1 Н/мм, рекомендуемая скорость испытания составляет 10 – 15 мм/мин. Величина удельного сопротивления рассчитывается по соотношению:

$$q_{уд} = \frac{F_{max}}{L}, \quad (2.11)$$

где F_{max} – наибольшая прилагаемая нагрузка, Н; L – длина вкрученной части шурупа, мм.

2.3.2.5 Методика исследования структуры, биостойкости, морозостойкости и горючести

Свойства исследуемого древесно-полимерного материала зависят от его макро- и микроструктуры, на формирование которых существенное влияние оказывает природа полимера, вид древесного сырья, массовая концентрация компонентов, технология формирования, условия и время отверждения.

Для изучения влияния разрежения на процесс формирования теплоизоляционного слоя подготавливаются серии опытных образцов, полученных при остаточном давлении от 10 до 100 кПа, с которыми проводят микроскопический анализ структуры опытных образцов и определяют зависимости влияния разрежения на эксплуатационные свойства теплоизоляционного слоя [107].

Биостойкостью называют способность материала противостоять изменениям структурных свойств и функциональных характеристик, вызванных деятельностью живых организмов. Изучение биостойкости композита проводится в таре (рис. 2.18) с предварительно подготовленным грунтом. При

его подготовке за основу был взят ГОСТ 9.060-75 [50].



Рисунок 2.18 – Исследование биостойкости материала

При исследовании биостойкости для точного соблюдения методики испытания взвешивание компонентов проводится на лабораторных электронных весах с погрешностью до 0,01 г.

Опытные образцы в виде пластинок прямоугольного формата предварительно взвешиваются, погружаются в заранее заготовленный грунт в горизонтальном положении на глубину 2 – 5 мм и выдерживаются в течение 120 суток. По окончании срока выдержки опытные образцы вынимают, очищают, помещают в сушильный шкаф и повторно взвешивают для определения потерянной массы.

Определение морозостойкости исследуемого объекта проводится в климатической камере при заданном числе циклов замораживание/оттаивание. Замораживание и оттаивание материала проводится в контейнерах климатической камеры (рис. 2.11). Температура среды в климатической камере устанавливается на отметке $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продолжительность заморозки одного цикла составляет 4 часа, оттаивание осуществляется в дистиллированной воде с температурой $22 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, поддерживаемой при помощи термостата до окончания оттаивания, продолжительность которого составляет 2 ч. После полного окончания циклов замораживание/оттаивание образцы высушиваются путем протирания сухой впитывающей тканью и взвешиваются. Оценку на наличие

возможных повреждений после окончания процесса замораживания/оттаивания проводят визуально, выявленные дефекты фиксируют и делают заключение о степени их соответствия требованиям, предъявляемым к изделию в зависимости от области применения. За результаты испытания принимается среднеарифметическое значение, допустимая погрешность расчетов не более 1 %.

Средний коэффициент теплового линейного расширения определяется в установленном интервале температур по ГОСТ 15173-70 [40]. Данный коэффициент характеризует изменение линейных размеров изучаемого изделия в заданных температурных интервалах. Опытные образцы должны быть: не менее 50 мм в длину, круглого ($d=10 \pm 0,5$ мм) или квадратного поперечного сечения (со стороной $7 \pm 0,5$ мм). Удлинение измеряется при помощи специального устройства, прикрепленного на торцы образца, который передает показания на индикатор. Относительная влажность воздуха $50 \pm 0,5$ %. Средний коэффициент линейного расширения рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad (2.12)$$

где l_0 – длина образца при температуре окружающего воздуха 23 ± 2 °С, мм; Δl – приращение длины в границах интервала температур, мм; Δt – приращение температуры от t_1 к t_2 (нижняя и верхняя граница интервала температур), °С.

Испытание опытного материала на огнестойкость выполняется на установке, предназначенной для исследования трудногорючих и горючих твердых неметаллических веществ и материалов в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89 [38]. Для проведения испытания используются образцы с размерами: длина 60 ± 1 мм, высота 150 ± 3 мм, ширина не более 15 мм. Изучаемый объект выдерживается в сушильном шкафу при температуре 60 ± 5 °С в течение суток, далее охлаждается до комнатной температуры. Испытуемый материал взвешивается с допустимой погрешностью не более $\pm 0,1$ г [38]. Перед испытанием поверхность реакционной камеры горения покрывается двойным слоем алюминиевой фольги, которая заменяется при прогорании либо загрязнении. Далее образец устанавливается в держателе и помещается в камеру горения. По истечении 300 с выключают горелку и выдерживают материал до

полного остывания. Испытуемый образец извлекается из камеры горения и взвешивается.

Во всех испытаниях, осуществляемых весовым методом, за значения потери массы испытуемых образцов принимают среднеарифметическую величину, рассчитанную с точностью до 1 %.

В данной главе предложена структура трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов, включающая конструкционный и декоративный поверхностные слои, а также внутренний слой, выполняющий функцию теплоизоляции. Рассмотрены свойства используемых компонентов и даны их характеристики. Предложены методики исследований и оборудования, направленные на изучение влагостойкости, теплопроводности, плотности, прочностных характеристик, а также структуры, биостойкости, морозостойкости и горючести материала.

Глава III АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ СЛОЁВ РАЗРАБОТАННОГО ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА

В данной главе проанализированы результаты проведенных исследований по изучению свойств трёхслойного древесно-полимерного композиционного материала. Проведены исследования воздействий различных технологических параметров на физико-механические, теплофизические и эксплуатационные характеристики ДПК. Полученные данные позволили выбрать оптимальный состав материала, обеспечивающий прочное взаимодействие слоёв и формирование стабильной структуры древесно-полимерной системы. Особое внимание уделено созданию прочных связей между полимером и древесными частицами, что позволило достичь лучшей адгезии и стабильности структуры. Помимо этого, представлены результаты исследований, направленные на определение и обоснование оптимального состава древесно-полимерного композита.

3.1 Анализ результатов исследований физико-механических свойств поверхностных и теплоизоляционного слоёв стенового материала

Исследования физико-механических свойств ДПК включают в себя анализ прочностных характеристик, в т.ч. по растяжению, сжатию и твердости. Это позволяет оценить, как материал реагирует на механические нагрузки и какие изменения происходят в его структуре при внешних воздействиях.

Важным этапом является анализ результатов исследований вспенивания теплоизоляционного слоя. Рассматриваются скорость вспенивания матрицы при различных остаточных давлениях и концентрации древесного наполнителя.

Анализ термомеханических свойств материала позволяет оценить его поведение при воздействии различных температурных режимов, выявляя термическую устойчивость и потенциал использования в разных климатических условиях.

Исследование внутренней структуры материала направлено на выявление

особенностей компонентов и их взаимодействие, которые играют ключевую роль в улучшении свойств материала в целом.

3.1.1 Анализ результатов исследований прочностных характеристик поверхностных слоёв стенового материала

Зависимости прочностных характеристик на растяжение и сжатие от концентрации древесного наполнителя в полимере (ПЭ) и породы древесины для поверхностных слоёв представлены на рисунке 3.1.

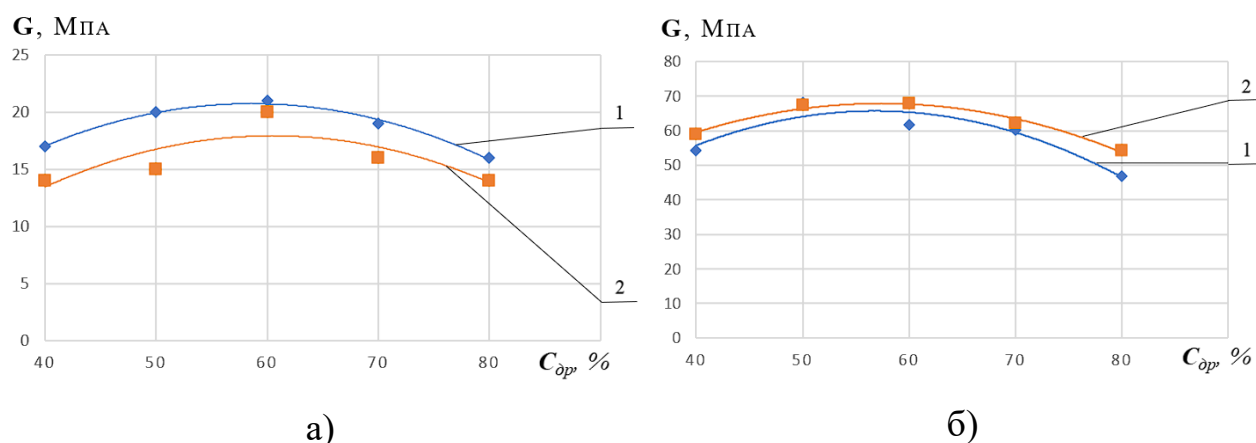


Рисунок 3.1 – Зависимость предела прочности на растяжение (а) и сжатие (б) от концентрации древесных частиц: 1 – хвойные породы; 2 – береза

Графическое представление данных позволяет оценить влияние концентрации древесного наполнителя и породы древесины в составе трёхслойного стенового материала на основе ДПК на его прочностные характеристики. Результаты демонстрируют, что выбор породы древесины оказывает существенное влияние на характеристики прочности стенового материала.

Обнаружено, что при испытании образцов на растяжение образцы с древесными частицами из хвойных пород древесины демонстрируют более высокие прочностные показатели по сравнению с образцами из древесных частиц березы в среднем на 19 %. При испытании на сжатие образцы с частицами из древесины березы показали повышение прочности в среднем на 7,8 %.

Результаты исследований прочности на сжатие конструкционного

поверхностного слоя представлены на рисунке 3.2.

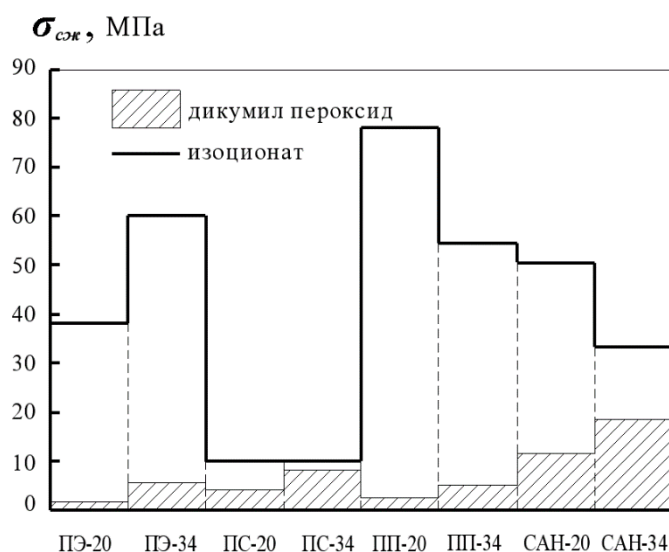


Рисунок 3.2 – Влияние видов полимеров и технологических добавок на адгезионные свойства конструкционного поверхностного слоя

Анализ данных показывает, что прочность внутреннего сцепления полимеров с изоцианатной смолой для всех видов полимеров выше по сравнению с дикумилпероксидом. Это указывает на то, что изоцианатная смола улучшает структурные свойства древесных частиц и уменьшает полярность поверхности. Поэтому в качестве технологической добавки нами выбран изоцианат. В то же время, при использовании в качестве связующего ПС-34 возможно добавление в качестве технологической добавки как изоцианата, так и дикумилпероксида.

Влияние видов полимеров и технологических добавок на модуль упругости и модуль разрыва представлены на рисунке 3.3.

При использовании дикумилпероксида в качестве технологической добавки, модули разрыва композитов выше для образцов на основе связующих ПЭ-20, САН-20, САН-34 (рис. 3.3а). В то же время следует отметить, что в большинстве остальных случаев модули разрыва образцов на основе изоцианатной смолы выше.

При исследовании композитов на модуль упругости (рис. 3.3б) с использованием дикумилпероксида максимальный результат наблюдался только

у двух образцов – ПЭ-34 % и ПС-34 %, во всех остальных случаях при использовании изоцианатной смолы в качестве технологической добавки модули упругости композитов выше.

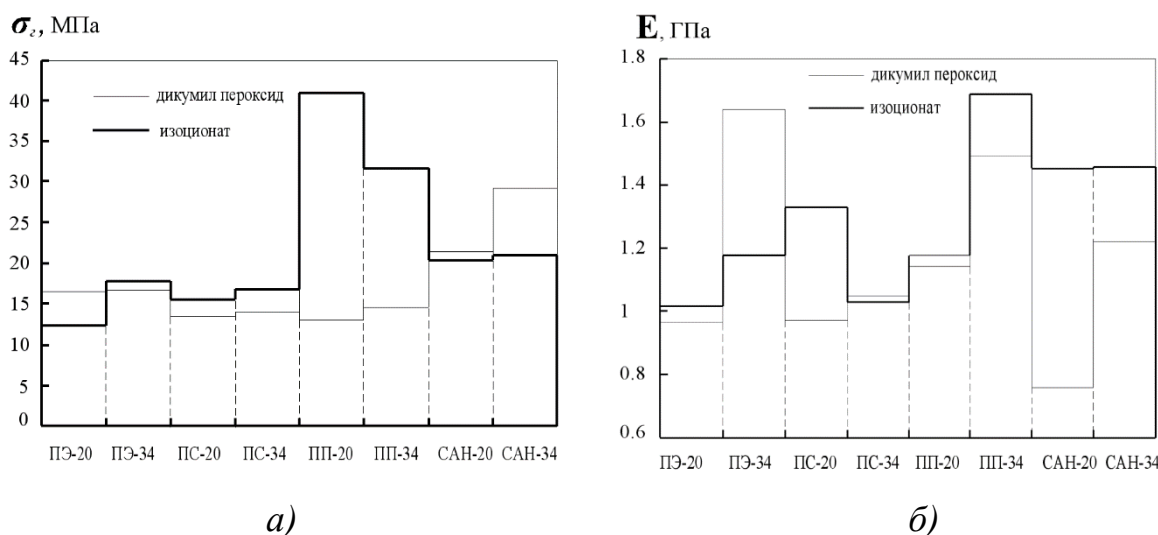


Рисунок 3.3 – Влияние видов полимеров и технологических добавок: а) на модуль разрыва; б) на модуль упругости ДПК

Наиболее распространённым термопластичным полимером по соотношению эксплуатационные качества/стоимость является полиэтилен. В дальнейших исследованиях при изучении свойств образцов преимущественно использовались хвойные породы, полиэтилен и изоцианат.

Для определения оптимального содержания изоцианата в конструкционном поверхностном слое были проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение его воздействия на качественные параметры композита (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Влияние модификатора на качественные свойства композита

Параметр	Количество изоцианата						
	0 %	4 %	5,5 %	7 %	8,5 %	10 %	14 %
Водопоглощение, %	4,8	4,6	4,4	3,9	3,8	3,7	3,7
Твердость, Н/мм ²	100	107	115,4	134,3	138	139,2	139
Истираемость, г/см ²	4	3,5	3	2,1	2,0	1,9	1,9
Предел прочности при растяжении, МПа	20,4	22,4	24,4	29	31	32,6	32
Предел прочности при изгибе, МПа	40,5	44,5	48,5	53,3	55	55	54,4
Удельное сопротивление выдергиванию шурупа, Н/мм	116	126	139	143,5	145	146	145,5

Как видно из вышепредставленных результатов, использование модификатора приводит к повышению прочностных и эксплуатационных показателей изделия по всем параметрам, что доказывает обоснованность его применения при изготовлении конструкционного поверхностного слоя из ДПК. Установлено, что использование изоцианата менее 7 % приводит к заметному ухудшению качественных характеристик изделий, а при использовании более 10 % отмечается незначительное улучшение качественных свойств материала и отрицательное влияние на экономические показатели производства. Рекомендуемое количество изоцианата в композите составляет 7 – 10 %, оно позволяет изготавливать высококачественный и эффективный с экономической точки зрения конструкционный поверхностный слой.

На рисунке 3.4 представлены зависимости твердости от концентрации древесного наполнителя и технологической добавки в поверхностных слоях трёхслойного стенового материала на основе ДПК.

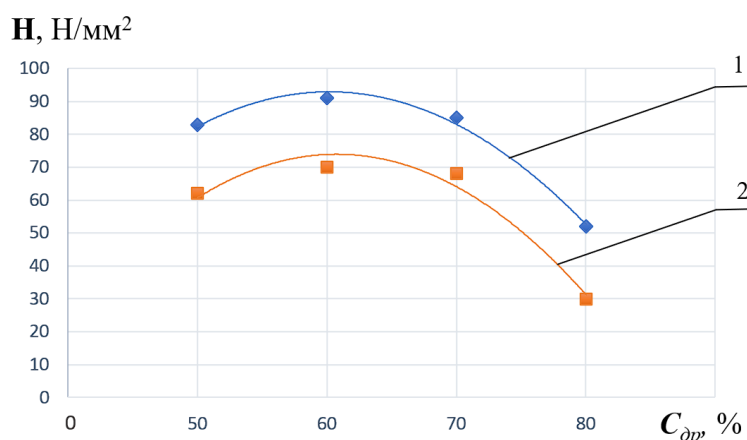


Рисунок 3.4 – Зависимость твёрдости поверхностных слоёв от концентрации древесного наполнителя и технологической добавки: 1 – древесные частицы, смешанные с изоцианатом (7 %); 2 – древесные частицы без изоцианата

Анализ представленных зависимостей показывает, что максимальная твёрдость ДПК наблюдается при концентрации древесных частиц в пределах 50 – 70 %; введение 7 % изоцианата дополнительно повышает твёрдость ДПК на 35,2 %.

Эти результаты указывают на потенциальное улучшение физико-механических свойств ДПК при добавлении изоцианата к древесным частицам.

Добавление изоцианата приводит к формированию дополнительных химических связей в матрице композита, что укрепляет его структуру и повышает твердость. Кроме того, оптимальная концентрация древесных частиц в материале способствует более равномерному распределению добавленного компонента, что усиливает его эффективность и приводит к максимальному улучшению свойств ДПК.

Для поверхностных слоев трёхслойного стенового материала на основе ДПК, обеспечивающих крепление изделия, не менее значимым является удельное сопротивление выдергиванию шурупов. Для оценки данного показателя был проведен ряд экспериментов, результаты которых отражены на рисунке 3.5.

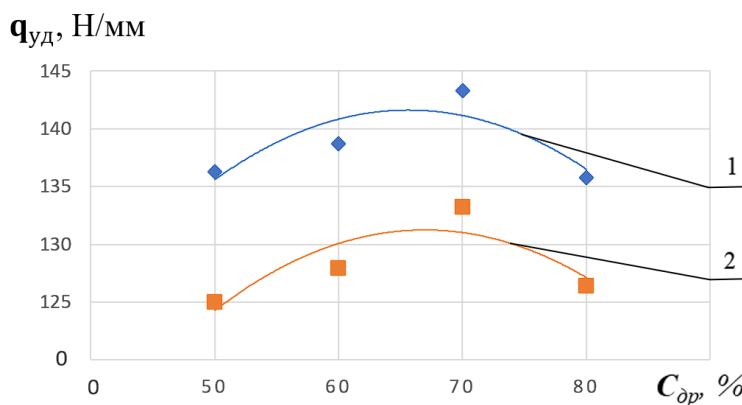


Рисунок 3.5 – Зависимость удельного сопротивления выдергиванию шурупа поверхностных слоёв трёхслойного материала от вида и концентрации наполнителя: 1 – древесные частицы с изоцианатом (7 %); 2 – древесные частицы без изоцианата

В результате проведенного анализа отмечается, что включение 7 % изоцианата в состав образцов привело к увеличению их удельного сопротивления выдергиванию шурупов примерно на 8,1 %.

Анализ полученных результатов исследований показывает, что наиболее оптимальное количество древесного наполнителя варьируется в диапазоне 60 – 70 %. Уменьшение количества наполнителя в композите ухудшает целевые показатели и приводит к удорожанию материала. Увеличение концентрации наполнителя более 70 % приводит к значительному ухудшению физико-механических характеристик изделия. Это происходит из-за уменьшения адгезии между наполнителем и полимерной матрицей ввиду малого содержания

связующего агента [76].

Древесно-полимерный композит применяется в основном вне помещений. С учётом климатических особенностей выбранного региона, было решено провести исследования, направленные на изучение устойчивости материала к низким температурам. Эффективность морозостойкости оценивалась путем измерения изменений твердости материала после проведения определенного числа циклов замораживание/оттаивание.

Рисунок 3.6 иллюстрирует зависимость твердости композита от количества циклов замораживание/оттаивание.

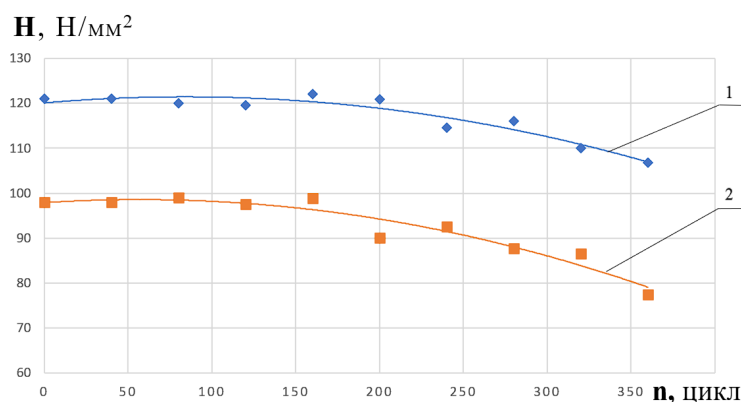


Рисунок 3.6 – Зависимость твердости поверхностных слоёв от количества циклов замораживание/оттаивание: 1 – на основе изоцианата; 2 – без добавления изоцианата

Исследования, проведенные для оценки морозостойкости поверхностных слоев, демонстрируют снижение твердости древесно-полимерного композита после 200 циклов замораживание/оттаивание в случае образцов с добавлением изоцианата и после 150 циклов для образцов без изоцианата. Полученные результаты предоставляют объективную оценку морозостойкости поверхностных слоев. Установлено, что образцы с изоцианатом в составе ДПК демонстрируют меньшие потери твердости, в среднем составляющие 10,59 % в сравнении с композитами без изоцианата, у которых этот показатель в среднем составил 16,18 %.

После завершения циклов замораживание/оттаивание визуальный осмотр образцов выявил лишь незначительные дефекты, степень которых соответствует

установленным требованиям, зависящим от области применения изделия. Следует отметить, что трёхслойная структура материала не разрушилась, что объясняется высокой адгезией древесно-полимерного композита с пенополиуретаном. Также важно отметить, что способность теплоизоляционного слоя подвергаться небольшим деформациям без изменений своих эксплуатационных свойств способствовало сохранению структуры трёхслойного стенового материала при многочисленных циклах замораживания и оттаивания.

На рисунке 3.7 представлены зависимости пределов прочности на сжатие и изгиб конструкционного поверхностного и теплоизоляционного слоёв от температуры.

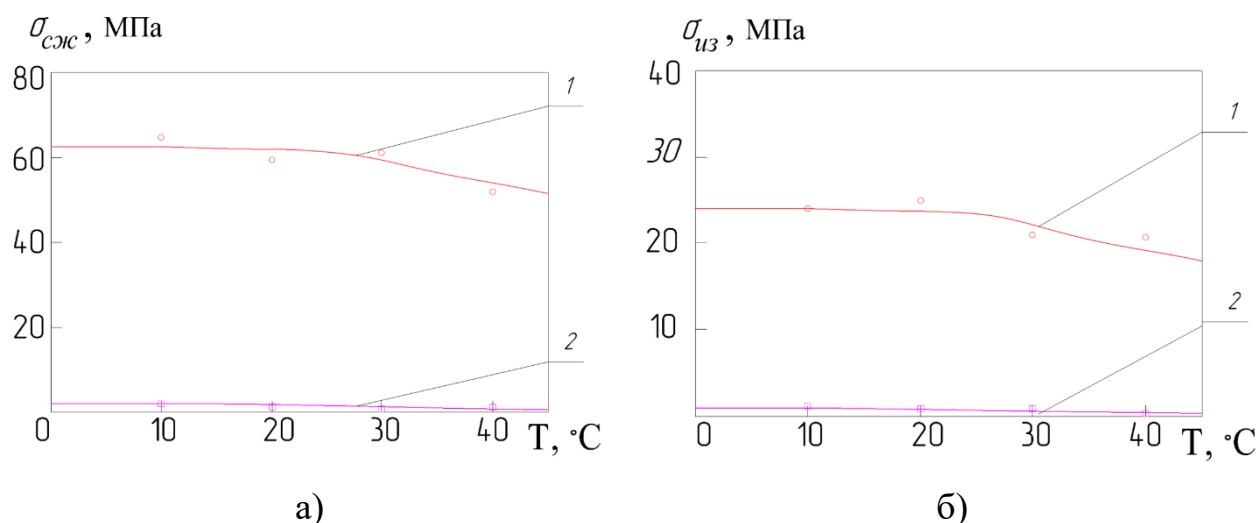


Рисунок 3.7 – Зависимость предела прочности на сжатие (а) и изгиб (б) от температуры: 1 – конструкционный поверхностный слой; 2 – теплоизоляционный слой

С повышением температуры образца конструкционного поверхностного слоя прочность на сжатие (рис. 3.7а) снижается с 62,17 до 53,70 МПа.

Обработкой экспериментальных данных получено математическое описание зависимости предела прочности на сжатие конструкционного поверхностного слоя от температуры:

$$\sigma_{сж1} = 62,06 + 0,166T - 0,008675T^2. \quad (3.1)$$

Уравнение позволяет оценить изменение прочности материала на сжатие в зависимости от температуры испытания, что имеет важное значение для анализа

его поведения в различных условиях эксплуатации.

Из анализа зависимости предела прочности на сжатие теплоизоляционного слоя (рис. 3.7а) видно, что при увеличении температуры также происходит постепенное снижение предела прочности.

С повышением температуры пористая структура пенополиуретана изменяется: начинают происходить процессы деформации и разрушения связей между частицами материала.

Имея хорошие механические свойства, ДПК под действием тепла теряет свою прочность из-за изменений в структуре и ухудшения адгезии между древесными частицами и пенополиуретаном.

Обработкой экспериментальных данных получена аппроксимационная зависимость предела прочности на сжатие теплоизоляционного слоя от температуры:

$$\sigma_{сж2}=1,96-0,01493T-0,00004267T^2. \quad (3.2)$$

Расхождение расчётных и экспериментальных данных не превысило 5 %.

Анализ зависимости предела прочности на изгиб конструкционного поверхностного слоя (рис. 3.7б) также демонстрирует снижение прочности вследствие повышения температуры.

При повышении температуры с 10 °С до 40 °С предел прочности на изгиб конструкционного поверхностного слоя снизился с 23,87 до 18,15 МПа, т.е. на 38 %.

Аппроксимацией экспериментальных данных получена зависимость предела прочности на изгиб конструкционного поверхностного слоя:

$$\sigma_{из1}=24,02+0,094T-0,005475T^2. \quad (3.3)$$

Это уравнение описывает тенденцию снижения прочности материала на изгиб при повышении температуры, связанную с изменением его структуры из-за тепловых процессов и внутренних изменений.

Анализ полученных данных (рис. 3.7б) показывает уменьшение предела прочности на изгиб в теплоизоляционном слое при повышении температуры.

Обработкой экспериментальных данных получена зависимость прочности теплоизоляционного слоя на сжатие при изменении температуры:

$$\sigma_{из2}=0,91-0,0264267T-0,0000125867T^2, \quad (3.4)$$

где $\sigma_{из2}$ – прочность теплоизоляционного слоя на сжатие, МПа.

У термопластичных полимеров молекулы имеют свободное движение. При повышении температуры они начинают более активно колебаться, что приводит к уменьшению прочности материала. Это связано с увеличением энергии молекул и снижением их устойчивости к воздействию на сжатие и изгиб.

Древесные частицы при увеличении температуры изменяют свою структуру, что влияет на взаимодействие с полимером. Это приводит к уменьшению способности материала выдерживать нагрузки на сжатие.

Кроме того, термическое расширение материалов при повышении температуры может вызвать внутренние напряжения в структуре, вносящие свой вклад в снижение прочности на сжатие и изгиб.

3.1.2 Анализ результатов исследований вспенивания теплоизоляционного слоя стенового материала

Один из важных параметров производства трёхслойного материала для теплоизоляционного слоя – скорость вспенивания. В процессе исследований была определена зависимость скорости вспенивания матрицы от концентрации древесных частиц при различных остаточных давлениях среды (рис. 3.8).

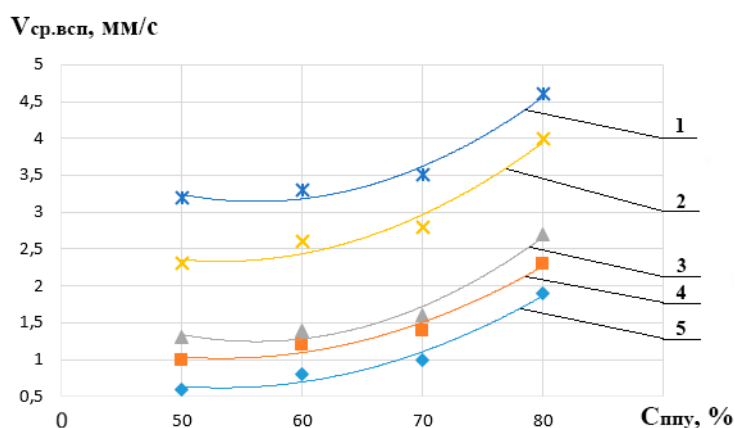


Рисунок 3.8 – Зависимость скорости вспенивания пенополиуретановой матрицы от концентрации наполнителя и остаточного давления среды: 1 – 20 кПа; 2 – 40 кПа; 3 – 60 кПа; 4 – 80 кПа; 5 – 100 кПа

Из представленных данных видно, что снижение остаточного давления существенно ускоряет процесс вспенивания полимерной матрицы. Увеличение количества ППУ в материале приводит к ускорению процесса вспенивания. Этот эффект можно уменьшить за счёт формирования материала в более плотной среде.

Результаты исследований изменения твердости материала отражены на рисунке 3.9.

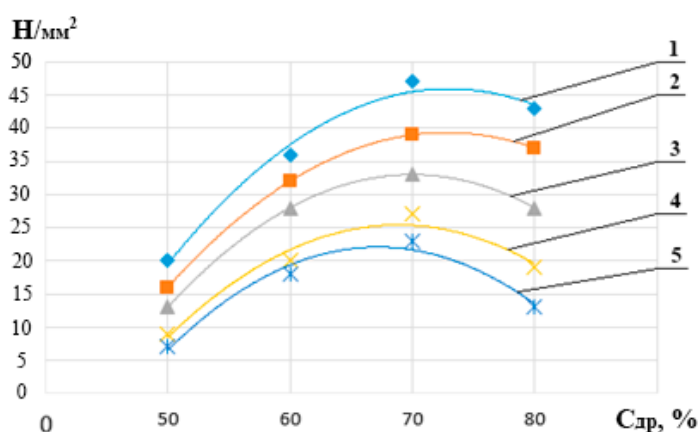


Рисунок 3.9 – Изменение твердости теплоизоляционного слоя в зависимости от концентрации наполнителя и остаточного давления среды: 1 – 60 кПа; 2 – 40 кПа; 3 – 100 кПа; 4 – 80 кПа; 5 – 20 кПа

Из анализа результатов можно сделать вывод о зависимости твердости от содержания древесных частиц. Увеличение концентрации наполнителя до 70 % приводит к повышению твердости образцов. Кроме того, установлено влияние остаточного давления в процессе формирования на твердость материала. Наилучшие показатели твердости достигаются при значениях остаточного давления в диапазоне 40 – 60 кПа.

На рисунке 3.10 приведены расчётные и экспериментальные зависимости удельного объема теплоизоляционного слоя от концентрации древесного наполнителя. Представленная зависимость иллюстрирует влияние концентрации древесного наполнителя на свойства нового трёхслойного стенового материала на основе ДПК через изменение его плотности.

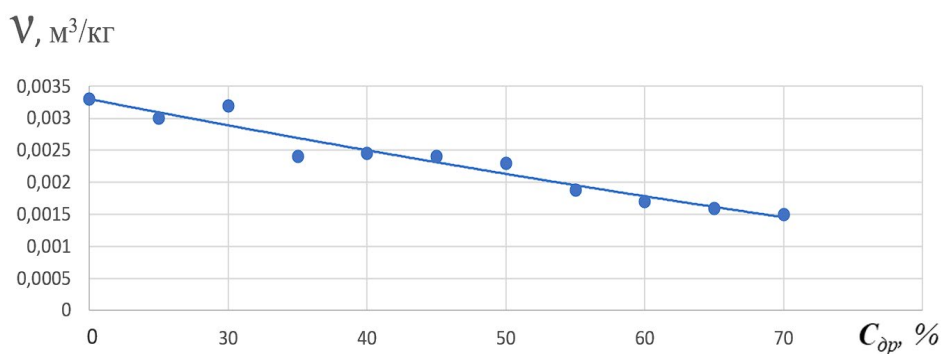


Рисунок 3.10 – Зависимость объёма материала от концентрации древесного наполнителя

Расчётные значения удельного объёма теплоизоляционного слоя от концентрации древесного наполнителя получены из соотношения:

$$\vartheta = \frac{C_{др}}{\rho_{др}} + \frac{1-C_{др}}{\rho_{пп}}. \quad (3.5)$$

Допустимое отклонение расчётных значений от экспериментальных не превысило 7 %.

По результатам исследования влияния объёма древесного наполнителя на общий объём теплоизоляционного слоя обнаружено сокращение объема пенополиуретана из-за уменьшения его индукции в результате наличия древесного наполнителя. Это явление объясняется тем, что у древесного наполнителя более высокая объемная плотность по сравнению с пенополиуретаном, и в начальной фазе реакции формирования газовой фазы происходит замедление процесса из-за давления, которое на пенополиуретан оказывает древесный наполнитель под воздействием силы тяжести.

На рисунке 3.11 представлена экспериментальная зависимость изменения высоты вспенивания пенополиуретана (ППУ) в процентном соотношении от концентраций компонентов А и Б.

Максимальная высота вспенивания ППУ достигается при соотношении 1,2:1 данных компонентов. Это оптимальное соотношение компонентов полиизоцианата и полиола выявлено при разработке стенового материала как наиболее эффективный параметр вспенивания.

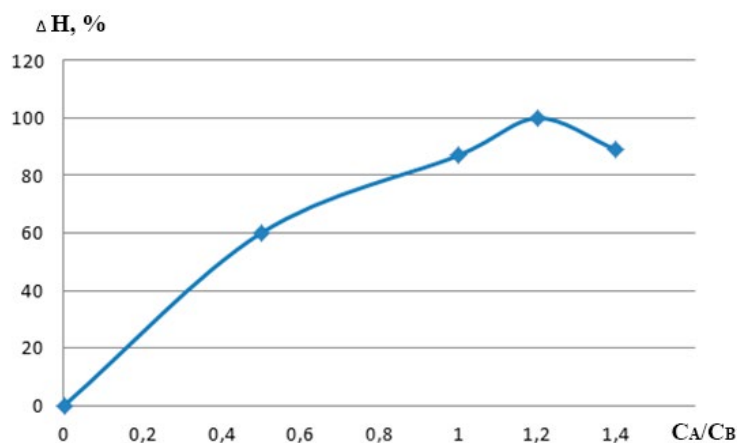


Рисунок 3.11 – Зависимость высоты вспенивания пенополиуретана от соотношения полиола и полиизоцианата

Рисунок 3.12 иллюстрирует зависимость времени вспенивания материала от температуры.

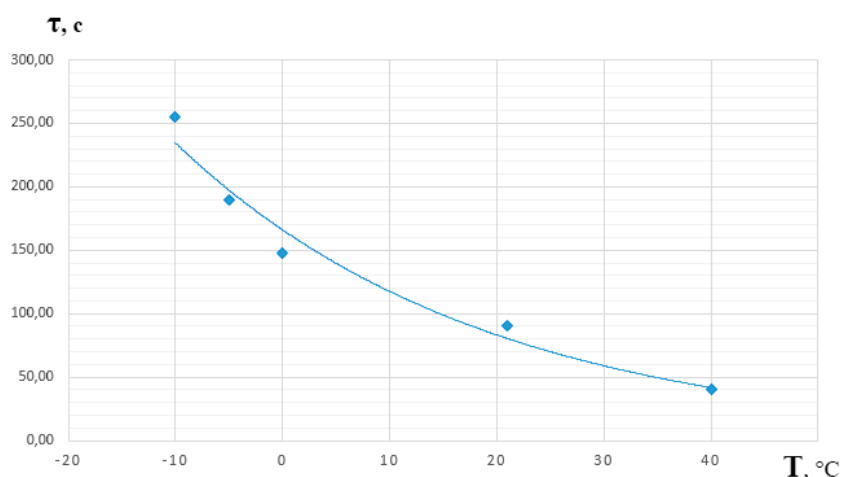


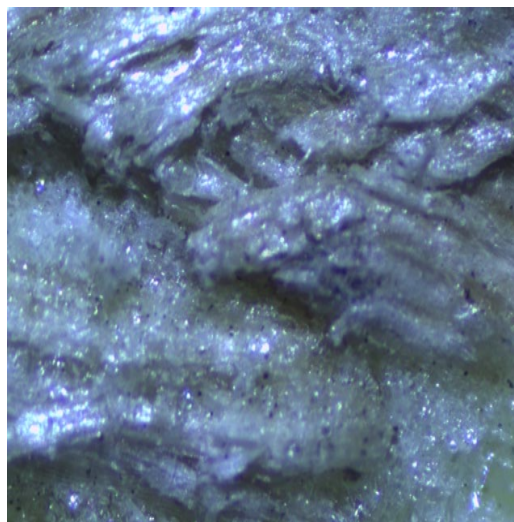
Рисунок 3.12 – Зависимость времени вспенивания материала от температуры компонентов

Анализ результатов исследования показал, что снижение температуры способствует увеличению времени полного вспенивания пенополиуретана, что считается благоприятным фактором при создании стеновых материалов. Из рисунка 3.12 наглядно видно, что при понижении температуры с нормальной до -10 °C время вспенивания увеличивается более чем в 3 раза.

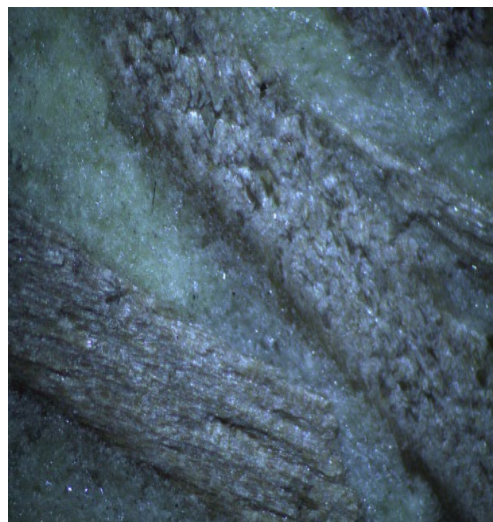
Была проведена визуальная микроскопическая оценка структуры теплоизоляционного слоя, сформированного при разных условиях – при разрежении и атмосферном давлении (рис. 3.14).

Согласно рисунку 3.14а можно заметить, что из-за более высокой плотности древесного наполнителя по сравнению с полимером произошло сжатие материала и разрушение структурных элементов, обусловленных наличием газовых пузырьков в экспериментальных образцах, полученных при

обычном атмосферном давлении. Структурная организация древесных частиц в полимерной матрице, сформированная в условиях разрежения, имеет заметные отличия.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Структурная организация теплоизоляционного слоя (увеличение 120): а) образованная при нормальном атмосферном давлении; б) образованная при разрежении до 30 кПа

На рисунке 3.14б демонстрируется структура теплоизоляционного материала, где пенополиуретан обволакивает каждую древесную частицу. Наполнитель равномерно распределен в полимерной матрице, так как газовые структурные элементы не подверглись деформации благодаря воздействию разрежения в процессе формирования экспериментальных образцов данного материала.

3.2 Анализ результатов исследований эксплуатационных свойств поверхностных и теплоизоляционных слоёв стенового материала

Для детального изучения эксплуатационных характеристик трёхслойного стенового материала на основе ДПК был осуществлен ряд экспериментальных исследований. Эти исследования включали анализ термостабильности, гидрофобности, устойчивости к разрушениям и изучение поведения материала

при разных температурах.

Эксперименты позволили получить данные о прочности, износостойкости, теплопроводности и других важных характеристиках стеновых материалов, определяющих производственные и конечные эксплуатационные свойства. Кроме того, эти исследования способствовали изучению воздействия внешних факторов на материал и методов улучшения его характеристик.

Полученные результаты исследований имеют важное значение для улучшения свойств материала.

3.2.1 Анализ результатов исследований гигроскопичности и износостойкости поверхностных и теплоизоляционного слоёв стенового материала

На рисунке 3.15 представлены зависимости водопоглощения (а) и истираемости (б) конструкционного поверхностного слоя в зависимости от технологической добавки и концентрации древесного наполнителя в образцах материала.

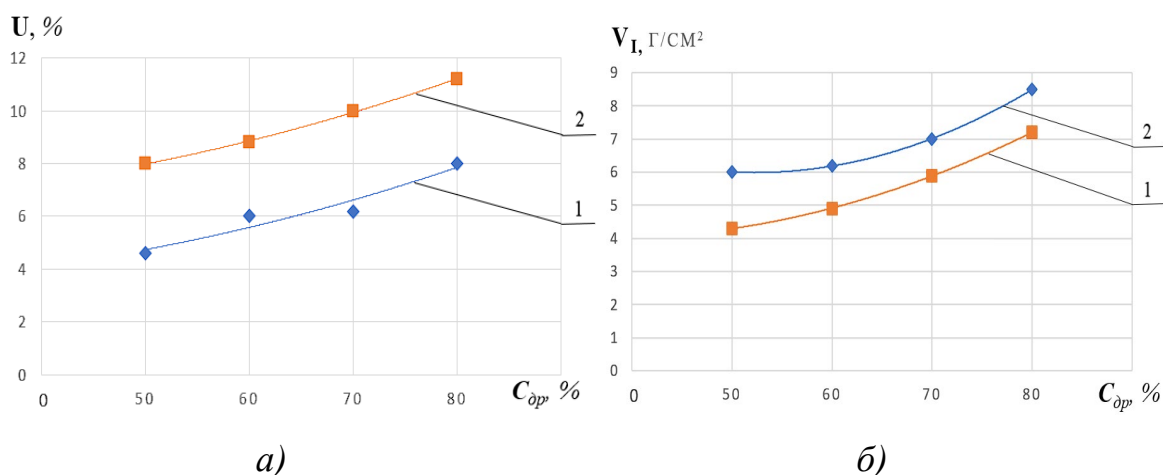


Рисунок 3.15 – Зависимости водопоглощения (а) и истираемости (б) от концентрации древесного наполнителя: 1 – древесные частицы с изоцианатом (7 %); 2 – древесные частицы без изоцианата

Представленные результаты указывают на то, что образцы, содержащие изоцианат, демонстрируют уменьшение водопоглощения на 36 % и

повышение устойчивости к износу на 20,5 %. Это обусловлено использованием технологической добавки в виде отверждающейся из-за воздействия влаги изоцианатной смолы. Воздействие влаги приводит к частичному отверждению изоцианата и образованию мелких, твердых, абразивных кристаллов. Этот процесс способствует улучшению эксплуатационных характеристик материала, что подтверждает его более высокую устойчивость к влаге и износу [97].

На рисунке 3.16 отражены результаты проведенных испытаний, направленных на оценку влагопоглощения материала. В ходе эксперимента использовались образцы с концентрацией древесных частиц 50 и 60 %, смешанных с изоцианатом.

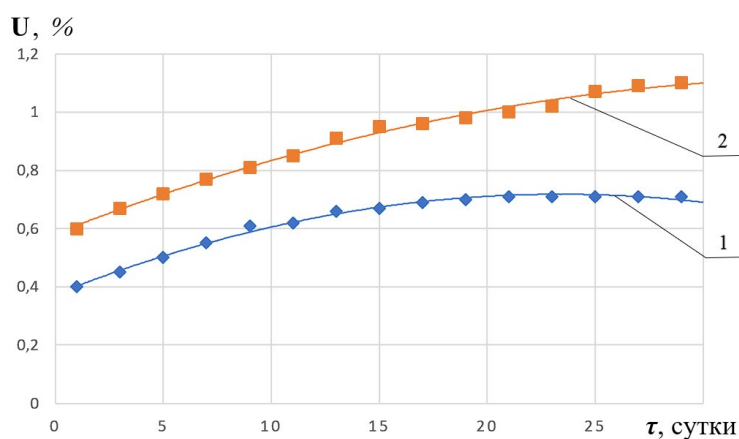


Рисунок 3.16 – Кинетика влагопоглощения образцов: 1 – на основе древесного наполнителя с концентрацией 50 %; 2 – на основе древесного наполнителя с концентрацией 60 %

Было установлено, что образцы с 60 %-ным содержанием древесного наполнителя поглощают больше влаги из окружающей среды, чем композиты с содержанием 50 % примерно на 32 %. Это объясняется тем, что при более низкой концентрации древесной массы полимерное связующее в совокупности с изоцианатом лучше обволакивает ее, предотвращая влагопоглощение.

Результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение водопоглощения, представлены на рисунке 3.17.

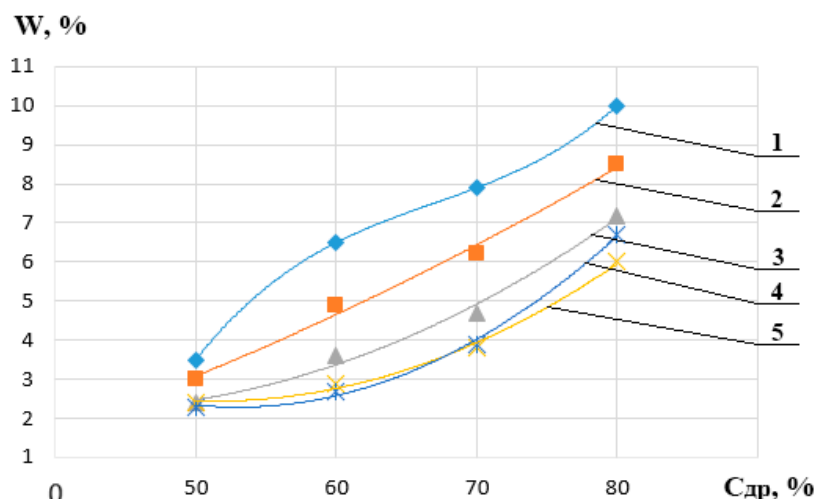


Рисунок 3.17 – Изменение водопоглощения теплоизоляционного слоя в зависимости от концентрации наполнителя при различном остаточном давлении среды: 1 – 20 кПа; 2 – 40 кПа; 3 – 60 кПа; 4 – 100 кПа; 5 – 80 кПа

Увеличение содержания древесных частиц в композите приводит к повышению уровня водопоглощения материала. Наиболее оптимальным считается диапазон концентрации древесного наполнителя от 60 % до 70 %, который обеспечивает умеренный коэффициент водопоглощения. При низком остаточном давлении показатель водопоглощения выше, так как теплоизоляционный слой приобретает более пористую структуру и меньшую плотность.

Проведенные исследования твердости и водопоглощения теплоизоляционного слоя отмечают схожие закономерности. Наличие остаточного давления при формировании материала оказывает положительное влияние на уменьшение водопоглощения образцов. Это связано с формированием более плотного слоя на поверхности материала, вызванного увеличением остаточного давления. Воздушные поры сжимаются, образуя более плотную структуру, которая защищает образец от избыточного водопоглощения. Этот слой, в сочетании с древесными частицами, способствует увеличению твердости материала.

Влияние видов полимеров и технологических добавок на коэффициент набухания в процессе водопоглощения представлен на рисунке 3.18.

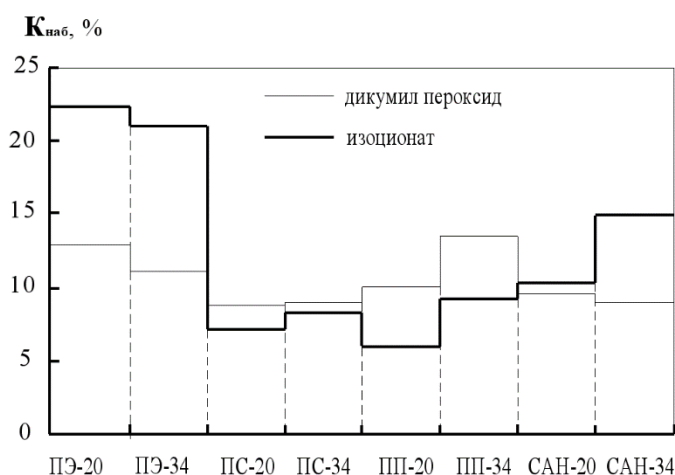


Рисунок 3.18 – Влияние видов полимеров и технологических добавок на коэффициент набухания

Анализ полученных результатов показывает, что наименьшим значением коэффициента набухания при водопоглощении обладают древесно-полимерные плиты с изоцианатом: образец ПС-20 – 0,7 %; образец ПП-20 – 0,6 %; образец ПС-34 – 0,8 %. Водопоглощение приводит к заметному снижению прочностных характеристик древесно-полимерной плиты. Изоцианат имеет почти нулевое влагопоглощение, является отличным изолятором от воды и пара. При введении технологической добавки в виде дикумилпероксида наименьшими показателями коэффициента набухания при водопоглощении обладали: образец ПЭ-34 – 1,1 % и образец САН-34 – 0,89 %.

Образцы композитов на основе древесных частиц и полистирола имеют низкий коэффициент набухания при водопоглощении. Это можно объяснить тем, что полистирол является достаточно стойким к действию влаги. Древесно-полимерные композиты на основе полиэтилена (ПЭ) хорошо реагировали с технологической добавкой, что уменьшало полярность древесных частиц, поэтому коэффициент набухания при водопоглощении был ниже.

Коэффициент набухания минимален для образцов с ПП-20 (изоцианат) и САН-34 (дикумилпероксид).

3.2.2 Анализ результатов исследований теплофизических свойств слоёв стенового материала

Зависимость коэффициента теплопроводности конструкционного

поверхностного слоя стенового материала от концентрации древесного наполнителя и технологической добавки представлена на рисунке 3.19.

Экспериментальные исследования, направленные на определение теплопроводности, выявили зависимость данного коэффициента от доли древесных частиц и введения технологической добавки. Полученные данные свидетельствуют о снижении теплопроводности материала при увеличении концентрации наполнителя, причем вид и расположение древесных частиц не оказали существенного влияния на изучаемый показатель.

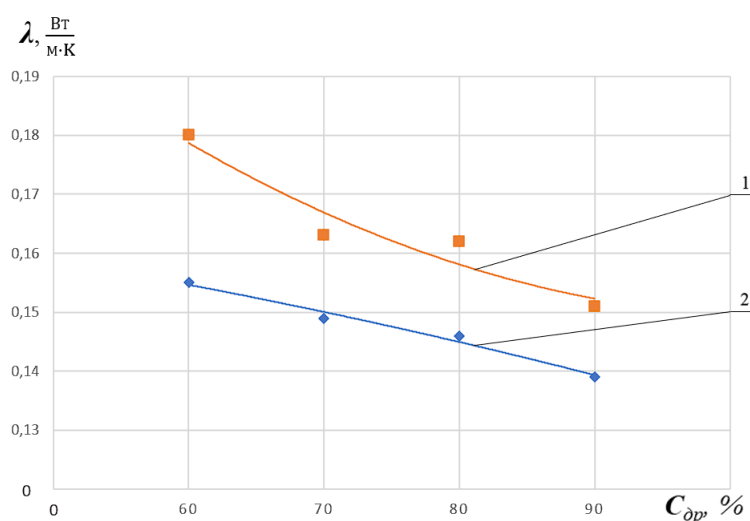


Рисунок 3.19 – Зависимость коэффициента теплопроводности конструкционного поверхностного слоя от концентрации древесного наполнителя: 1 – древесные частицы смешанные с изоцианатом (7 %); 2 – древесные частицы без изоцианата

Было установлено, что образцы, в которых в качестве технологической добавки использовался изоцианат, обладают средней теплопроводностью на 23,3 % ниже по сравнению с другими образцами.

На рисунке 3.20 представлена экспериментальная зависимость коэффициента теплопроводности образцов теплоизоляционного слоя от влажности материала.

Можно сделать вывод, что увеличение влажности в древесно-полимерном материале приводит почти к линейному увеличению его коэффициента теплопроводности до влажности 15 %.

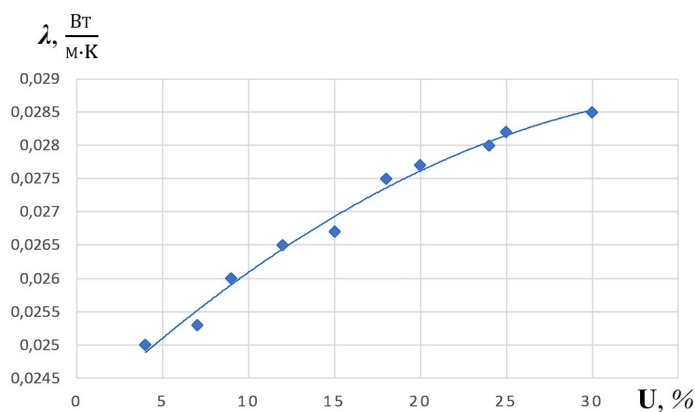


Рисунок 3.20 – Зависимость теплопроводности теплоизоляционного слоя от влажности

Установлено, что повышение влажности увеличивает теплопроводность материала, поскольку вода, заполняя поры, усиливает межмолекулярные взаимодействия, что способствует более эффективной передаче тепла. В условиях увеличенной влажности происходит проникновение влаги в структуру материала, что может привести к увеличению контактов между молекулами воды и матрицей полимера, вызывая повышение теплопроводности.

На рисунке 3.21 представлена экспериментальная зависимость теплопроводности конструкционного поверхностного и теплоизоляционного слоёв материала от изменения температуры.

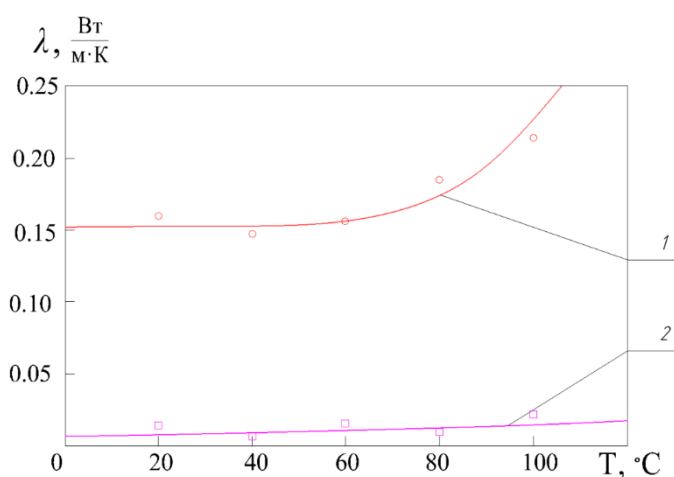


Рисунок 3.21 – Зависимость теплопроводности от температуры: 1 – для конструкционного поверхностного слоя; 2 – для теплоизоляционного слоя

Полученная зависимость демонстрирует, что с увеличением температуры

теплопроводность конструкционного поверхностного слоя материала повышается.

Одной из причин увеличения теплопроводности с повышением температуры является увеличение количества тепловых колебаний молекул материала. При возрастании температуры частицы начинают вибрировать с большей амплитудой, что способствует более эффективной передаче тепловой энергии между ними. Это приводит к повышению теплопроводности вещества.

Обработкой экспериментальных данных получена аппроксимационная зависимость изменения теплопроводности конструкционного поверхностного слоя материала в зависимости от температуры:

$$\lambda_1 = 0,1538 + 0,0000138095T + 0,00000037619T^2, \quad (3.6)$$

где λ_1 – теплопроводность конструкционного поверхностного слоя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$.

Исходя из представленных данных наблюдается линейное увеличение значений теплопроводности с увеличением температуры в теплоизоляционном слое, содержащем пенополиуретан и древесные частицы в отличие от конструкционного поверхностного слоя.

Пенополиуретан, известный своими теплоизоляционными свойствами, обладает малой плотностью, что способствует образованию микропористой структуры, которая снижает теплопроводность за счет воздушных карманов, замедляющих передачу тепла. Однако с повышением температуры уменьшается эффективность микропор, тем самым увеличивая теплотехнические характеристики.

Древесные частицы обладают большей проводимостью тепла по сравнению с пенополиуретаном, особенно при увеличении температуры, что приводит к общему увеличению теплопроводности слоя.

Путем анализа экспериментальных данных было установлено функциональное соотношение, описывающее изменение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного слоя материала в зависимости от температуры:

$$\lambda_2 = 0,007 + 0,000057166T + 0,00000015833T^2, \quad (3.7)$$

где λ_2 – теплопроводность теплоизоляционного слоя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$.

Обработка результатов климатических испытаний образцов

теплоизоляционного слоя (рис. 3.22) позволила выявить изменение теплопроводности в зависимости от количества циклов замораживание/оттаивание.

С увеличением числа циклов замораживание/оттаивание отмечается повышение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного слоя.

Результаты испытаний образцов теплоизоляционного слоя, направленных на определение морозостойкости выявили, что до 100 циклов показатели оставались стабильными, после чего наблюдалось значительное увеличение коэффициента теплопроводности. Этот эффект обусловлен циклическим воздействием температуры и влаги, провоцирующим развитие деструктивных процессов в материале. Эти процессы способны удерживать влагу внутри материала, приводя к увеличению ее количества и, как следствие, ухудшению теплофизических характеристик.

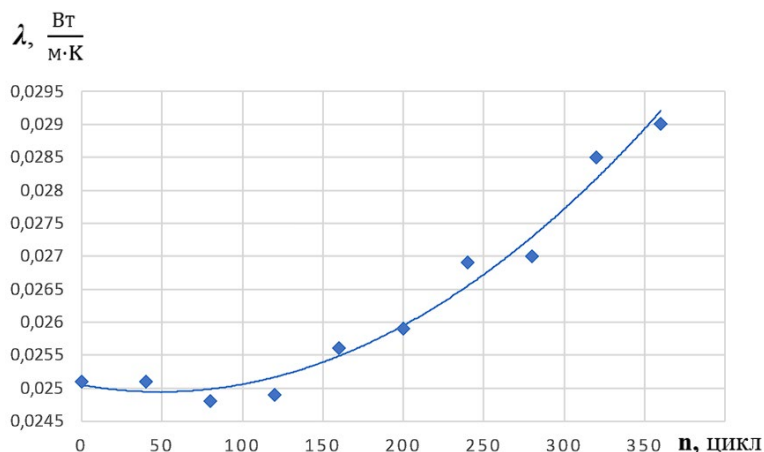


Рисунок 3.22 – Изменение теплопроводности теплоизоляционного слоя в зависимости от количества циклов замораживание/оттаивание

Испытания, проведенные до 360 циклов, позволили оценить изменение теплопроводности разработанного материала в условиях воздействия экстремальных температур и влажности.

3.2.3 Анализ результатов исследований огнестойкости поверхностных слоёв стенового материала

Были проведены исследования огнестойкости композитного материала,

которая определяет его безопасное применение в строительстве с учётом требований к пожарной безопасности. Целью исследования было выявление группы горючести и изучение поведения материала в условиях возгорания. При формировании образцов соотношение компонентов поверхностного слоя было следующим: 56 % древесных частиц, 35 % полиэтилена, 9 % технологических добавок в виде дикумилпероксида, либо изоцианата и технологического углерода. На рисунке 3.23 приведена кинетическая зависимость температуры выделяемых газов.

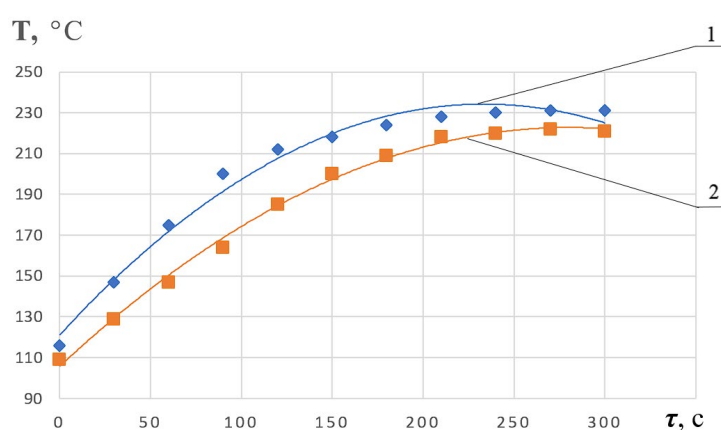


Рисунок 3.23 – Зависимость температуры выделяемого дыма от продолжительности горения: 1 – на основе образцов с дикумилпероксидом; 2 – на основе образцов с изоцианатом

В результате экспериментов было установлено, что испытуемый материал имеет группу горючести Г2 согласно стандарту ГОСТ 30244-94 [44], что соответствует средней воспламеняемости. В процессе испытаний наблюдалось, что образцы, изготовленные на основе изоцианата, требовали больше времени для достижения максимальной температуры по сравнению с образцами, содержащими дикумилпероксид. Образцы с дикумилпероксидом достигали максимальной температуры быстрее, однако оставались более гибкими и сохраняли свою целостность. После удаления воздействия открытого пламени образцы переставали гореть и быстро прекращали тление. Кроме того, количество выделяемого дыма во время горения материала было незначительным.

3.2.4 Анализ результатов исследований биологических свойств поверхностных слоёв стенового материала

Экспериментальные исследования биостойкости изделий показали их высокую устойчивость к разрушающему воздействию микроорганизмов [63, 117]. Образцы, сформированные на основе изоцианата, оказали большее сопротивление разрушающему воздействию микроорганизмов, чем образцы на основе дикумилпероксида и потеряли меньше в массе. Путем визуального анализа установлено отсутствие каких-либо повреждений поверхности испытуемых образцов, но наблюдалось незначительное изменение окраски и блеска материала. Выявлено, что тип применяемого полимера не влияет на исследуемый показатель. Образцы имели концентрацию древесного наполнителя 70 %. Результаты испытаний приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Влияние технологических добавок на стойкость к воздействию микроорганизмов

Технологическая добавка	Время испытания, суток	Потеря массы образца, %	Степень воздействия микроорганизмов в грунте
Изоцианат	120	3,4	стойки к воздействиям микроорганизмов
Дикумилпероксид	120	4,76	

Эксперименты показали, что разработанный композит обладает высокими эксплуатационными свойствами, что расширяет область его применения. В целях улучшения эксплуатационных характеристик был использован изоцианат в качестве модификатора. Применение данной добавки существенно улучшило свойства древесно-полимерного композита. Отмечается, что образцы, обработанные изоцианатом, показали более высокие результаты в тестах на биостойкость по сравнению с теми, где изоцианат не использовался.

Глава IV ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗРАБОТАННОГО ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНО- ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Глава посвящена описанию технологии производства трёхслойного древесно-полимерного композитного материала, включая опытно-промышленную линию производства, описание инженерной методики расчета, а также альтернативную технологию получения композитного материала из текстильных отходов и термопластичного полимера. Также представлено обоснование экономической эффективности внедрения технологического процесса производства трёхслойного древесно-полимерного композиционного материала.

4.1 Технология получения трёхслойного стенового материала

На рисунке 4.1 представлена технологическая схема получения трёхслойного стенового материала на основе ДПК.

На I-ой стадии производится сортировка древесных частиц на крупную, среднюю и мелкую фракции. Крупная фракция получается путём первичного измельчения древесных отходов в дефибраторе, после чего проводится дополнительная сортировка для отделения средних и мелких фракций. Средняя фракция подвергается дальнейшему доизмельчению до состояния древесных волокон требуемой длины.

Мелкая фракция подвергается дефибрированию для получения мелких древесных частиц волокнистого типа. Эти частицы подвергаются щелочной обработке. Таким образом каждая фракция формирует один из слоёв трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов (ТСМДПК):

- мелкая фракция для формирования конструкционного поверхностного слоя;

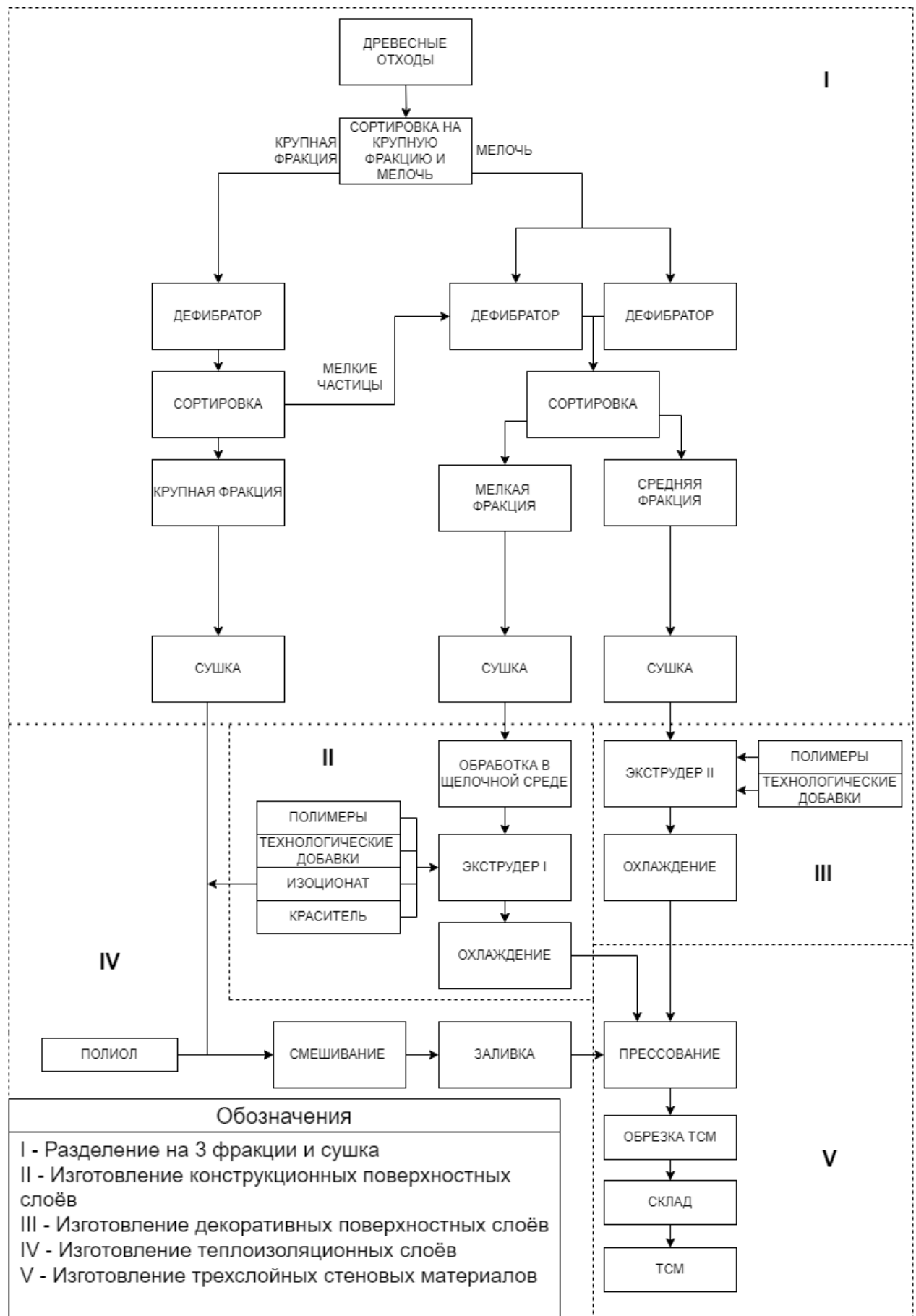


Рисунок 4.1 – Технологическая схема получения трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов

- средняя фракция для формирования декоративного поверхностного слоя;
- крупная фракция для формирования теплоизоляционного слоя.

На II-ой стадии производится смешивание мелкой фракции с термопластичным полимером, красителями и технологическими добавками, включая изоцианат, формируется конструкционный поверхностный слой, охлаждается и поступает в подпрессовочное устройство.

На III-ей стадии производится смешивание средней фракции с термопластичным полимером, красителями и технологическими добавками без изоцианата, формируется декоративный поверхностный слой, охлаждается и поступает в подпрессовочное устройство.

В результате добавления изоцианатной смолы в конструкционный поверхностный слой значительно повышается прочность, улучшаются структурные свойства древесного наполнителя и уменьшается полярность поверхности, улучшая при этом адгезию древесного наполнителя с термопластичным полимером.

На IV-ой стадии производится смешивание крупной фракции с изоцианатом и полиолом с последующей заливкой в подпрессовочное устройство.

На V-ой стадии формируется трёхслойный стеновой материал на основе древесно-полимерного композита путём подпрессования всех слоёв с последующей обрезкой до нужных размеров. После этого ТСМДПК отправляется на склад.

Конструкционный слой получается методом экструзии смеси термопластичного полимера с пределом текучести расплава от 4 до $12 \frac{\text{г}}{10 \text{ мин}}$ и температурой плавления до 200 °С [132]; с древесными частицами волокнистого типа размером от 1 до 2,5 мм, обработанными в щелочной среде; изоцианатом; технологической добавкой (связующим или огнезащитным агентами и т.п.); красителем в следующих пропорциях, мас. %: полимер 30 – 35; древесные частицы 54 – 56; изоцианат 7 – 10; технологическая добавка 2 – 3 (технический

углерод N330 или полиэтиленовый воск); краситель 1 – 2 (сополимер этиленвинилацетатный EVA). Декоративный поверхностный слой содержит термопластичный полимер с пределом текучести расплава от 4 до $12 \frac{\text{г}}{10 \text{ мин}}$ и температурой плавления до 200 °С, древесные частицы волокнистого типа размером от 2,5 до 10 мм и технологические добавки в следующих соотношениях, мас. %: полимер 20 – 26, древесные частицы 70 – 76, технологическая добавка 2 – 3 (технический углерод N330), краситель 1 – 2 (КА-2).

Теплоизоляционный слой заполнен полиолом с наполнителем из древесных частиц в виде древесных волокон размером от 10 до 15 мм с добавлением изоцианата в пропорциях, мас. %: полиол 10 – 12,5, древесные частицы 75 – 80, изоцианат 10 – 12,5 [85].

Соотношения компонентов для формирования поверхностных и теплоизоляционных слоев трёхслойного материала, а также его характеристики приведены в таблице 4.1.

Добавление смеси полиола, изоцианата и древесных частиц между поверхностными слоями обеспечивает создание прочной полимерной основы. Использование САН-пластика в конструкционном поверхностном слое позволяет получить высокие адгезионные свойства с древесным волокном, так как данный пластик обладает высокой механической прочностью и высокими адгезионными свойствами, обеспечивая прочное сцепление с любым наполнителем.

Использование дорогостоящих модификаторов (изоцианат и др.) только при формировании конструкционного поверхностного слоя позволяет снизить себестоимость изделия, при этом декоративный поверхностный слой имеет более простой состав. Обработка древесного наполнителя в горячей щелочной среде способствует изменению структурного строения частиц, что позволяет получить наполнитель с высокими прочностными характеристиками и добиться формирования качественного межфазного слоя между матрицей и наполнителем. Это значительно улучшает прочностные и эксплуатационные характеристики изделия.

Таблица 4.1 – Характеристики трёхслойного стенового материала на основе древесных частиц и термопластичных полимеров

№ примера		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Соотношение компонентов во внутреннем и в поверхностных слоях (мас. %)	декоративный	ПЭНД	26	23	20	26	23	20	26	23	20	26	23	20
		древесные частицы	70	73	76	70	73	76	70	73	76	70	73	76
		технологическая добавка	2	2,5	3	2	2,5	3	2	2,5	3	2	2,5	3
		краситель	2	1,5	1	2	1,5	1	2	1,5	1	2	1,5	1
		размер, мм	2,5	6,25	10	2,5	6,25	10	2,5	6,25	10	2,5	6,25	10
	конструкционный	ПЭНД	30	32,5	35									
		ПЭВД				30	32,5	35						
		полипропилен							30	32,5	35			
		САН-пластик										30	32,5	35
		изоцианат	10	8,5	7	10	8,5	7	10	8,5	7	10	8,5	7
	теплоизоляционный	технологическая добавка	2	2,5	3	2	2,5	3	2	2,5	3	2	2,5	3
		краситель	2	1,5	1	2	1,5	1	2	1,5	1	2	1,5	1
		размер, мм	1	1,75	2,5	1	1,75	2,5	1	1,75	2,5	1	1,75	2,5
		полиол	10	12,5	10	10	12,5	10	10	12,5	10	10	12,5	10
		изоцианат	10	12,5	10	10	12,5	10	10	12,5	10	10	12,5	10
		древесные частицы	80	75	80	75	80	75	80	75	80	75	80	75
		размер, мм	10	12,5	15	10	12,5	15	10	12,5	15	10	12,5	15
	Модуль разрыва, МПа		18,5	21	21,2	19	20,5	20	21,5	20	26,5	28	34,5	35
Модуль упругости, ГПа		1,11	1,17	1,19	1,10	1,12	1,12	1,03	1,05	1,04	1,12	1,15	1,18	
Предел прочности при сжатии, МПа		45,3	54,8	55,3	59,0	69,4	72,4	41,5	51,4	52,1	59,7	72,3	73,8	
Коэффициент расширения по толщине при влагопоглощении, %		22,5	21,5	20,3	21,9	22,7	22,5	15,7	13,1	12,5	6,5	6	6,3	

Разработанный трёхслойный древесно-полимерный композиционный материал на основе древесных частиц и термопластичных полимеров имеет широкий спектр применения. Он относится к области строительных материалов и может быть использовано в качестве конструкционных теплоизоляционных плит и панелей [33]. В частности, для теплоизоляции домов, строительства

промышленных зданий, спортивных сооружений, офисов и магазинов, при реконструкции зданий и сооружений в качестве дополнительной теплозащиты или укрепления несущих стен.

Данный материал обладает высокой прочностью и устойчивостью к воздействию влаги и других агрессивных сред, что делает его удобным для использования в условиях высокой влажности и воздействия окружающей среды. Полученные результаты исследований могут быть использованы для создания новых теплоизоляционных материалов с улучшенными свойствами.

4.2 Инженерная методика расчёта трёхслойного стенового материала

Объектом инженерного расчёта является трёхслойный теплоизоляционный материал, состоящий из конструкционного и декоративного поверхностных слоев, между которыми расположен теплоизоляционный слой, состоящий из пенополиуретана, смешанного с древесными частицами.

При взаимодействии ограждающей конструкции с внутренней и внешней средой здания происходит перенос теплоты за счет теплопроводности и разности температур на наружных и внутренних поверхностях. Тепловой поток, проходящий через ограждения, редко бывает постоянным, он почти всегда меняется во времени.

Для упрощения расчетов принимаем, что количество тепла, проходящее через ограждение, постоянно во времени, то есть рассматриваем стационарный тепловой поток [9].

Схема тепловых потоков для решения системы балансовых уравнений теплопереноса для установившегося режима представлена на рисунке 4.2.

Коэффициент теплоотдачи внутри сооружения определяется естественной конвекцией, а снаружи определяется погодными условиями – влажностью воздуха, скоростью ветра:

$$\alpha_2 = f(\varphi_2, W_2). \quad (4.1)$$

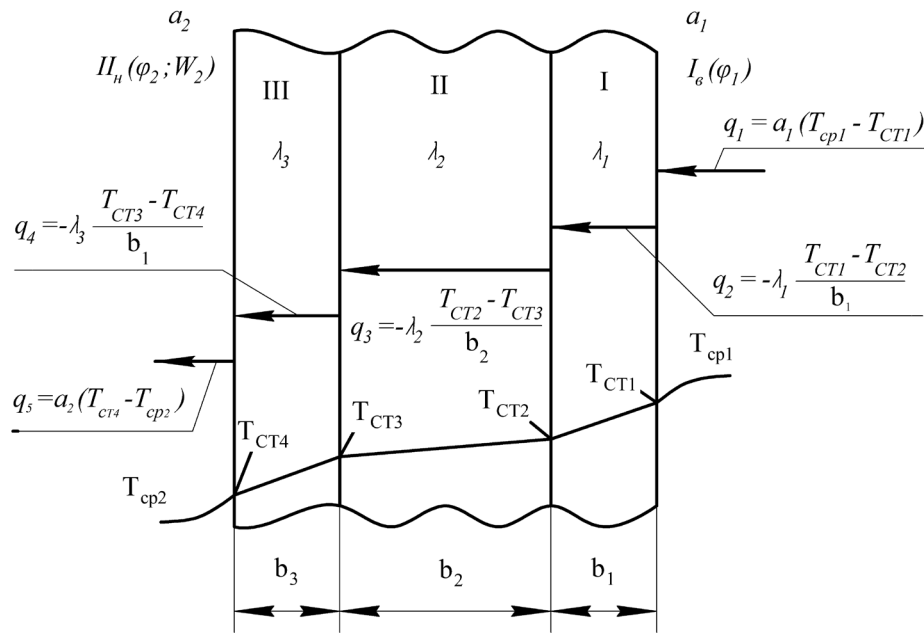


Рисунок 4.2 – Схема тепловых потоков через трёхслойный материал для стационарного процесса: I_e – среда внутри объекта; II_n – среда снаружи объекта; I – декоративный поверхностный слой; II – теплоизоляционный слой; III – конструкционный поверхностный слой; b_i – толщина i -го слоя, м; q_i – плотность i -го теплового потока, Вт/м²; φ_i – влажность i -ой среды, %; W_i – скорость i -го теплоносителя, м/с; α_i – коэффициент теплоотдачи i -ой среды, Вт/м²·К; T_{cti} – температура i -ой поверхности стенки, °С; T_{cp} – температура среды внутри и снаружи объекта °С; λ_i – теплопроводность i -го слоя, Вт/м·К

Коэффициенты теплопроводности слоёв древесно-полимерного композиционного материала зависят при выбранной концентрации древесных частиц от температуры:

$$\lambda_i = \varphi_i(T). \quad (4.2)$$

Для коэффициента теплопроводности поверхностных слоёв древесно-полимерного композиционного материала обработкой экспериментальных данных получена зависимость (3.6).

Для коэффициента теплопроводности теплоизоляционного слоя древесно-полимерного композиционного материала получена экспериментальная зависимость в виде соотношения (3.8).

Для стационарного процесса удельный тепловой поток из одной среды в другую определяется выражением:

$$q = K(T_{cp1} - T_{cp2}) = K\Delta T, \quad (4.3)$$

где ΔT – максимальный перепад температуры для конкретного региона, °С;
 q – нормативный удельный поток теплопотерь для сооружений, Вт/м².

Коэффициент теплопередачи K представляет собой количественную расчётную величину, характеризующую сложный теплообмен. Он зависит от коэффициентов теплоотдачи, толщины слоёв, термического сопротивления стенок и выражается соотношением:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{b_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (4.4)$$

Совместным решением уравнений (4.3) и (4.4) получаем соотношение:

$$\frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{b_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (4.5)$$

Из выражения (4.5) можно найти толщину теплоизоляционного слоя:

$$b_2 = \lambda_2 \left(\frac{\Delta T}{q} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{b_1}{\lambda_1} - \frac{b_3}{\lambda_3} - \frac{1}{\alpha_2} \right). \quad (4.6)$$

Толщина поверхностных слоёв b_1 , b_3 определяется прочностными требованиями. При достижении равенства прочностных характеристик созданного трёхслойного древесно-полимерного материала с иным стандартным изделием схожего назначения, справедливо соотношение:

$$\sum n_i b_i \sigma_i = b \sigma, \quad (4.7)$$

где b_i , b – толщина i – го слоя и стандартного изделия, соответственно, мм; n_i – показатель прочности материала i -го слоя относительно стандартного изделия:

$$n_i = \frac{\sigma}{\sigma_i}, \quad (4.8)$$

где σ_i , σ – прочностные характеристики ($\sigma_{\text{раст}}$, $\sigma_{\text{изгиб}}$, $\sigma_{\text{сж}}$), соответственно, i -го слоя и стандартного изделия, Па.

Расчёт толщины b_1 берём в зависимости от прочностных характеристик:

$$b_1 = n_1 b. \quad (4.9)$$

Для разработанного трёхслойного материала соотношение (4.7) можно записать в виде:

$$n_1 b_1 \sigma_1 + n_2 b_2 \sigma_2 + n_3 b_3 \sigma_3 = b \sigma. \quad (4.10)$$

Толщина теплоизоляционного слоя в трёхслойном материале b_2 определяется условиями теплозащиты и соотношением (4.6), а толщина

декоративного поверхностного слоя b_1 определяется из априорной информации и зависит от выполняемых функций – декоративных, влагозащитных и т.д.

По результатам эксперимента σ_2 мала и ей можно пренебречь:

$$n_1 b_1 \sigma_1 + n_3 b_3 \sigma_3 = b \sigma. \quad (4.11)$$

Если декоративный поверхностный слой выполняет только эстетические функции, то толщина $b_3 = \varphi(n_3, \sigma_3, \lambda_3)$ и задаётся следующим соотношением:

$$b_3 = \frac{b \sigma - n_1 b_1 \sigma_1}{n_3 \sigma_3}. \quad (4.12)$$

Если конструкционный поверхностный слой заменяет ДСтП, то:

$$b = 18 \times 10^{-2} \text{ м},$$

$$\sigma_{\text{сж}} = 21 \times 10^6 \text{ Н/м}^2.$$

В этом случае при известных характеристиках заменяемого материала уравнение (4.12) записывается следующим соотношением:

$$b_3 = \frac{37,8 \times 10^5 - n_1 b_1 \sigma_1}{n_3 \sigma_3}. \quad (4.13)$$

В частном случае, когда поверхностные слои выполняются из одинакового материала, расчёт ведётся по соотношению:

$$b_3 = \frac{b \sigma}{2 n_3 \sigma_3}. \quad (4.14)$$

Толщина b_1 может задаваться толщиной b_3 соотношением:

$$b_1 = k b_3, \quad (4.15)$$

где k – модуль толщины декоративного поверхностного слоя.

В этом случае расчёт толщины b_3 ведётся по соотношению:

$$b_3 = \frac{b \sigma}{n_3 \sigma_3 + n_2 k \sigma_2}. \quad (4.16)$$

Совместное решение уравнений (4.12), (4.14), (4.16) с уравнением (4.6) позволяет рассчитать толщины слоёв разрабатываемого материала в соответствии с требуемыми условиями.

В частном случае при известной толщине декоративного поверхностного слоя b_1 совместным решением уравнений (4.6) и (4.12) получаем соотношение для расчёта толщины теплоизоляционного слоя:

$$b_2 = \lambda_2 \left(\frac{\Delta T}{q} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{b_1}{\lambda_1} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{b \sigma - n_1 \sigma_1 b_1}{\lambda_3 n_3 \sigma_3} \right). \quad (4.17)$$

В случае, когда толщина b_3 равна толщине b_1 , совместным решением уравнений (4.6) и (4.14) получаем выражение для нахождения толщины теплоизоляционного слоя в виде соотношения:

$$b_2 = \lambda_2 \left(\frac{\Delta T}{q} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{b\sigma}{2\lambda_1 n_3 \sigma_3} - \frac{b\sigma}{2\lambda_3 n_3 \sigma_3} \right). \quad (4.18)$$

Если толщина b_1 задаётся толщиной b_3 и соотношением (4.15), то совместным решением уравнений (4.6) и (4.16) получается расчётное выражение в виде:

$$b_2 = \lambda_2 \left(\frac{\Delta T}{q} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{k}{\lambda_1} - \frac{b\sigma}{(n_3 \sigma_3 + n_1 k \sigma_2)} - \frac{k b \sigma}{\lambda_3 (n_3 \sigma_3 + n_1 \sigma_1 k)} \right). \quad (4.19)$$

На рисунке 4.3 представлен алгоритм расчёта трёхслойного стенового материала.

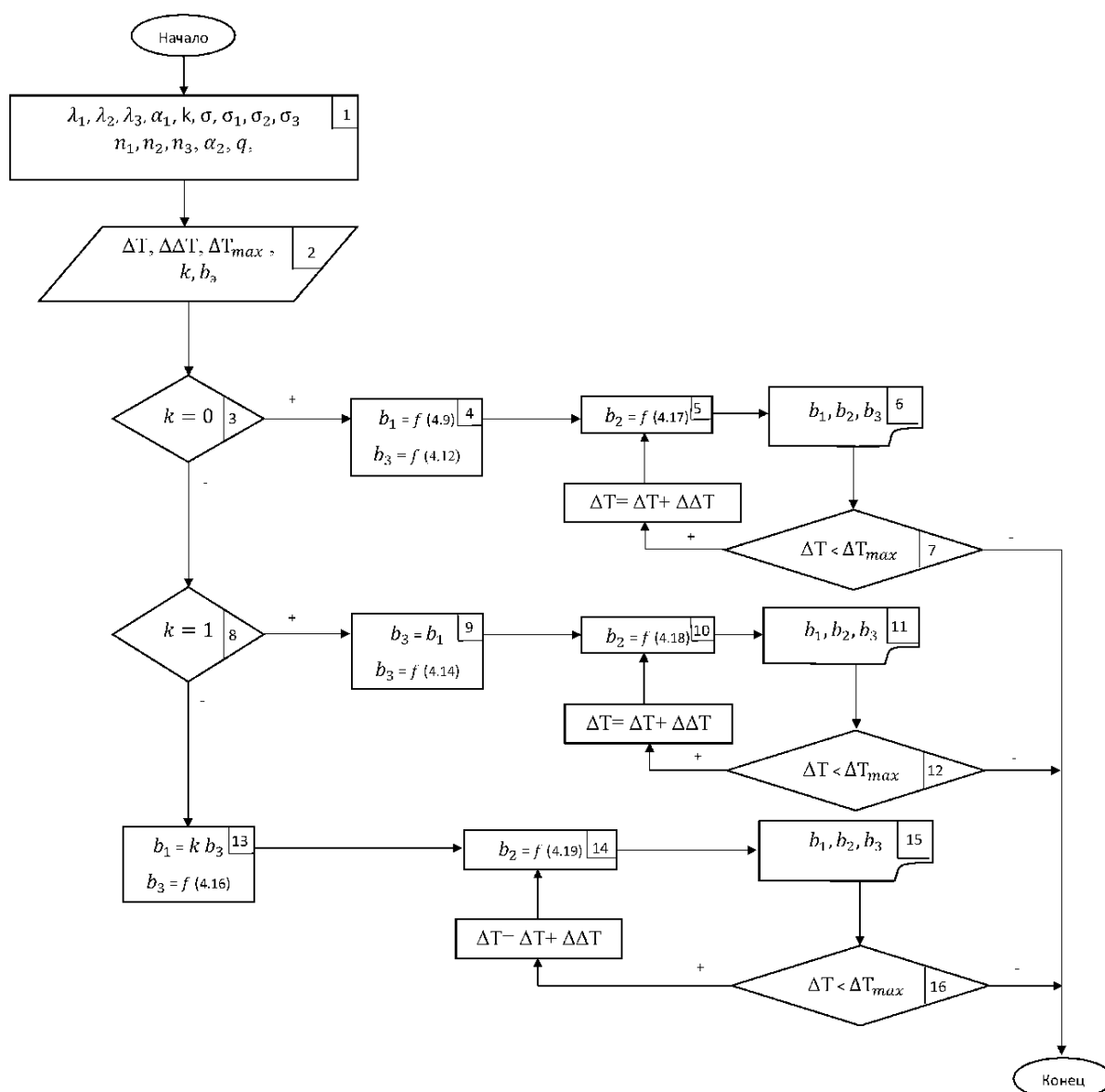


Рисунок 4.3 – Алгоритм расчёта толщины трёхслойного стенового материала

В блоке 1 задаются постоянные параметры; в блоке 2 задаются варьируемые параметры; в блоках 3, 8 и 13 задаются условия по модулю толщины декоративного поверхностного слоя.

Если $k = 0$, то расчёт ведётся в блоках 4,5,6 при условии, что задана толщина b_1 ; если $k = 1$, то расчёт ведётся при условии $b_3 = b_1$. Если эти условия не выполняются, то расчёт ведётся при условии $b_3 = kb_1$. После каждого блока выводится печать толщин слоёв трёхслойного стенового материала на основе ДПК.

В блоках 7, 12, 16 задаются условия окончания циклов расчета толщин слоёв трёхслойного стенового материала на основе ДПК по перепаду температуры.

На рисунке 4.4 схематично представлены условия по модулю толщин декоративного поверхностного слоя.

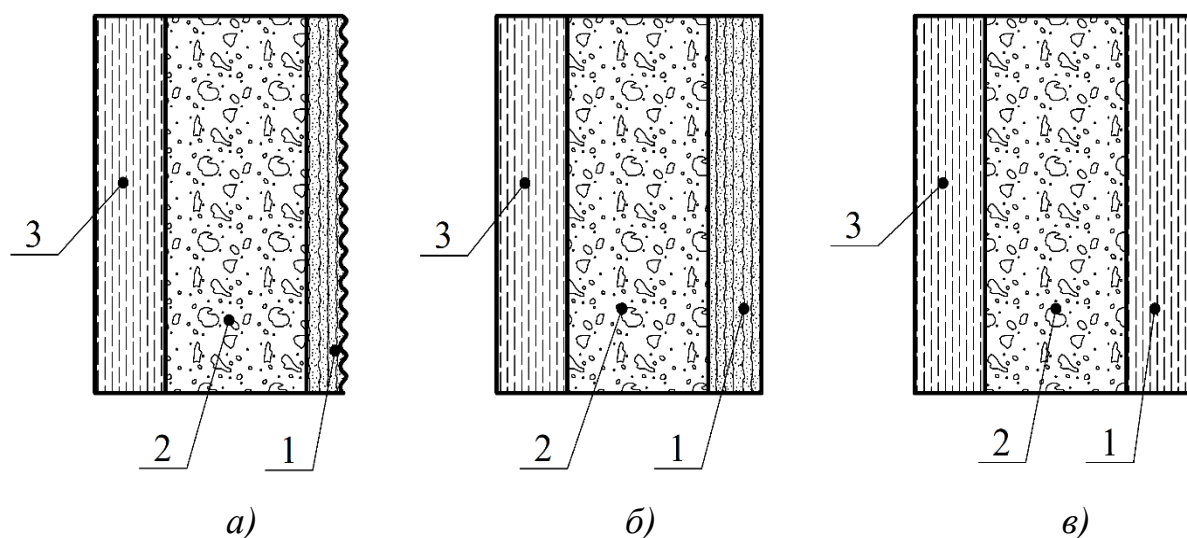


Рисунок 4.4 – Условия по модулю толщин декоративного поверхностного слоя: а) при известной толщине декоративного поверхностного слоя $b_1 = \frac{1}{2} b_3$ ($\sigma_1 = \sigma_3$); б) при модуле толщины конструктивного поверхностного слоя, равном $b_1 = 0,75 b_3$ ($\sigma_1 = \sigma_3$); в) при равенстве толщин поверхностных слоёв $b_1 = b_3$ ($\sigma_1 = \sigma_3$); (1 – декоративный поверхностный слой, 2 – теплоизоляционный слой, 3 – конструктивный поверхностный слой)

Перед проведением расчетов необходимо установить условия для анализа, поскольку толщина декоративного поверхностного слоя изменяется для каждого

заданного условия. Это влияет на общую теплопроводность и, соответственно, изменение толщины теплоизоляционного слоя зависит от установленных значений температурного градиента. Задаётся температурный градиент с интервалом в 10 °С в диапазоне от 0 – 50 °С.

На рисунке 4.5. приведен анализ зависимости толщины теплоизоляционного слоя стенового материала от перепада температур.

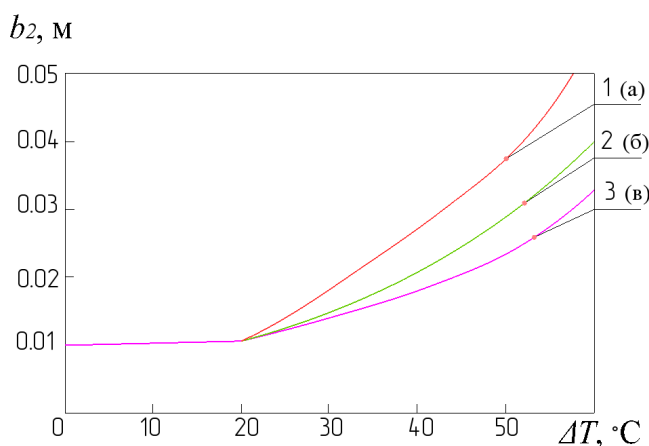


Рисунок 4.5 – Зависимости толщин теплоизоляционного слоя трёхслойного материала от величины перепада температур: 1 – при известной толщине декоративного поверхностного слоя $b_1 = \frac{1}{2} b_3$ ($\sigma_1 = \sigma_3$); 2 – при модуле толщины конструкционного поверхностного слоя $0,75 b_3$ ($\sigma_1 = \sigma_3$); 3 – при равенстве толщин поверхностных слоёв $b_1 = b_3$ ($\sigma_1 = \sigma_3$)

Анализ данных рисунка 4.5 показывает, что при увеличении перепада температуры до 20 °С изменение толщины теплоизоляционного слоя незаметно вследствие поддержания несущими поверхностными слоями достаточной теплоизоляции.

При ухудшении климатических условий $\Delta T > 20$ °С для всех моделируемых случаев отмечается заметное увеличение толщины теплоизоляционного слоя. Интенсивность увеличения теплоизоляционного слоя определяется заданными условиями b_1 и k .

Таким образом, анализ зависимостей позволяет рекомендовать оптимальные толщины слоев трёхслойного стенового материала на основе ДПК для различных климатических зон при заданных величинах b_1 и k .

4.3 Опытнo-промышленная линия производства трёхслойного стенового материала

Опытнo-промышленная линия производства нового трёхслойного стенового материала на основе ДПК из отходов деревообработки и пенополиуретана представлена на рисунке 4.6.

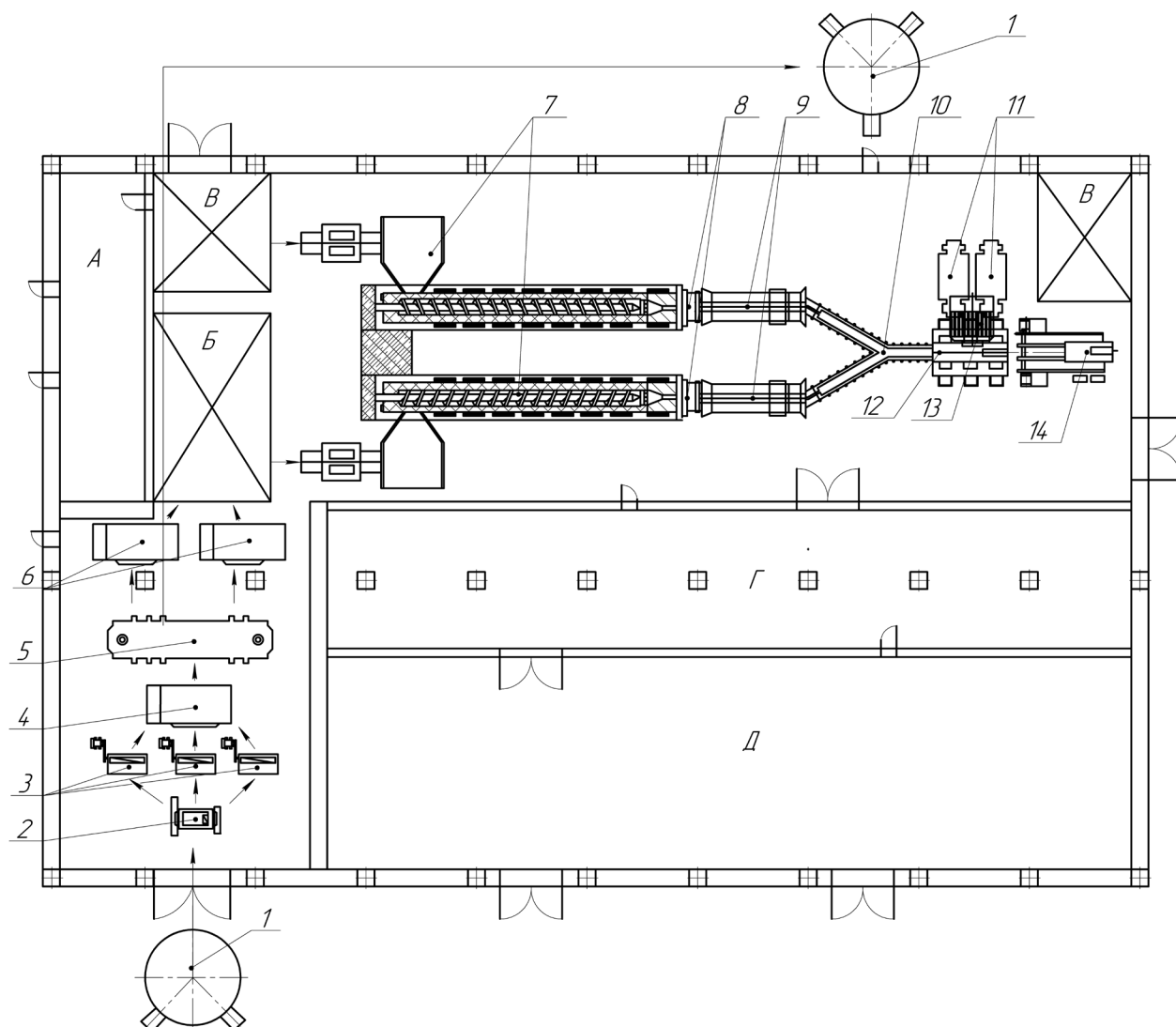


Рисунок 4.6 – Схема цеха по производству трёхслойных стеновых материалов на основе ДПК: 1 – вертикальный бункер; 2 – сортировщик щебы; 3 – дефибратор; 4 – ситовый сепаратор; 5 – барабанная сушилка; 6 – контейнеры для хранения сырья; 7 – экструдер; 8 – формовочная фильера; 9 – охлаждающая ванна; 10 – ленточный транспортер; 11 – смеситель; 12 – подпрессовочное устройство; 13 – заливочная головка; 14 – обрезающий станок; А – подсобное помещение; Б – участок подготовки сырья; В – склад хранения компонентов; Г – склад технологической выдержки; Д – склад готовой продукции

Процесс начинается с подачи древесных отходов из вертикального бункера 1 в сортировщик 2, где они разделяются на две фракции: крупная и мелочь. Крупная фракция направляется в дефибратор 3, а затем в ситовый сепаратор 4, откуда крупная фракция заданного размера попадает в барабанную сушилку 5, где высушивается и попадает в бункер 1 для хранения. Мелочь проходит через два дефибратора 3 для механического измельчения и получения древесных частиц волокнистого типа и далее в сортировщик 4 для разделения на среднюю и мелкую фракции заданного размера. В барабанной сушилке 5 древесные частицы высушиваются до номинальной влажности [80] и отправляются в контейнеры для временного хранения сырья 6.

На участке Б происходит подготовка компонентов перед экструдированием – обработка древесных частиц из мелкой фракции в щелочной среде. На участке В происходит хранение компонентов: технологических добавок, красителей, полиола и изоцианата.

Затем подготовленные компоненты смешиваются в двух экструдерах 7 для формирования конструкционного поверхностного слоя с древесными частицами мелкой фракции, полимером, изоцианатом, технологическими добавками и красителем, а также декоративного поверхностного слоя с древесными частицами средней фракции, полимером, технологическими добавками и красителем. Формовочная фильера 8 отвечает за придание материалу формы листа. После охлаждения в ванне 9 листы ДПК с помощью ленточного транспортера 10 перемещаются в подпрессовочное устройство 12 для уплотнения и получения при необходимости нужной рельефной структуры. В подпрессовочном устройстве полиол, изоцианат и древесные волокна из крупной фракции смешиваются в смесителе 11 и подаются в межлистовое пространство подпрессовочного устройства 12 с помощью заливочной головки 13. На последней стадии производится обрезка изделия до нужных размеров на обрезном станке 14. На участке технологической выдержки (В) происходит окончательное полимеризационное отверждение материала. Во время этого процесса происходят различные физические и

химические изменения, которые могут повлиять на качество и свойства изделия. Склад технологической выдержки позволяет установить оптимальные условия для процесса выдержки, такие как температура, влажность и длительность. Изделия на складе расположены в специальных контейнерах, чтобы обеспечить равномерное распределение тепла и воздуха. Склад готовой продукции (Г) служит для оперативной отгрузки трёхслойного стенового материала на основе ДПК [121].

В процессе производства предусмотрена система переработки и повторного использования вторичного сырья, что позволяет сократить количество отходов и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду [79].

Эффективное использование сырья, оптимизация производственных процессов и создание продукции с высокими характеристиками способствуют снижению затрат и повышению конкурентоспособности продукции на рынке [50].

4.4 Обоснование экономической эффективности внедрения технологического процесса производства трёхслойного стенового материала

В разработке трёхслойных древесно-полимерных композиционных материалов использовались древесные отходы деревообрабатывающих и лесозаготовительных предприятий в качестве наполнителя, а связующими веществами выступали вторичные термопластичные полимеры. Для формирования теплоизоляционного слоя использовался полиол и изоцианат. Анализ экономической эффективности проведен в соответствии с методикой [61].

Основные показатели экономической эффективности внедрения данной технологии в производство представлены в таблице 4.2. Все экономические показатели, приведенные в данной таблице рассчитаны в приложении В.

Оценка целесообразности производства разработанного трёхслойного

стенового материала основана на комплексном анализе эксплуатационных свойств и экономической обоснованности стоимости продукции. Решающим фактором при выборе продукта становится его более низкая стоимость, достигаемая за счет использования вторичного полиэтилена в качестве связующего агента и древесных отходов в роли наполнителя. Стоит отметить возможность добавления дорогостоящих модификаторов и красителей только в конструкционный поверхностный слой материала. Расчеты и анализ данных подтвердили обоснованность внедрения усовершенствованной технологии в промышленное производство.

Таблица 4.2 – Экономические показатели

Наименование параметра	Единица измерения	Трёхслойный стеновой материал на основе древесно-полимерных композитов
1. Годовой выпуск продукции		
- в стоимостном выражении	млн. руб.	26,9
- в натуральных ед.	м ²	3500
2. Капитальные затраты	млн. руб	11,11
3. Полная себестоимость единицы продукции	руб/м ²	5910
4. Оптовая цена единицы продукции	руб/м ²	7685
5. Чистая прибыль (годовая)	млн. руб	4,9
6. Рентабельность продукции	%	16,9
7. Срок окупаемости капитальных затрат	год	3,97

Выручка от реализации продукции, исключая НДС и акцизы, составит 26,9 млн. руб. Себестоимость реализованной продукции оценивается в 20,7 млн. руб.

Таким образом, основные экономические показатели отражают обоснованность внедрения производства трёхслойного стенового материала на основе ДПК в ООО НПО «Политехнологии» с увеличением годовой прибыли предприятия от переработки образующих отходов и производства нового продукта, что в денежном эквиваленте составит 4,9 млн. руб.

4.5 Технология получения трёхслойного стенового материала на основе ДПК из текстильных отходов

Кроме вышеприведенных исследований с древесными наполнителями,

были проведены испытания с наполнителями различного происхождения, которые также продемонстрировали положительные результаты. В частности, изучались текстильные отходы — коротковолокнистые материалы из шёлка, хлопка и льна. Эти материалы показали высокий потенциал для использования в качестве наполнителей в композиционных материалах на основе термопластичных полимеров.

На сегодняшний день на текстильных предприятиях Российской Федерации остается большое количество отходов, которые не перерабатываются, а переносятся в места захоронений, ухудшая, тем самым, экологию.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы не только для утилизации древесных отходов, но и прочих, в частности, текстильных.

По результатам проведенных исследований была испытана технология получения композиционного материала посредством переработки коротковолокнистых текстильных отходов с применением термопластичных полимеров в качестве связующего компонента [138].

Изготовление композиционного материала можно разделить на несколько этапов.

Первым этапом процесса являлось измельчение полимеров по разработанной технологии производства трёхслойного стенового материала.

Второй этап заключается в измельчении коротковолокнистых текстильных отходов в роторно-ножевом измельчителе. Для предварительного перемешивания компонентов и снижения энергозатрат на резание в измельчитель загружается ранее измельченный термопластичный полимер. Фракционирование измельченных текстильных отходов производится на виброситовой установке ANALYSETTE 3 PRO.

Третьим и заключительным этапом изготовления композиционного материала является смешение компонентов в смесителе и прессование поверхностных слоёв. Для прессования используется пресс марки АПВМ-901.

Прессование ведут при температуре 150 °С под давлением 8 МПа.

На четвертом этапе создаётся теплоизоляционный слой на основе текстильных отходов и полимеров.

Проведенные исследования позволили получить образцы композиционного материала, представленного на рисунке 4.7. В качестве наполнителя использовались текстильные отходы в виде шелковых тканей, волокна из хлопка и льна. В качестве связующего использован термопластичный полимер.



Рисунок 4.7 – Внешний вид термопластичного полимера, текстильных отходов и композиционного материала

Далее были исследованы эксплуатационные и прочностные характеристики полученных образцов композиционного материала.

Анализ полученного композиционного материала позволил установить, что оптимальное значение концентрации текстильных отходов в материале составляет 55 %. Данное значение обеспечивает высокие прочностные показатели и эксплуатационные свойства материала, что подтверждено исследованиями зависимости пределов прочности на сжатие и растяжение от концентрации наполнителя. Увеличение концентрации текстильных отходов требует более высоких давлений прессования, соответственно и энергозатрат,

при этом увеличивается плотность материала.

Увеличение плотности материала соответствует меньшему водопоглощению, поскольку плиты с высокой плотностью не имеют крупных пор, в которые может проникать вода за время пребывания образца в воде. В связи с этим композиционный материал целесообразно изготавливать трёхслойным, в котором внешние слои являются более плотными, а декоративный слой для снижения энергозатрат имеет наименьшую плотность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен аналитический обзор современных методов производства древесно-полимерных композиционных материалов (ДПКМ) и технологий переработки древесных отходов, который позволил разработать эффективные методики испытаний. Эти методики направлены на комплексную оценку механических, физических и химических свойств трёхслойного стенового материала, что позволяет выявить оптимальный состав компонентов каждого слоя, улучшая качество и конкурентоспособность конечного продукта.

2. Разработаны методики исследований, которые охватывают испытания на теплопроводность, прочностные характеристики, влагостойкость, атмосферную устойчивость, износостойкость, огнестойкость, биостойкость и морозостойкость. Это позволило определить физико-механические, теплофизические и эксплуатационные характеристики стенового материала в зависимости от содержания древесного наполнителя и полимерной матрицы.

3. Проведено комплексное исследование эксплуатационных и теплоизоляционных свойств трёхслойного стенового материала, что позволило определить оптимальный состав его слоёв. Структура материала включает:

- конструкционный поверхностный слой, состоящий из полимера (30 – 35 масс.%), древесных частиц волокнистого типа размером от 1 до 2,5 мм (54 – 56 масс.%), изоцианата (7 – 10 масс.%), технологической добавки – технический углерод N330 или полиэтиленовый воск (2 – 3 масс.%), красителя – сополимер этиленвинилацетатный EVA (1 – 2 масс.%);

- декоративный поверхностный слой, состоящий из полимера (20 – 26 масс.%), древесных частиц волокнистого типа размером от 2,5 до 10 мм (70 – 76 масс.%), технологической добавки – технический углерод N330 (2 – 3 масс.%), красителя – КА-2 (1 – 2 масс.%);

- теплоизоляционный слой между поверхностными слоями, состоящий из полиола (10 – 12,5 масс. %), древесных частиц в виде древесных волокон размером от 10 до 15 мм (75 – 80 масс.%), изоцианата (10 – 12,5 масс.%).

4. Разработана методика и алгоритм расчета трёхслойного стенового

материала, которая позволяет рекомендовать рациональные параметры изделий в зависимости от содержания древесного наполнителя и климатических условий предполагаемого применения материала. Методика использовалась для исследования и расчёта трёхслойного стенового материала, состоящего из конструкционного и декоративного поверхностных слоёв, между которыми расположен теплоизоляционный слой на основе пенополиуретана и древесных частиц.

5. Разработана опытно-промышленная линия производства трёхслойных стеновых материалов. Основные технико-экономические показатели подтверждают целесообразность внедрения производства трёхслойных стеновых материалов на основе ДПК, ожидаемый экономический эффект составляет 4,9 млн. руб/год.

Результаты исследований позволяют внедрить технологию производства трёхслойных стеновых материалов на основе древесно-полимерных композитов в промышленное производство, что подтверждается актом о принятии к внедрению (Приложение Г).

Перспективы дальнейшего развития темы.

Перспектива предполагает дальнейшие исследования по разработке трёхслойных стеновых материалов на основе древесно-полимерных композитов с целью расширения сферы их применения в строительной отрасли, включая использование модифицированных древесных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманова, Л.А. Структура и свойства модифицированного древесно-полимерного композита на основе поливинилхлорида / А.И. Бурнашев, А.Х. Ашрапов, Л.А. Абдрахманова, Р.К. Низамов // Строительные материалы. – 2014. – № 3. – С. 104-106.
2. Абушенко, А.В. Древесно-полимерные композиты: слияние двух отраслей / А.В. Абушенко // Мебельщик. – 2005. – №3. – С. 32-36.
3. Абушенко, А.В. Производство изделий из ДПК / А.В. Абушенко, И.В. Воскобойников, В.А. Кондратюк // Деловой журнал по деревообработке. – 2008. – №4. – С. 88-94.
4. Абушенко, А.В. Экструзия древесно-полимерных композитов / А.В. Абушенко // Мебельщик. – 2005. – № 2. – С. 20-25.
5. Азаров, В.И. Химия древесины и синтетически полимеров / В.И. Азаров, А.В. Буров, А.В. Оболенская. – СПб.: Изд-во «Лань», 2010. – 624 с.
6. Аксомитный, А.А. Изучение адгезионной связи между древесным армирующим наполнителем и полимерным связующим / А.А. Аксомитный // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 9-2 (20-2). – С. 14-18.
7. Алексеева, Л. В. Перспективы производства и применения вспученного перлита как наполнителя для легких бетонов / Л.В. Алексеева // Строительные материалы. – 2006. – Т.1. – № 6. – С. 74-77.
8. Аминов, Л.И. Совершенствование технологии производства композиционных материалов на основе древесных наполнителей и минеральных вяжущих: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / Аминов Ленар Илдарович. – Казань, 2011. – 155 с.
9. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров: учеб, пособие / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченова. – М.: Высш. шк., 2004. – 544 с.
10. Андрианов, К.А. Прогнозирование долговечности (работоспособности) пенополистирола в ограждающих конструкциях зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Андрианов Константин Анатольевич. –

Тамбов, 2002. – 212 с.

11. Бакирова, И.Н. Газонаполненные полимеры: Учебное пособие / И.Н. Бакирова, Л.А. Зенитова. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та. – 2009. – 105 с.

12. Барзилович, Е.А. Влияние фракционного состава наполнителей на теплофизические и физико-механические свойства наполненной теплопроводной эпоксидной композиции / Е.А. Барзилович, Н.В. Сиротинкин, Е.А. Рюткянен // Клеи. Герметики. Технологии. – 2015. – № 2. – С. 19 – 22.

13. Баринова, Л.С. Современное состояние и перспективы развития строительного комплекса России / Л.С. Баринова, Л.И. Куприянов, В.В. Миронов // Строительные материалы. – 2004. – Т.3. № 9. – С. 2-7.

14. Берлин, А.А. Пенополимеры на основе реакционноспособных олигомеров / А.А. Берлин, Ф.А. Шутов. – М.: Химия, 2008. – 296 с.

15. Берлин, А.А. Химия и технология газонаполненных высокополимеров / А.А. Берлин, Ф.А. Шутов. – М.: Наука, 2019. – 390 с.

16. Берлин, А.А. Упрочненные газонаполненные пластмассы / А. А. Берлин, Ф. А. Шутов. – М.: Химия. – 2020. – 224 с.

17. Богданова, Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов: учебное пособие / Ю.Г. Богданова. – М.: 2010. – 82 с.

18. Бондаренко, В.М. Строительная наука направления развития / В.М. Бондаренко, В.И. Римшин // Строительные материалы. – 1998. – Т. 1. – №4. – С. 2-4.

19. Булатов, Г.А. Пенополиуретаны в машиностроении и строительстве / Г.А. Булатов. – М.: Машиностроение, 2008. – 183 с.

20. Бурындин, В.Г. Экологически безопасные древесные композиционные материалы с карбамидными связующими; автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.21.03 / Бурындин Виктор Гаврилович. – Екатеринбург, 2000. – 33 с.

21. Варламова, Л.П. Влияние алюмосиликатных микросфер на физико-механические и реологические свойства жестких пенополиуретанов / Л.П. Варламова, В.А. Извозчикова, С.А. Рябов, А.С. Аверченко, Ю.Д. Семчиков // ЖПХ. – 2008. – Т 81. – № 3. – С. 502-504.

22. Васильков, С.Н. Технологии производства и применения экологически чистых и энергоэффективных стройматериалов на основе древесного сырья / С.Н. Васильков // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2004. – №11. – С. 50-51.

23. Вдовин, В.М. Конструкции из дерева и пластмасс / В.М. Вдовин. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 344 с.

24. Вольфсон, С.И. Физико-механические и реологические характеристики древесно-полимерных композитов на основе термически и механически модифицированного наполнителя / С.И. Вольфсон, И.З. Файзуллин, И.Н. Мусин, А.Н. Грачев, С.А. Пушкин // Пластические массы. – 2015. – № 5-6. – С. 39-43.

25. Галиев, И.М. Исследование механических свойств половых досок на основе древесно-полимерного композиционного материала / И.М. Галиев // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием). Сборник статей студентов и молодых ученых. – Красноярск. – 2014. – Т. 1. – С. 267-270.

26. Галиев, И.М. Исследование физико-механических свойств теплоизоляционной панели на основе древесно-полимерных композитов и пенополиуретана / И.М. Галиев, В.В. Сагадеев. // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 8. – С. 28-29.

27. Галиев, И.М. Исследование эксплуатационных свойств теплоизоляционной панели на основе древесно-полимерных композитов и пенополиуретана / И.М. Галиев, Ф.В. Назипова. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2017. – № 1. – С. 28-32.

28. Галиев, И.М. Получение древесно-полимерных композиционных материалов экструзионным способом / И.М. Галиев // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – № 1. – С.23-30.

29. Галяветдинов, Н.Р. Способ и устройство для предварительной подготовки древесного наполнителя в производстве древесно-полимерного композиционного материала / Н.Р. Галяветдинов, Р.Р. Сафин, Р.В. Данилова

(Салимгараева) // Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка: Труды Международ науч.-техн. конф. / СПбГЛТУ. – Санкт-Петербург. – 2011. – С. 165-168.

30. Герасимов, М.К. Производство древесно-полимерных композиционных материалов экструзионным методом / М.К. Герасимов, Г.И. Игнатьева, Р.Р. Мухаметзянов, И.М. Галиев, В.В. Степанов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 106-107.

31. Глазков, С.С. Экологически чистые композиты на основе вторичного полиэтилена и растительного сырья / С.С. Глазков, В.А. Поляков, И.С. Суровцев, О.Б. Рудаков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 3. – С. 112-118.

32. Глухих, В.В. Получение и применение изделий из древесно-полимерных композитов с термопластичными полимерными матрицами / Мухин Н.М., Шкуро А.Е., Бурындин В.Г. // Учебное пособие. — Екатеринбург: УГЛТУ. – 2014. – 85 с.

33. Горлов, Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов и изделий / Ю.П. Горлов. – М.: Высшая школа, 1989. – 383 с.

34. Горшкова, Т.А. Современные строительные материалы на основе древесных отходов / Т.А. Горшкова, С.М. Шевченко, И.П. Феоктистов // Вестник Мининского университета. – 2014. – Т. 13. – №25. – С. 102-121.

35. ГОСТ 11012-69. Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ. Введ. 1969–07–01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1969. – 13 с.

36. ГОСТ 11262-80. (СТ СЭВ 1199-78) Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с Изменением N 1). Введ. 1980–12–01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1986. – 7 с.

37. ГОСТ 1145-80. Шурупы с потайной головкой. Конструкция и размеры. Введ. 1982–01–01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 7 с.

38. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения (с Изменением N 1).

Введ.1991–01–01. – М.: ФГУП Стандартиформ. – 2006. – 99 с.

39. ГОСТ 14359-69. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования (с Изменением N 1). Введ. 1970–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 21 с.

40. ГОСТ 15173-70 (СТ СЭВ 2899-81) Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения (с Изменением N 1). Введ. 1970.07.01. - М.: Издательство стандартов, 1987. – 7 с.

41. ГОСТ 15815-8. Щеп технологическая. Технические условия (с Изменением № 1, 2). – Введ. 1985-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 15 с.

42. ГОСТ 16361-87. Мука древесная. Технические условия. Введ. 1990–01–01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.

43. ГОСТ 17177-94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Метод испытаний. – Введ. 1996-04-01. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 40 с.

44. ГОСТ 30244-94 Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. Введ. 1996–01–01. – М.: ФГУП Стандартиформ. – 2008. – 17 с.

45. ГОСТ 4648-2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. Взамен ГОСТ 4648-71. Введ. 2015.03.01. – М.: Стандартиформ. – 2014. – 23 с.

46. ГОСТ 4650-2014 (ISO 62:2008) Пластмассы. Методы определения водопоглощения. Взамен ГОСТ 4650-80. Введ 01.03.2015. – М.: Стандартиформ. – 2014. – 19 с.

47. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) Пластмассы. Метод испытания на сжатие. Взамен ГОСТ 4651-82. Введ. 2015.03.01. – М.: Стандартиформ. – 2014. – 19 с.

48. ГОСТ 4670-91. Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика. Введ. 1993–01–01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1992. – 9 с.

49. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – Введ. 1977-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 27 с.

50. ГОСТ 9.060-75. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС).. Введ. 1993–01–01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1975. – 10 с.
51. Денисов, А.В. Жесткие пенополиуретаны теплоизоляционного назначения / А.В. Денисов // Строительные материалы. – 2005. – № 6. – С. 21-22.
52. Дмитренков, А.И. Исследование свойств древесноволокнистых плит, модифицированных нефтеполимерной смолой / А.И. Дмитренков [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 2. – №11. – С. 120-131.
53. Древесно-полимерные композиционные материалы [Электронный ресурс] / С-a-m.narod.ru. Сетевая академия мебели. – М., 2002. – Режим доступа: <http://c-a-m.narod.ru/wpc/wood-plasticcomposites-defin.html>.
54. Дудынов, С.В. Композиционные материалы с экологически чистыми добавками / С.В. Дудынов. – Саранск: изд-во Мордовского университета, 2003. – 136 с.
55. Егорова, А.Д. Эффективные стеновые материалы на основе местного сырья для эксплуатации в суровом климате; автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.5 / Егорова Анастасия Дмитриевна. – М., 2001. – 22 с.
56. Ермолина, А.В. Теплоизоляционный материал на основе древесноволокнистых продуктов / А.В. Ермолина, П.В. Миронов // Химия растительного сырья. – 2011. – № 3. – С. 197 – 200.
57. Завадский, В.Ф. Стеновые материалы и изделия: учебное пособие / В.Ф. Завадский, А.Ф. Косач, П.П. Дерябин. – Омск: СибАДИ, 2005. – 254 с.
58. Зайцева, М.И. Теплоизоляционные плиты из отходов переработки хвои сосны обыкновенной: особенности изготовления, функционирования и рециклинга / М.И. Зайцева, Е.В. Робонен, Т.А. аврилов, Г.Н. Колесников // В сборнике: Деревянное малоэтажное домостроение: экономика, архитектура и ресурсосберегающие технологии. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 111-119.
59. Зиатдинова, Д.Ф. Анализ современного состояния производства теплоизоляционных материалов и возможности создания новых материалов на

основе отходов деревообработки / Д.Ф. Зиятдинова, Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, Л.И. Левашко // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 18. – С. 63 – 68.

60. Иванов, А. В. Дикумилпероксид: синтез, свойства, применение в полимерной промышленности / А.В. Иванов // Журнал Прикладной Химии. – 2018. – Т. 50. – В. 3. – С. 321-335.

61. Казас, М.М. Экономика промышленности строительных материалов и конструкций / М.М. Казас. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 320 с.

62. Кауфман, Ю. «Жидкое дерево» - строительный материал нового поколения / Ю. Кауфман // Полимерные материалы. – 2000. – № 6. (13). – С. 5-7.

63. Клесов, А.А. Древесно-полимерные композиты / А.А. Клесов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 736 с.

64. Королев, Е.В. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов / Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.И. Альбакасов // Нанотехнологии в строительстве. – 2011. – №6. – С. 32-43.

65. Котенко, В.Д. Композиционные материалы из древесины: современные тенденции развития / В.Д. Котенко // Вестник МГУЛ. 2000. – №1. – С. 51-53.

66. Кройчук, Л. А. Эффективная обработка измельченных отходов древесины / Л.А. Кройчук // Строительные материалы. 2004. – №7. – С. 42-43.

67. Лебедев, А. С. Изучение реакций изоцианата с полимерами в условиях синтеза полиуретанов / А.С. Лебедев, Д.Г. Исаков // Журнал Полимерные Реакции. – 2018. – Т. 25. – В. 2. – С. 189-204.

68. Линьков, Н.В. К вопросу о методике определения прочностных характеристик клеевых соединений деревянных конструкций / Н.В. Линьков. – Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 3 (393). – С. 153-158.

69. Липатов, Ю.С. Структура и свойства полиуретанов / Ю.С. Липатов, Ю.Ю. Керча, Л.М. Сергеева // Академия наук украинской ССР, институт химии высокомолекулярных соединений. – Киев: «Наукова думка», 1999. – 279 с.

70. Лукаш, А.А. Комплексная переработка древесины мягких лиственных пород в материалы и изделия с улучшенными эксплуатационными свойствами; автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.21.05 / Лукаш Александр Андреевич. – Б., 2019. – 32 с.

71. Мартынов, К.Я. Комплексная защита древесины в строительных изделиях и конструкциях / К.Я. Мартынов // Монография: издательство «Наука». – Новосибирск, 1996. – 126 с.

72. Мартынов, К.Я. Материаловедение / К.Я. Мартынов, Н.А. Машкин, Г.С. Юрьев. – Новосибирск: НГАСУ, 2001. – 180 с.

73. Микульский, В.Г. Модификация строительных материалов полимерами / В.Г. Микульский, В.В. Козлов. – Москва: МИСИ, 2005. – 43 с.

74. Миронов, П.В. Теплоизоляционные материалы: поропласты на основе синтетического связующего и волокнистых продуктов переработки древесины / П.В. Миронов, А.В. Ермолина // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2009. – № 24. – С. 120-123.

75. Мольков, А.А. Гипсосодержащие наполнители в пенополиуретановых композициях / А.А. Мольков, В.П. Сучков, А.Е. Коршунов // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 5 ч. / ООО «АР-Консалт». – Москва, 2014. – С. 71-72.

76. Мусин, И.Н. Влияние полимерного связующего на свойства древесно-полимерных композитов / И.Н. Мусин, И.З. Файзуллин, В.В. Новокшенов, С.И. Вольфсон // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т 17. – № 14. – С. 306-309.

77. Основин, В. Н. Справочник по строительным материалам и изделиям / В. Н. Основин, Л. В. Шуляков, Д. С. Дубяго. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс. – 2006. – 443 с.

78. Пат. 2123013 Российская Федерация, МПК C08G18/00, C08K3/34. Способ получения наполненного пенополиуретана для теплоизоляционных изделий / Яковенко Д.Ф., Зотов Б.П., Золотухин В.А.; заявитель и

патентообладатель общество с ограниченной ответственностью Межотраслевая производственно-коммерческая компания «Казанский конверн». – заявл. 07.05.1998; опубл. 10.12.1998. – 6 с.

79. Пат. 2133255 Российская Федерация, МПК C08L97/02. Способ изготовления материалов и изделий из экологически чистых древеснонаполненных пластмасс / Бикбау М.Я., Коршун О.А., Семенов Л.Л., Ежов А.А.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество Московский институт материаловедения и эффективных технологий. – заявл. 17.10.1997; опубл. 20.07.1999. – 5 с.

80. Пат. 2156934 Российская Федерация, МПК F 26 B 9/06. Установка для сушки древесины / Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Лашков В.А., Фиров Г.Н., Федорова Т.А.; заявитель и патентообладатель Научно-технический центр по разработке технологий и оборудования. – заявл. 04.06.1999; опубл. 27.09.2000, Бюл. №6. – 5 с.

81. Пат. 2257393 Российская Федерация, МПК C08G18/08, C08J5/10. Способ получения жесткого наполненного пенополиуретана / Золотухин В.А.; заявитель и патентообладатель Золотухин Виктор Антонович. – заявл. 04.12.2003; опубл. 27.07.2005, Бюл. № 21. – 8 с.

82. Пат. 2345886 Российская Федерация, МПК B 27 N 3/14. Способ изготовления изделий из композиционных материалов, преимущественно арболита / Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Лашков В.А., Аминов Л.И., Игнатьева Г.И., Мухаметзянова Д.А., Тимирбаев Н.А., Кондрашева С.Г., Воронин А.Е.; заявитель и патентообладатель Научно-технический центр по разработке прогрессивного оборудования. – заявл. 10.10.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4. – 7 с.

83. Пат. 2621338 Рос. Федерация, МПК C04B 40/00. Способ производства многослойных композиционных конструкционных материалов типа сэндвич / Хасаншин И.Я.; Общество с ограниченной ответственностью “Рейма индастриз”; заявл. 28.07.2015; опубл. 02.06.2017, Бюл. № 16. – 4 с.

84. Пат. 2731598 Рос. Федерация, МПК E04C 2/24 (2006.01), E04B 1/78 (2006.01). Теплоизоляционная панель / Сафин Р.Г., Саттарова З.Г.,

Фахрутдинов Р.Р., Сафин Р.Р., Зиятдинова Д.Ф., Тимербаева А.Л., Зиятдинов Р.Р., Ахметова Д.А.; опубл. 04.09.2020, Бюл. № 25. – 8 с.

85. Пат. 2800911 Рос. Федерация, МПК E04C 2/24 (2006.01), E04B 1/76 (2006.01). Теплоизоляционная панель / Сафин Р.Г., Фахрутдинов Р.Р., Галиев И.М., Гареев М.Г.; опубл. 31.07.2023, Бюл. № 22. – 11 с.

86. Пижурин, А.А. Основы научных исследований в деревообработке / А.А. Пижурин. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. – 305 с.

87. Пичугин, А.П. Коррозионностойкие материалы для защиты полов и инженерных систем сельскохозяйственных зданий и сооружений: монография / А.П. Пичугин, С.А. Городецкий, В.И. Бареев. – Новосибирск: НГАУ – РАЕН, 2010. – 123 с.

88. Просвирников, Д.Б. Экспериментальная установка для получения древесно-наполненного пенополиуретанового теплоизоляционного материала / Д.Б. Просвирников, В.А. Салдаев, В.В. Степанов // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 17. – С. 152-155.

89. Разиньков, Е.М. Технология и оборудование древесных плит и композиционных материалов: учебное пособие / Е.М. Разиньков, В.С. Мурзин. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2012. – 228 с.

90. Рыбин, Б.М. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов: учебник для вузов / Б.М. Рыбин // М.: МГУЛ, 2003. – 568 с.

91. Савельянов, В.П. Общая химическая технология полимеров / В.П. Савельянов. – М.: Академкнига, 2007. – 336 с.

92. Салдаев, В.А. Влияние соотношения компонентов на процесс формирования композиции древесно-наполненного пенополиуретана / В.А. Салдаев, Д.Б. Просвирников, О.С. Салдаева, Р.Г. Сафин, Х.Г. Мусин // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 23. – С. 52-55.

93. Салдаев, В.А. Исследование эксплуатационных свойств древесно-наполненного пенополиуретана / В.А. Салдаев, Д.Б. Просвирников, Р.Г. Сафин

и [др]. // Вестник технологического университета. – 2015. – Т 18. – № 20. – С. 181-184.

94. Салдаев, В.А. Технология формирования пенополиуретанового теплоизоляционного материала / В.А. Салдаев, Д.Б. Просвирников, И.Ю. Мазаров. // Сборник научных трудов по материалам XII международной научно-практической конференции «Дни науки». – Чехия, 2016. – С. 90-93.

95. Салимгараева, Р.В. Технология термического модифицирования древесного наполнителя в производстве композиционных материалов: дисс. ... канд. техн. наук. 05.21.05 / Салимгараева Регина Викторовна // Казань, 2013. – 166 с.

96. Саттарова, З.Г. Современное состояние технологий производства древесно-полимерных теплоизоляционных материалов / З.Г. Саттарова, Р.Р. Фахрутдинов, Д.Ф. Зиятдинова и [др]. // Журнал деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 1. – С. 62-72.

97. Саттарова, З.Г. Теплоизоляционный древесно-полимерный композиционный материал / З.Г. Саттарова, Р.Г. Сафин, Р.Р. Фахрутдинов, Е.И. Байгильдеева. – Журнал деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 4. – С. 46-54.

98. Сафин, Р.Г. Использование отходов лесозаготовок и деревообработки для производства теплоизоляционных материалов / Р.Г. Сафин, В.И. Петров, Г.И. Игнатьева и [др]. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2012. – № 1 (12). – С. 59-63.

99. Сафин, Р.Г. Исследования плотности высоконаполненных древесно-полимерных композиционных материалов интерполяционным методом / Р.Г. Сафин, И.М. Галиев, М.Г. Ахмадиев // Материалы международной научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие технологии», г. Тула. – 2014. – С. 52-54.

100. Сафин, Р.Г. Древесно-полимерные композиционные материалы / Р.Г. Сафин, И.М. Галиев, Р.Р. Фахрутдинов, М.Г. Гареев. // «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» Всероссийская научно-

практическая конференция: материалы конференции, г. Казань. – 2023. – С. 321-324

101. Сафин, Р.Г. Интерполяционный метод исследования процесса водопоглощения высоконаполненных древесно-полимерных композиционных материалов / Р.Г. Сафин, И.М. Галиев, Б.М. Ахмадиев // Материалы международной научно-технической конференции «Механика технологических процессов в лесном комплексе», г. Воронеж, 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 354-357.

102. Сафин, Р.Г. Интерполяционный метод математического моделирования механических свойств напольной плиты на основе древесно-полимерного композита / Р.Г. Сафин, М.Г. Ахмадиев, И.М. Галиев, Б.М. Ахмадиев // Актуальные проблемы математического образования. Материалы международной научно-практической конференции, г. Набережные Челны. – 2015. – С. 70-71.

103. Сафин, Р.Г. Исследование высоконаполненных древесно-полимерных композиционных материалов, получаемых экструзионным методом / Р.Г. Сафин, Г.И. Игнатьева, И.М. Галиев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 2. – С. 87-88.

104. Сафин, Р.Г. Композиционные материалы на основе древесных частиц и полимеров / Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова, И.М. Галиев, В.В. Салдаев. – Вестник технологического университета. – 2015. – Т 18. – № 19. – С. 184-187.

105. Сафин, Р.Г. Нетрадиционные способы подготовки древесных наполнителей для изготовления композиционных материалов / Р.Г. Сафин, И.Х. Аминов, Л.И. Аминов // II Международная научно-техническая конференция «Композиционные материалы на основе древесины», октябрь 24-27, МГУЛ, Москва. – 2000. – С. 50-53.

106. Сафин, Р.Г. Перспективы развития лесопромышленного комплекса Республики Татарстан на базе научных разработок кафедр лесотехнического профиля КНИТУ / Р.Г. Сафин, Р.Р. Сафин // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – №3. – С. 22-27.

107. Сафин, Р.Г. Получение теплоизоляционно-конструкционного

материала из древесных и пластмассовых отходов / Р.Г. Сафин, В.В. Степанов, Ф.Ф. Шаяхметов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. Т 2. – № 2 – 3 (7-3). – С. 130-132.

108. Сафин, Р.Г. Производство поризованной древесно-цементной смеси / Р.Г. Сафин, В.В. Степанов, Э.Р. Хайруллина, Ф.Ф. Шаяхметов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – №13. – С. 84-86.

109. Сафин, Р.Г. Разработка трехслойного древесно-полимерного композиционного материала с высокими эксплуатационными свойствами / Р.Г. Сафин, Р.Р. Фахрутдинов, М.Г. Гареев. // В книге: Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2022 (МНТК "ИМТОМ - 2022"). Материалы XI-й Международной научно-технической конференции. – Казань. – 2022. – С. 116-119.

110. Сафин, Р.Г. Современные направления переработки лесных ресурсов / Р.Г. Сафин, Д.Ф. Зиятдинова, А.В. Сафина и [др]. // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18. – № 15. – С.144-149.

111. Сафин, Р.Г. Современные строительные материалы на основе древесных отходов / Р.Г. Сафин, В.В. Степанов, Э.Р. Хайруллина, А.А. Гайнуллина, Т.О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – №20. – С. 122-127.

112. Сафин, Р.Г. Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств / Р.Г. Сафин. – М.: МГУЛ, 2003. – 500 с.

113. Сафин, Р.Р. Композиционные материалы на основе модифицированных древесных опилок обработанные ВЧ плазмой / Р.Р. Сафин, Л.И. Аминов, Е.Ю. Разумов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2009. – № 1. – С. 24-26.

114. Сафин, Р.Р. Способ улучшения эксплуатационных свойств древесно-полимерного композиционного материала / Р.Р. Сафин, Ф.Г. Валиев, Р.В. Данилова (Салимгараева) // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник трудов Международ. науч. конф. / УрФУ. – Екатеринбург. – 2011. –

С. 307-309.

115. Сафронов, А.П. Влияние межфазной адгезии и неравновесной стеклообразной структуры полимера на энтальпию смешения наполненных композитов на основе полистирола / А.П. Сафронов, А.С. Истомина, Т.В. Терзиян, Ю.И. Полякова, И.В. Бекетов // Высокомолекулярные соединения: Серия А. – 2012. – Т 54. – № 3. – С. 13-25.

116. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенская, В.Н. Вырьева, В.Я. Керц и др. // Киев. – 2003. – 144 с.

117. Соломатов, В.И. Биологическое сопротивление материалов: учебное пособие / В.И. Соломатов. - М.: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 196 с.

118. Стадник, Т.А. Строительные материалы для экологического домостроения в сельской местности / Т.А. Стадник // Строительные материалы. – 2006. – № 11. – С. 76-79.

119. Степанов, В.В. Разработка теплоизоляционного материала на основе древесных отходов: дисс...канд. техн. наук: 05.21.05 / Степанов Владислав Васильевич. – Казань, 2013. – 179 с.

120. Стородубцева, Т.Н. Влияние концентрации древесного наполнителя на механические свойства композиционного материала / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный // Фундаментальные исследования. – 2015. – №7-4. – С. 793-799.

121. Суворцева, Л.С. Технология и оборудование производства композиционных древесных материалов / Л.С. Суворцева. – Архангельск: Издательство Арханг. Гос. Техн. ун-та, 2001. – 223 с.

122. Тажибаева, Д. М. Исследование смешанного магниезиального вяжущего с наполнителями / Д. М. Тажибаева // Технические науки в России и за рубежом: материалы V Междунар. науч. конф. (г. Москва, январь 2016 г.). – М.: Буки-Веди, 2016. – С. 43-45.

123. Тамразян, А.Г. К возникновению трещин в модели толстостенного бетонного цилиндра при коррозии с учетом пористой зоны на границе раздела арматуры и бетона / А.Г. Тамразян, М.С. Минеев. – Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 3 (393). –

С. 159-165.

124. Технокова, А.В. Влияние технологических добавок на древесно-полимерные композиты / А.В. Технокова. – Издательство "ТехноЛит", 2023. – 220 с.

125. Технологический процесс, оборудование и инструменты для изготовления профильных деталей из древесно-полимерной композиции (ДПК) методом экструзии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dpk-deck.ru/page/tehnologia.html>

126. Угрюмов, С.А. Исследование физико-механических характеристик трехслойных древесно-стружечных плит с послойной комбинацией связующего / А.А. Федотов, С.А. Угрюмов // Энциклопедия инженера-химика. – 2012. – № 10. – С. 18-21.

127. Угрюмов, С.А. Перспективы производства и применения плитных композиционных материалов на основе совмещенных наполнителей / Д.А. Кожевников, С.А. Угрюмов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2013. – № 9. – С. 39-42.

128. Угрюмов, С.А. Свойства пьезотермопластиков на основе различного древесного сырья / С.А. Угрюмов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Материалы международной научно-технической конференции, г. Воронеж. – 2015. – Т. 3. – № 2-1 (13-1). – С. 472-476.

129. Угрюмов, С.А. Совершенствование технологии производства композиционных материалов с использованием древесных отходов / С.А. Угрюмов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Материалы международной научно-технической конференции. Материалы международной научно-технической конференции. – 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 160-164.

130. Угрюмов, С.А. Эксплуатационные характеристики армированного композиционного древесного материала / С.А. Угрюмов, А.В. Шеин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Материалы международной научно-технической конференции, г. Воронеж. –

2015. – Т. 3. – № 2-1 (13-1). – С. 468-472.

131. Файзуллин, И.З. Древесно-полимерные композиционные материалы на основе полипропилена и модифицированного древесного наполнителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Файзуллин Ильнур Зиннурович. – Казань, 2015. – 123 с.

132. Файзуллин, И.З. Фрактальная модель процесса текучести древесно-полимерных композитов на основе полипропилена / И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, И.Н. Мусин, А.З. Файзуллин // Вестник технологического университета. – 2015. – Т 18. – № 17. – С. 134-137.

133. Фахрутдинов, Р.Р. Влияние различных полимеров и технологических добавок на свойства древесно-полимерных композитов / Р.Р. Фахрутдинов, Р.Г. Сафин, Е.И. Байгильдеева, Д.Ф. Зиятдинова // Системы. Методы. Технологии. – Братский государственный университет (Братск). – № 2 (54). – 2022. – С. 114-118.

134. Фахрутдинов, Р.Р. Влияние термомодифицирования древесного наполнителя на физические свойства древесно-полимерных композитов / Р.Р. Фахрутдинов, Р.Г. Сафин // Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса», – Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова (Воронеж), 2022. – С. 155-158.

135. Фахрутдинов, Р.Р. Древесно-полимерные композиционные материалы / Р.Р. Фахрутдинов, Р.Г. Сафин, И.М. Галиев, М.Г. Гареев // «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» Всероссийская научно-практическая конференция: материалы конференции. г. Казань, 2023. – С. 321-324.

136. Фахрутдинов, Р.Р. Исследование древесно-полимерного композиционного материала из древесных отходов и пенополиуретана / Р.Р. Фахрутдинов, М.Г. Гареев. // «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» Всероссийская научно-практическая конференция:

материалы конференции. г. Казань, 2023. – С. 265-267.

137. Фахрутдинов, Р.Р. Разработка трехслойного древесно-полимерного композиционного материала с высокими эксплуатационными свойствами // Р.Р. Фахрутдинов, Р.Г. Сафин, М.Г. Гареев / В книге: Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2022 (МНТК "ИМТОМ - 2022"). Материалы XI-й Международной научно-технической конференции. Казань, 2022. – С. 116-119.

138. Фахрутдинов, Р.Р. Способ получения композиционного материала на основе отходов текстильной промышленности и арабиногалактана / Р.Р. Фахрутдинов, Р.Г. Сафин, А.В. Сафина, К.В. Валеев // «Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности», – Ивановский государственный политехнический университет (Иваново), 2021. – № 6 (396) – С. 297-302.

139. Филичкина, М.В. Рациональное использование древесных отходов / М.В. Филичкина, А.С. Сушков // Воронежский научно-технический Вестник. – 2013. – № 4 (6). – С. 27-32.

140. Хайруллина, Э.Р. Физическое моделирование теплофизических свойств древесно-плитного материала на основе минеральных вяжущих веществ / Э.Р. Хайруллина, Г.И. Игнатьева, Ф.М. Филиппова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, г. Воронеж. – 2014. – №2 (7-2). – С. 366-368.

141. Хасаншин, Р.Р. Исследование эксплуатационных свойств напольных покрытий на основе древесно-полимерного композита / Р.Р. Хасаншин, И.М. Галиев, Р.Г. Сафин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3. – С. 159 – 163.

142. Шкуро, А.Е. Древесно-полимерные композиты повышенной водостойкости: дисс. ... канд. техн. наук. 05.21.03 / Шкуро Алексей Евгеньевич. – Екатеринбург, 2013. – 106 с.

143. Яценко, С.В. Модификация вспененных полиуретанов углеродными нанокompозитами: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Яценко Сергей Васильевич. –

Санкт-Петербург, 2002. – 138 с.

144. Anderson, L.C. "Tailoring Morphology in Polypropylene/Wood Flour Blends: The Impact of Maleic Anhydride Grafting." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, Vol. 138, 106132.

145. Clemons, C. Wood-plastic composites in the United States: The interfacing of two industries / C. Clemons // *For. Prod.* – 2002. – №10. – 52 p.

146. Dikobe, D.G. Effect of filler content and size on the properties of ethylene vinyl acetate copolymer-wood fiber composites / D.G. Dikobe, A.S. Luyt // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2007. – V. 103. – P. 3645-3654.

147. Dikobe, D.G. Morphology and Thermal Properties of Maleic Anhydride Grafted Polypropylene / Ethylene – Vinyl Acetate Copolymer / Wood Powder Blend Composites / D.G. Dikobe, A.S. Luyt // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2007. – V. 116. – P. 3193-3201.

148. Gomes, M.E. A new approach based on injection moulding to produce biodegradable starch-based polymeric scaffolds: morphology, mechanical and degradation behaviour / M.E. Gomes, A.S. Ribeiro, P.B. Malafaya, R.L. Reis, A.M. Cunha // *Biomaterials.* – 2001. – V. 22. – P. 883-889.

149. Ibraheem, S.A. Development of Green Insulation Boards from Kenaf Fibres and Polyurethane / S.A. Ibraheem, Aidy Ali, A. Khalina // *Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering.* – 2011. – Vol. 50. – Issue 6. – P.613-621.

150. Johnson, R.M. "Enhancing the Mechanical Properties of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer-Cellulose Nanofiber Composites." *Journal of Materials Science.* – 2022. – Vol. 57. – Issue 15. – P. 9768-9783.

151. Malunka, M.E. Preparation and Characterization of EVA-Sisal Fiber Composites / M.E Malunka, A.S. Luyt, H. Krump // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2006. – V. 100. – P. 1607-1617.

152. Rodriguez, M.A."Kenaf Fiber Reinforced Polyurethane Composites: A Sustainable Approach to Insulation Board Development." *Journal of Sustainable Materials and Technologies*, 2019. – Vol. 12. – P. 45-57.

153. Smith, J. "Advancements in Wood-Plastic Composite Technology: A

Comprehensive Review." *Polymer Composites*, 2023. – Vol. 45. – Issue 7. – P. 2654-2667.

154. Turner, M.J., Davis, K.L., White, S.R. "Characterization of EVA-Sisal Fiber Composites for Structural Applications." *Composite Structures*, 2018. – Vol. 183. – P. 302-311.

155. Williams, E.D. "Biodegradable Starch-Based Polymeric Scaffolds: Processing and Performance Evaluation." *Materials Letters*, 2020. – Vol. 271. – P. 127-168.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Статистическая обработка результатов

1. Количественная оценка расхождения между расчетными и экспериментальными данными.

Для количественной оценки расхождений между расчетными и экспериментальными значениями по известным методикам рассчитаны (формулы приведены на примере предела прочности древесно-полимерного композита):

- среднее арифметическое отклонение:

$$\delta' = \frac{\sum_{i=1}^n |\sigma_i - \sigma_{\text{эл}}|}{n};$$

- среднее арифметическое относительное отклонение:

$$\delta'_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\sigma_i - \sigma_{\text{эл}}}{\sigma_{\text{н}} - \sigma_{\text{к}}} \right| 10^2;$$

- среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{\text{эл}})^2}{n-1}};$$

- среднее квадратичное отклонение среднего арифметического:

$$\sigma'_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{\text{эл}})^2}{n(n-1)}}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицах 1 – 8.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки кривой предела прочности на твердость поверхностных слоёв на основе древесных частиц, смешанных с изоцианатом (рис. 3.4 – позиция 1).

№	C, %	$H_{\text{э}},$ Н/мм ²	$H_{\text{р}},$ Н/мм ²	$ H_{\text{э}} - H_{\text{р}} $	δ'	$\left \frac{H_{\text{э}} - H_{\text{р}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \right 10^2$	δ'_0	$(H_{\text{э}} - H_{\text{р}})^2$	σ'	σ'_0
1	50	83	82,35	0,65	0,86	1,59	2,21	0,42	1,25	0,63
2	60	91	92,95	1,95		4,76		3,80		
3	70	85	84,8	0,2		0,49		0,04		
4	80	52	52,65	0,65		1,59		0,42		
Σ				3,45		8,42		4,69		

Таблица 2 – Результаты статистической обработки кривой предела прочности на твердость поверхностных слоёв на основе древесных частиц, смешанных без изоцианата (рис. 3.4 – позиция 2).

№	C, %	$H_{\text{э}},$ Н/мм ²	$H_{\text{р}},$ Н/мм ²	$ H_{\text{э}} - H_{\text{р}} $	δ'	$\left \frac{H_{\text{э}} - H_{\text{р}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \right 10^2$	δ'_0	$(H_{\text{э}} - H_{\text{р}})^2$	σ'	σ'_0
1	50	62	60,7	1,3	2,60	2,96	6,50	1,69	3,36	1,68
2	60	70	73,9	3,9		8,88		15,21		
3	70	68	64,1	3,9		8,88		15,21		
4	80	30	31,3	1,3		2,96		1,69		
Σ				10,4		23,69		33,80		

Таблица 3 – Результаты статистической обработки кривой предела прочности на растяжение поверхностных слоёв из древесных частиц хвойных пород и полиэтилена (рис. 3.1, а – позиция 1).

№	C, %	$\sigma_{\text{э}},$ МПа	$\sigma_{\text{р}},$ МПа	$ \sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}} $	δ'	$\left \frac{\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}}}{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}} \right 10^2$	δ'_0	$(\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}})^2$	σ'	σ'_0
1	50	24	23,9	0,1	0,2	1,25	2,5	0,01	0,26	0,13
2	60	21	21,3	0,3		3,75		0,09		
3	70	19	18,7	0,3		3,75		0,09		
4	80	16	16,1	0,1		1,25		0,01		
Σ				0,8		10,00		0,2		

Таблица 4 – Результаты статистической обработки кривой предела прочности на растяжение поверхностных слоёв из древесных частиц берёзы и полиэтилена (рис. 3.1, а – позиция 2).

№	C, %	$\sigma_{\text{э}},$ МПа	$\sigma_{\text{р}},$ МПа	$ \sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}} $	δ'	$\left \frac{\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}}}{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}} \right 10^2$	δ'_0	$(\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}})^2$	σ'	σ'_0
1	50	22	22,2	0,2	1,3	2,22	16,25	0,04	1,83	0,91
2	60	20	21,6	1,6		17,78		2,56		
3	70	16	18,6	2,6		28,89		6,76		
4	80	14	13,2	0,8		8,89		0,64		
Σ				5,2		57,78		10		

Таблица 5 – Результаты статистической обработки кривой предела прочности на сжатие поверхностных слоёв из древесных частиц хвойных пород и полиэтилена (рис. 3.1, б – позиция 1).

№	C, %	$\sigma_{\text{э}},$ МПа	$\sigma_{\text{р}},$ МПа	$ \sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}} $	δ'	$\left \frac{\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}}}{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}} \right 10^2$	δ'_0	$(\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}})^2$	σ'	σ'_0
1	50	72,3	70,8	1,5	3,325	4,92	10,90	2,25	4,28	2,14
2	60	61,7	66,7	5		16,39		25		
3	70	62,3	57,4	4,9		16,07		24,01		
4	80	41,8	43,7	1,9		6,23		3,61		
Σ				13,3		43,61		54,87		

Таблица 6 – Результаты статистической обработки кривой предела прочности на сжатие поверхностных слоёв из древесных частиц берёзы и полиэтилена (рис. 3.1, б – позиция 2)

№	C, %	$\sigma_{\text{э}},$ МПа	$\sigma_{\text{р}},$ МПа	$ \sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}} $	δ'	$\left \frac{\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}}}{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}} \right 10^2$	δ'_0	$(\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{р}})^2$	σ'	σ'_0
1	50	69,5	69,3	0,2	0,4	1,32	2,65	0,04	0,52	0,26
2	60	65,9	66,5	0,6		3,97		0,36		
3	70	62,2	61,6	0,6		3,97		0,36		
4	80	54,4	54,6	0,2		1,32		0,04		
Σ				1,6		10,60		0,8		

Таблица 7 – Результаты статистической обработки кривой удельного сопротивления выдёргиванию шурупа из поверхностных слоёв на основе древесных частиц, смешанных с изоцианатом (рис. 3.5 – позиция 1)

№	C, %	$q_{\text{э}},$ Н/мм ²	$q_{\text{р}},$ Н/мм ²	$ q_{\text{э}} - q_{\text{р}} $	δ'	$\left \frac{q_{\text{э}} - q_{\text{р}}}{q_{\text{max}} - q_{\text{min}}} \right 10^2$	δ'_0	$(q_{\text{э}} - q_{\text{р}})^2$	σ'	σ'_0
1	50	136,3	135,46	0,84	2,41	10,71	32,18	0,71	3,19	1,60
2	60	138,7	143,26	4,56		58,13		20,77		
3	70	143,3	141,17	2,13		27,22		4,55		
4	80	135,8	137,92	2,12		27,08		4,51		
Σ				9,65		123,14		30,53		

Таблица 8 – Результаты статистической обработки кривой удельного сопротивления выдёргиванию шурупа из поверхностных слоёв на основе древесных частиц без изоцианата (рис. 3.5 – позиция 2).

№	C, %	$q_{\text{э}},$ Н/мм ²	$q_{\text{р}},$ Н/мм ²	$ q_{\text{э}} - q_{\text{р}} $	δ'	$\left \frac{q_{\text{э}} - q_{\text{р}}}{q_{\text{max}} - q_{\text{min}}} \right 10^2$	δ'_0	$(q_{\text{э}} - q_{\text{р}})^2$	σ'	σ'_0
1	50	125	124,15	0,85	2,15	9,39	26,19	0,72	2,68	1,34
2	60	127,9	129,9	2,00		22,04		3,98		
3	70	133,2	130,78	2,42		26,74		5,86		
4	80	126,4	129,73	3,32		36,74		11,06		
Σ				8,59		94,92		21,61		

Расчёт трёхслойного стенового материала, как альтернативы ДСтП

Инженерная методика расчёта трёхслойного материала при условии, что прочность теплоизоляционного слоя намного меньше декоративного поверхностного слоя:

$$\sigma_2 \ll \sigma_1. \quad (1)$$

Исходные данные:

1. Прочность на сжатие:

- заменяемого материала:

$$\sigma = 21 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \quad (2)$$

- декоративного поверхностного слоя:

$$\sigma_1 = 30 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \quad (3)$$

- теплоизоляционного слоя:

$$\sigma_2 = 5 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \quad (4)$$

- конструкционного поверхностного слоя:

$$\sigma_3 = 60 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}. \quad (5)$$

2. Толщина заменяемого образца:

$$b = 0,018 \text{ м}. \quad (6)$$

3. Теплопроводность:

- декоративного поверхностного слоя:

$$\lambda_1(0 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,1367 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad (7)$$

$$\lambda_1(10 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,1371 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad (8)$$

$$\lambda_1(20 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,13755 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad (9)$$

$$\lambda_1(30 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,1377 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad (10)$$

$$\lambda_1(40 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,1388 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad (11)$$

$$\lambda_1(50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,1404 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad (12)$$

- теплоизоляционного слоя:

$$\lambda_2(0\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,0221 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (13)$$

$$\lambda_2(10\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,0227 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (14)$$

$$\lambda_2(20\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,0232 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (15)$$

$$\lambda_2(30\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,0253 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (16)$$

$$\lambda_2(40\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,032 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (17)$$

$$\lambda_2(50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,041 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (18)$$

- конструкционного поверхностного слоя:

$$\lambda_3(0\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,1475 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (19)$$

$$\lambda_3(10\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,1477 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (20)$$

$$\lambda_3(20\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,14775 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (21)$$

$$\lambda_3(30\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,1478 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (22)$$

$$\lambda_3(40\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,1481 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \quad (23)$$

$$\lambda_3(50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,1484 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}. \quad (24)$$

4. Коэффициенты теплоотдачи:

- в помещении:

$$\alpha_1 = 8,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; \quad (25)$$

- снаружи:

$$\alpha_2 = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (26)$$

5. Максимальный перепад температуры в регионе:

$$\Delta T = 0 \div 50, 10\text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (27)$$

6. Нормативный удельный поток теплопотерь:

$$q = 38,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (28)$$

Результаты расчёта:

1) показатель прочности:

- декоративного поверхностного слоя:

$$n_1 = 0,7; \quad (29)$$

- конструкционного поверхностного слоя:

$$n_2 = 0,35. \quad (30)$$

2) Толщины слоёв материала:

- при декоративном исполнении:

$$b_2 (10 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0103 \text{ м}; \quad (31)$$

$$b_2 (20 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0106 \text{ м}; \quad (32)$$

$$b_2 (30 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,014 \text{ м}; \quad (33)$$

$$b_2 (40 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0179 \text{ м}; \quad (34)$$

$$b_2 (50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0234 \text{ м}; \quad (35)$$

- при заданном соотношении:

$$b_2 (10 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0103 \text{ м}; \quad (36)$$

$$b_2 (20 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0106 \text{ м}; \quad (37)$$

$$b_2 (30 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,01485 \text{ м}; \quad (38)$$

$$b_2 (40 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,02065 \text{ м}; \quad (39)$$

$$b_2 (50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,02878 \text{ м}; \quad (40)$$

- при одинаковом материале:

$$b_2 (10 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0103 \text{ м}; \quad (41)$$

$$b_2 (20 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0106 \text{ м}; \quad (42)$$

$$b_2 (30 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0181 \text{ м}; \quad (43)$$

$$b_2 (40 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,02705 \text{ м}; \quad (44)$$

$$b_2 (50 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0374 \text{ м}. \quad (45)$$

Расчёт технико-экономических показателей

Затраты по основным компонентам на единицу изделия рассчитываются по формуле:

$$S_m = N_{mi} \times C_{mi} \times K_{m-z} - N_{0i} \times C_{0i}, \quad (46)$$

где N_{mi} – норма расхода i -го материала на изделие, кг; C_{mi} – цена i -го материала за единицу, руб; K_{m-z} – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (ТЗР); N_{0i} – масса возвратных отходов, кг.; C_{0i} – цена возвратных отходов, руб.

Основная цель данного исследования – выявить факторы, влияющие на структуру затрат на материалы, а также определить эффективность использования ресурсов и возможности снижения затрат на основные и вспомогательные ресурсы. Полученные результаты могут быть использованы предприятием для оптимизации производственных процессов и повышения конкурентоспособности на рынке [61].

Таблица 9 содержит информацию о структуре и объеме затрат на основные и вспомогательные материалы, которые являются важным элементом производственного процесса предприятия.

Таблица 9 – Затраты на основные и вспомогательные материалы

Наименование материала	Норма расхода, кг	Цена за единицу, руб.	Коэффициент ТЗР	Возвратные отходы		Общие затраты, руб.
				Вес, кг	Цена единицы, руб.	
Древесные частицы	1	10	1.1	-	-	11
Полиэтилен	0,8	55	1.1	-	-	48,4
Технологические добавки	0,3	500	1.1	-	-	165
Красители	0,1	25	1,1	-	-	2,75
Полиол	0,5	200	1,1	-	-	110
Изоцианат	0,5	205	1,1	-	-	112
Древесные волокна	4,2	12	1,1	-	-	55,44
Итого S_m						504,59

Расчёт потребности в материальных ресурсах на годовой выпуск изделия

представлен в табл. 10.

Таблица 10 – Потребности в материальных ресурсах на годовой выпуск, тыс. руб.

Составляющие элемента "Материальные затраты"		Сумма, тыс. руб. на годовой выпуск
1.	Сырье, материалы, покупные полуфабрикаты	5045,9
2.	Вспомогательные материалы, запасные части для ремонта оборудования, работы и услуги производственного характера	200,0
3.	Топливо, энергия	1932,0
Всего материальных затрат		7177,9

Материальные затраты на годовой выпуск составили 7177,9 тыс. руб.

Определяем первоначальную стоимость технологического оборудования (табл. 11), принимаем во внимание затраты на строительно-монтажные работы ($K_{см} = 20\%$).

Таблица 11 – Стоимость технологического оборудования в тыс. руб.

Наименование оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Затраты на монтаж и транспортные расходы	Строительно- монтажные работы	Количество оборудования, шт.	Балансовая стоимость оборудования
Сортировщик щепы	80,0	-	16,0	1	96,0
Дефибратор	70,0	-	14,0	3	224,0
Ситовый сепаратор	450,0	-	76,0	1	526,0
Барабанная сушилка	140,0	-	28,0	1	168,0
Бункер	100,0	-	20,0	2	220,0
Линия экструзии	3380,0	-	338,0	2	7098,0
Смеситель	305,0	-	30,5	2	640,5
Подпрессовоч ное устройство	1120,0	-	112,0	1	1232,0
Заливная головка	129,0	-	12,9	1	141,9
Обрезной станок	700,0	-	70,0	1	770,0
Итого					11116,4

Общая стоимость технологического оборудования составила 11116,4 тыс. руб.

В таблице 12 сведены результаты расчётов годовой суммы амортизационных отчислений.

Расчёты в данной таблице произведены на основе первоначальной стоимости элементов основных средств и их годовой нормы амортизации, выраженной в процентах.

Таблица 12 – Расчёт годовой суммы амортизационных отчислений

Наименование элементов основных средств	Первоначальная стоимость, тыс. руб.	Годовая норма амортизации, %	Годовая сумма амортизационных отчислений, тыс. руб.
1. Машины и оборудование:			
а) технологическое оборудование	11116,4	25	2779,1
б) измерительные, регулирующие приборы и оборудование	200,0	20,0	40,0
в) вычислительная техника	100,0	25,0	25,0
2. Транспортные средства	50,0	20,0	10,0
3. Производственный и хозяйственный инвентарь и принадлежности	50,0	20,0	10,0
4. Другие виды основных средств	100,0	20	20,0
Итого	11616,4	-	2884,1

Общая сумма основных средств составила 11616,4 тыс. руб.

Годовая сумма амортизационных отчислений составила 2884,1 тыс. руб.

Для расчёта нормы амортизации самостоятельно выбрали срок полезного использования основных фондов из разрешенного диапазона.

В таблице 13 приведены численность персонала и их годовая заработная плата. Численность персонала предприятия составила 14 чел. Фонд заработной платы персонала составил 7800,0 тыс. руб.

Таблица 13 – Численность персонала и их годовая заработная плата

Категория персонала	Численность, чел.	Годовая оплата труда тыс. руб.
1. Руководители	1	600
2. Специалисты	3	2200
3. Прочий персонал	10	5000
Итого	14	7800

В таблице 14 представлены затраты на производство и себестоимость единицы готового изделия. Определение себестоимости продукции требует учета различных факторов, включая стоимость сырья, энергетические затраты, оплату труда, амортизацию оборудования, а также расходы на транспортировку и складирование.

Таблица 14 – Затраты на производство продукции и себестоимость единицы изделия

Элементы затрат	Сумма, тыс. руб.
1. Материальные затраты	7177,9
2. Расходы на оплату труда	7800,0
3. Отчисления по единому социальному налогу	2340,0
4. Амортизационные отчисления	2884,1
5. Прочие затраты	500,0
Итого текущие затраты на производство	20702,0

Затраты на производство продукции составили 20702,0 тыс. руб.

Результаты расчёта прибыли от реализации продукции и чистой прибыли приведены в табл. 15. Ставка налога на прибыль принимается по действующему законодательству (20 %).

Таблица 15 – Отчёт о прибылях и убытках в тыс. руб.

Показатель	Освоение, тыс. руб.
1. Выручка от реализации продукции без НДС и акцизов	26932,5
2. Себестоимость реализованной продукции	20702,0
3. Прибыль от реализации	6230,5
4. Налог на прибыль (20 %)	1246,1
5. Чистая прибыль	4984,4

Акт внедрения

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор ООО НПО

«Политехнологии»

Салдаев В.А.

«28» 12 2023 г.

АКТ ПРИНЯТИЯ К ВНЕДРЕНИЮ

технологического процесса по производству трёхслойных стеновых панелей
на основе древесно-полимерного композита

Настоящим актом подтверждается, что «28» декабря 2023 г. в ООО НПО «Политехнологии» был принят к внедрению технологический процесс по производству трёхслойных стеновых панелей на основе древесно-полимерного композита.

Предложенная и разработанная представителями ФГБОУ ВО «КНИТУ»: д.т.н. Сафиным Р.Г., асп. Фахрутдиновым Р.Р. технология будет применяться для производства трёхслойных стеновых панелей на основе древесных частиц и полимерных отходов.

Директор
ООО НПО «Политехнологии»

В.А. Салдаев

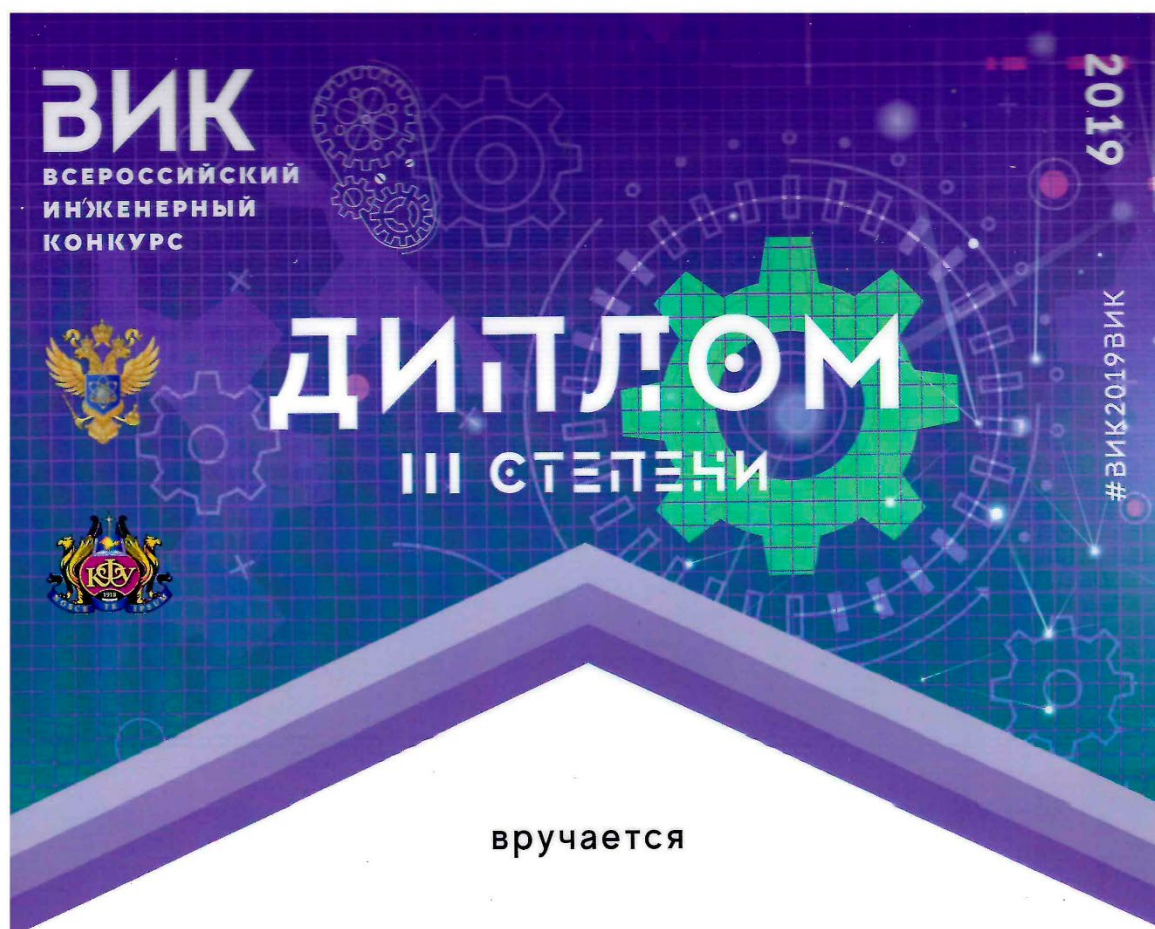
Представители
ФГБОУ ВО «КНИТУ»:

Р.Г. Сафин

Р.Р. Фахрутдинов

Дипломы и сертификаты





вручается

Фахрутдинову Руслану Рафаиловичу

за 3 место в номинации

ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ

Заместитель Министра науки и высшего
образования Российской Федерации

М.А. Боровская

И.о ректора ФГАОУ ВО "Крымский федеральный
университет имени В.И. Вернадского"

А.П. Фалалеев

г. Симферополь
2019



КАЗАНСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Г.ТИМИРЯСОВА



Открытый конкурс инновационных идей
«ПРОСТРАНСТВО ИННОВАЦИЙ-2022»
Диплом
I МЕСТО

в номинации: «Технологическая инновация»

НАГРАЖДАЕТСЯ ПРОЕКТ

«Разработка древесно-полимерного композиционного материала с улучшенными эксплуатационными и теплоизоляционными свойствами»

Автор: Р. Фахрутдинов

Председатель
Конкурсной комиссии
И.И. Антонова

Председатель
Оргкомитета
А.В. Тимирясова



Казань 2022

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ
ИННОВАЦИЯМ



ДИПЛОМ

ПОБЕДИТЕЛЯ ПРОГРАММЫ
«СТУДЕНЧЕСКИЙ СТАРТАП»

Фахрутдинов Руслан

1024ГССС15-L/84296



Генеральный директор
С.Г. Поляков

2022

ДИПЛОМ ПОБЕДИТЕЛЯ КОНКУРСА «ТЕХНОСТАРТ»

НАГРАЖДАЕТСЯ

аспирант кафедры ПДМ

Руслан Фахрудинов

Проект: "Разработка древесно – полимерного композита
из отходов древесины и полимеров"

Руководитель - Сафин Рушан Гареевич, д.т.н.,
профессор, зав. кафедрой ПДМ

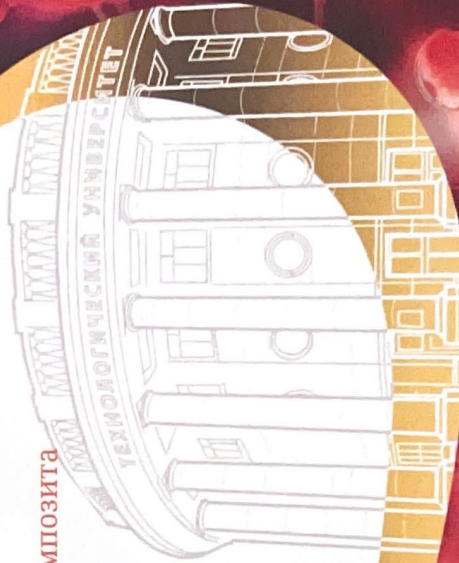
Врио ректора

Ю. М. Казаков



2021 год

Казанский национальный исследовательский технологический университет



Патенты

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2800911

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННАЯ ПАНЕЛЬ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет" (ФГБОУ ВО "КНИТУ") (RU)*

Авторы: *Сафин Рушан Гареевич (RU), Фахрутдинов Руслан Рафаилович (RU), Галиев Ильнар Марселевич (RU), Гареев Марат Галиевич (RU)*

Заявка № 2023105048

Приоритет изобретения 06 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 31 июля 2023 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 марта 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 429b6a0fe3853164ba796f83b73b4aa7
Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2731598

Теплоизоляционная панель

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет" (ФГБОУ ВО "КНИТУ") (RU)*

Авторы: *Сафин Рушан Гареевич (RU), Саттарова Зульфия Гаптеллахатовна (RU), Фахрутдинов Руслан Рафаилович (RU), Сафин Руслан Рушанович (RU), Зиятдинова Диляра Фаритовна (RU), Тимербаева Альбина Леонидовна (RU), Зиятдинов Радис Решидович (RU), Ахметова Дина Анасовна (RU)*

Заявка № 2019143878

Приоритет изобретения 23 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 сентября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 23 декабря 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ившин