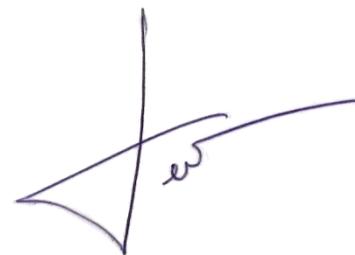


На правах рукописи



ТЕСЛЕНКО

Антон Юрьевич

**ПОЛУЧЕНИЕ ДРЕВЕСНО-КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
С КАРДАНОЛСОДЕРЖАЩЕЙ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЕЙ И
ГИБРИДЫ НА ЕГО ОСНОВЕ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

Екатеринбург–2025

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научный руководитель: Шишлов Олег Федорович, доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Мидуков Николай Петрович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», заведующий кафедрой «Процессы и аппараты химической технологии»

Саерова Ксения Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Защита состоится **«26» февраля 2026 года в 13:00 часов**, на заседании диссертационного совета 24.2.424.01 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, аудитория 1-401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», <http://www.usfeu.ru/>.

Автореферат разослан «__» января 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Шишкина
Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Благодаря своим уникальным свойствам композиционные материалы занимали и продолжают занимать важное место во многих сферах человеческой жизни, промышленности, экономике.

Одной из сфер, в которой композиционные материалы используются повсеместно, является строительная отрасль. Среди композиционных материалов, производимых обрабатывающей промышленностью России для строительной отрасли, особое место занимают древесно-композиционные материалы общеконструкционного назначения (фанера, древесно-стружечные плиты, OSB, LVL-брус, арболит и др.) которые нашли самое широкое применение при строительстве зданий, сооружений, элементов конструкций, внешней и внутренней отделке.

Стоит отметить, что благодаря тесной связи строительной отрасли с другими отраслями экономики, она обладает значительным мультипликативным экономическим эффектом, поэтому поиск и разработка новых композиционных материалов и способов их изготовления будут оказывать наибольший положительный вклад на развитие экономики России. Это подтверждается рядом документов Российской Федерации, направленных на укрепление и расширение строительной отрасли, а также в данных документах сформулированы направления, формирующие необходимость поиска и разработки новых композиционных материалов и способов их изготовления, способных заменить традиционно используемые материалы и обеспечить устойчивое развитие обрабатывающей промышленности и строительной отрасли на многие годы вперед.

Российская Федерация обладает крупнейшими в мире запасами лесных ресурсов, которые, однако не безграничны, а тем более не избыточны, поэтому вопросы рационального использования природных ресурсов и сбережения окружающей среды имеют первоочередное значение, что также находит подтверждение в ряде государственных документов.

Решением обозначенных задач и проблем является поиск и разработка новых экологически чистых связующих и композиционных материалов общеконструкционного назначения на их основе, не выделяющих вредных веществ в процессе синтеза связующего, изготовления композита и его дальнейшей эксплуатации.

Связующие и композиционные материалы, удовлетворяющие предложенному решению, могут быть частично или полностью получены из сырья растительного происхождения.

В данной работе показана возможность создания композиционных материалов, с использованием карданола (алкилфенол растительного происхождения), как компонента связующего, и древесного материала (лущеного березового шпона), которые в процессе совместной переработки консолидируются в общеконструкционный, экологически чистый структурно-ориентированный древесно-композиционный материал с карданолсодержащей эпоксидной матрицей.

Знание и понимание о способах трансформации растительного сырья в композиционные материалы, а также расширение ассортимента и номенклатуры существующих композитов за счет применения новых подходов к их изготовлению – являются интересными и актуальными задачами, имеющими большое научное и практическое значение.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области карданолсодержащих древесно-композиционных материалов в Российской Федерации занимались такие ученые, как д.т.н. Шишлов О.Ф., д.т.н. Глухих В.В., д.т.н. Шкуро А.Е, к.т.н. Трошин Д.П., к.т.н. Дождиков С.А., к.т.н. Баулина Н.С. и другие.

Цель исследования — получить и исследовать свойства экологически чистого, структурно-ориентированного древесно-композиционного материала, общеконструкционного назначения на основе эпоксидного связующего с карданолсодержащим основанием Манниха.

Задачи исследования:

1. Провести синтез оснований Манниха, удовлетворяющих проектным нормам (заданным характеристикам).
2. Подтвердить протекание реакции Манниха, определить структуры полученных продуктов синтеза, определить амин-протон эквивалентный вес синтезированных оснований Манниха.
3. Получить и изучить свойства эпоксидных связующих с карданолсодержащими основаниями Манниха; трехслойной березовой фанеры на основе полученных связующих, выбрать связующее для дальнейшего исследования.
4. Получить структурно-ориентированный древесно-композиционный материал с выбранным связующим, изучить влияние технологических параметров на его свойства, оптимизировать технологические параметры с целью получения древесного композита с улучшенными свойствами.
5. Получить гибридные композиционные материалы на основе структурно-ориентированного древесно-композиционного материала с карданолсодержащей эпоксидной матрицей, изучить влияние состава гибридных древесных композитов на их свойства.
6. Провести промышленную апробацию результатов исследования и дать экономико-экологическую оценку полученного композита и связующего.

Объект исследования — карданолсодержащее основание Манниха и структурно-ориентированный древесно-композиционный материал с эпоксидной матрицей на его основе.

Предмет исследования — разработка способа синтеза карданолсодержащего основания Манниха с заданными проектными нормами и технологии изготовления структурно-ориентированного древесно-композиционного материала с карданолсодержащей эпоксидной матрицей; изучение свойств полученных древесных композитов и оптимизация технологических параметров с целью получения древесного композита с улучшенными характеристиками; экономико-экологическая оценка полученного древесного композита.

Научная новизна исследования:

1. Впервые получен и исследован новый экологически чистый древесный композит общеконструкционного назначения – структурно-ориентированный древесно-композиционный материал на эпоксидном связующем с карданолсодержащим основанием Манниха.

2. Разработана технология изготовления экологически чистого структурно-ориентированного древесного композита общеконструкционного назначения с карданолсодержащим эпоксидным связующим.

3. Получены регрессионные модели зависимостей свойств нового древесного композита от технологических факторов.

4. Получены рациональные значения технологических факторов при производстве нового древесного композита.

5. Впервые получены и исследованы новые слоистые, гибридные древесные композиты на основе экологически чистого структурно-ориентированного древесно-композиционного материала на эпоксидном связующем с карданолсодержащим основанием Манниха.

Теоретическая значимость исследования:

– выявлено влияние мольного соотношения и типа амина на показатели синтезированных оснований Манниха;

– определены структуры полученных оснований Манниха спектральными методами анализа – ЯМР, ИК;

– апробирован метод определения амин-протон эквивалентного веса методом дифференциально-сканирующей калориметрии для карданолсодержащего основания Манниха; полученные результаты верифицированы с результатами спектральных методов анализа;

– выявлено влияние типа амина на свойства полученной трехслойной березовой фанеры;

– построены регрессионные модели свойств нового древесного композита от технологических факторов;

– построены регрессионные модели свойств гибридов нового древесного композита от его состава;

– использованы непараметрические методы машинного обучения для выявления зависимости состав-свойство гибридов нового древесного композита;

– вычислен теоретически предотвращенный экологический ущерб атмосферному воздуху как компоненту природной среды при использовании карданола в качестве компонента для синтеза фенолкамина и карданолсодержащего связующего для изготовления древесного композита.

Практическая значимость исследования:

– разработан метод промышленного синтеза карданолсодержащего основания Манниха с заданными проектными нормами;

– апробирован и верифицирован метод определения амин-протон эквивалентного веса карданолсодержащего основания Манниха методом дифференциально-сканирующей калориметрии;

- разработан метод промышленного получения экологически чистого, структурно-ориентированного древесно-композиционного материала на основе эпоксидного связующего с карданолсодержащим основанием Манниха;
- определены оптимальные параметры технологического процесса изготовления нового древесного композита;
- разработана технология получения гибридов нового древесного композита.

Методология и методы диссертационного исследования. При выполнении работы использованы теоретические знания о признаках классификации композиционных материалов; способах изготовления композиционных материалов; влиянии типа и количества компонентов, объема межфазного слоя, ориентации армирующих элементов и их морфологии на свойства композитов; макро- и микроструктуре древесины, ее химическом строении; механизме реакции образования оснований Манниха; химико-технологических процессах органической химии; химической реакции формирования полимерной матрицы из эпоксидно-диановой смолы и отвердителей аминного типа; способах интерпретации инфракрасных спектров; технике и технологии прессования; методах математической статистики, способах написания кода для реализации методов математической статистики в среде VSCode на языке Python.

Для определения физико-механических показателей, свойств продуктов синтеза, материалов, полимерных матриц, композитов использованы стандартные методики ТУ 20.59.59-1686-55778270-2018 с изм.1, ГОСТ Р 57779, ГОСТ Р 55135, ГОСТ 9621, ГОСТ 3916.1, ГОСТ 4650, ГОСТ 24621, ГОСТ 27325, ГОСТ 4651, ГОСТ Р 56785, ГОСТ Р 56805, ГОСТ 56799, ГОСТ 4647.

Для обработки результатов экспериментов применялись методы математической статистики; методы математического моделирования и оптимизации с использованием универсальных вычислительных сред MSExcel, Statgraphics Centurion XV, а также скриптов на языке Python в среде VSCode.

Положения выносимые на защиту:

1. Амин-протон эквивалентный вес карданолсодержащих оснований Манниха может быть определен через температуру стеклования отвержденной композиции, найденной методом дифференциально-сканирующей калориметрии.
2. Впервые получен новый экологически чистый древесно-композиционный материал общеконструкционного назначения.
3. Впервые полученные древесные композиты можно отнести к трансверсально-изотропным композиционным материалам общеконструкционного назначения.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается достаточным количеством экспериментального материала и его обработкой с использованием современных вычислительных сред, а также положительными результатами апробации в промышленном производстве.

Личный вклад автора: постановка целей и задач работы, подбор сырья и выбор объектов исследований, планирование и проведение экспериментов, анализ результатов экспериментов, разработка экспериментально-статистических моделей свойств композитов, интерпретация и обобщение полученных данных в виде научных публикаций и патента.

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности. Результаты, выносимые на защиту, относятся к пунктам 2 «Химия, физикохимия и биохимия основных компонентов биомассы дерева и иных одревесневших частей растений, композиты, продукты лесохимической переработки» и 4 «Технология и продукция в деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих производствах» паспорта научной специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

Апробация результатов исследования. По результатам исследований получен патент РФ на изобретение № 2832284 «Способ изготовления структурно-ориентированного древесно-композиционного материала» от 23.12.2024.

Результаты исследований апробированы на предприятиях:

Публичное акционерное общество «Уралхимпласт» – выпуск опытно-промышленной партии карданолсодержащего основания Манниха Кардамин Д-1.2;

Общество с ограниченной ответственностью «Вагонский деревообрабатывающий завод» – выпуск опытно-промышленной партии древесного композита № 22.

Результаты работы доложены и рассмотрены на XI Международной научно-технической конференции «Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики» (Екатеринбург, 2017), XI Всероссийской научной конференции «Химия и технология растительных веществ» (Сыктывкар, 2019), Всероссийской научной конференции (с международным участием) преподавателей и студентов вузов «Актуальные проблемы науки о полимерах» (Казань, 2020), 23-ей Международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития производства древесных плит» (Балабаново, 2020), Всероссийской V научно-технической конференции-вебинара «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2020), XVI Международном евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (Екатеринбург, 2021), XIII Международной научно-технической конференции «Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2021), II Всероссийской научной конференции (с международным участием) преподавателей и студентов вузов «Актуальные проблемы науки о полимерах» (Казань, 2021), XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России»

(Екатеринбург, 2022), XVII Международного Евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (Екатеринбург, 2022), XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции «Научное творчество молодежи - лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2024), XIX Международного евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (Екатеринбург, 2024).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них 4 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, получен патент на изобретение.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 172 страницах машинописного текста, состоит из введения, шести глав и заключения. Список литературы включает 148 источников, из них 73 отечественных и 75 иностранных авторов. Иллюстративный материал представлен 48 рисунками, 46 таблицами, 19 формулами и 6 приложениями.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы ее основная цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава содержит литературный обзор по теме исследования. В главе выделены признаки, которые могут быть использованы для классификации композиционных материалов, на основе выделенных признаков показано, что древесно-композиционные материалы являются экологически чистыми материалами, раскрыто влияние строения и типа компонентов на свойства композиционных материалов, рассмотрено состояние исследований по получению древесно-композиционных материалов с карданолсодержащими адгезивами, показано, что древесно-композиционные материалы с карданолсодержащей эпоксидной матрицей являются экологически чистыми композитами. В главе приведены данные по строению, получению и способам модификации карданола, а также рассмотрен механизм реакции Манниха и подробно описаны способы получения различных карданолсодержащих оснований Манниха.

Во **второй главе** приведены характеристики использованных в работе веществ, материалов, компонентов, оборудования, методик исследования и программного обеспечения.

В **третьей главе** приводятся результаты исследований по изучению закономерностей получения карданолсодержащих оснований Манниха (феналкаминов) с заданными проектными нормами от мольного соотношения и типа используемого амина (этилендиамин, диэтилентриамин, изофорондиамин) (Таблица 1).

Феналкамины 1.1, 2.1 и 3.1 соответствуют предъявляемым требованиям на 33%, 33% и 83% соответственно; феналкамины 1.2, 2.2 и 3.2 соответствует

предъявляемым требованиям на 100%, 83% и 67% соответственно; феналкамины 1.3, 2.3 и 3.3 соответствует предъявляемым требованиям на 67%, 67% и 83% соответственно.

С учетом соответствия (более 80%) предъявляемым требованиям феналкамины 1.2, 2.2 и 3.1 были охарактеризованы методом инфракрасной спектроскопии (ИК) и методами ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

В полученных ИК-спектрах, выделены основные общие характеристические полосы поглощения: 3283-3297 см^{-1} – валентные колебания –ОН групп; 3000-3014 см^{-1} – валентные колебания =С-Н в алк(-ен)ильном заместителе; 1609-1623 см^{-1} – валентные колебания ароматического кольца; 1574-1588 см^{-1} – валентные колебания -NH_x- групп; 1387-1401 см^{-1} – валентные колебания -N-C- групп; 903-917 см^{-1} – СН неплоское колебание, концевая НRC=CH₂; 718-732 см^{-1} – маятниковые колебания -CH₂- групп в алк(-ен)ильном заместителе.

Таблица 1 – Показатели синтезированных феналкаминов 1.1-3.3

Фен-алк-амин	Мольное соотношение К:Ф:А	Внешний вид	Динамическая вязкость, мПа·с	Аминное число, мгКОН/г	Массовая доля воды, %	Свободный карданол, %	Срок хранения
Проектируемая норма		Однородная прозрачная жид-ть без механических включений	2000-3000 при 25°C	350-400	Не более 2,0	Не более 10,0	Не менее 1,0
1.1	1:1:1	соотв.	801 при 25°C	206	0,8	19,9	≤1 месяц
1.2	1: 2: 2	соотв.	2431 при 25°C	371	0,8	6,2	≥1 года
1.3	1: 3: 3	соотв.	3301 при 25°C	430	1,0	2,1	≥1 года
2.1	1:1:1	соотв.	323 при 25°C	264	0,8	18,8	≤1 месяц
2.2	1: 2: 2	соотв.	701 при 25°C	447	0,9	7,1	≥1 года
2.3	1: 3: 3	соотв.	1800 при 25°C	532	0,8	3,3	≥1 года
3.1	1:1:1	соотв.	359 при 50°C	229	0,1	19,3	≥1 года
3.2	1: 2: 2	соотв.	2501 при 50°C	320	0,1	6,7	≥1 года
3.3	1: 3: 3	соотв.	5445 при 50°C	367	0,3	2,8	≥1 года

По результатам зарегистрированных спектров ЯМР ¹H, ¹³C для феналкаминов 1.2 и 3.1 можно однозначно утверждать о присоединении этилендиаминового и изофородиаминового фрагмента к молекуле карданола. Так, в спектре ЯМР ¹H по сравнению с исходным спектром карданола в области 3,83-2,42 м.д. зарегистрированы сигналы NCH₂ метиленовых протонов, причем,

анализ интегральной интенсивности указывает на присоединение как минимум двух фрагментов $-CH_2-NH(CH_2)-NH-$ к одной молекуле карданола.

Однозначно определить структуру синтезированных фенолкаминов 1.2, 2.2 и 3.1 не представляется возможным по причине образования нескольких продуктов синтеза, в том числе и возможных дополнительных продуктов олигомеризации, но можно предположить, что синтезированные фенолкамины имеют следующие структуры (Рисунок 1).

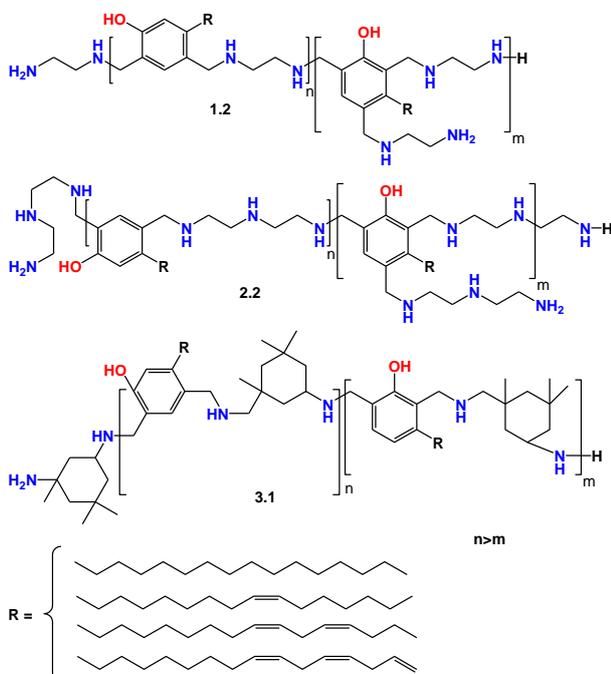


Рисунок 1 – предполагаемые структуры фенолкаминов 1.2 и 3.1

Изучение физико-технологических свойств эпоксидно-диановых связующих С-1, С-2 и С-3 с полученными фенолкаминами 1.2, 2.2 и 3.1 позволило сделать вывод, что показатель «Плотность при 25°C» для С-1 составил 1015 кг/м³, для С-2 – 1023 кг/м³ и для С-3 – 1009 кг/м³; показатель «Время гелеобразования» для связующего С-3 больше в 3-10 раз (в зависимости от температуры), чем для связующих С-1 и С-2, по причине того, что фенолкамин 3.1 обладает меньшим количеством первичных аминогрупп или таковые отсутствуют совсем; предпочтительной температурой совместной переработки древесного материала и связующих С-1, С-2

является температура 100-125°C, для С-3 125-150°C.

Изучение физико-механических свойств трехслойной березовой фанеры с эпоксидно-диановыми карданолсодержащими адгезивами С-1, С-2 и С-3 позволило сделать вывод о невозможности изготовления древесно-композиционного материала с повышенными эксплуатационными характеристиками на основе связующего С-3, так как образцы фанеры разрушились при температурно-влажностной обработке, а образцы фанеры, полученные с использованием связующих С-1 и С-2, показали высокие значения предела прочности при скалывании по клеевому слою (превышение составило ≈200% от нормы для фанеры с использованием фенолформальдегидных смол).

Стоит отметить высокие значения когезионного разрушения древесины при использовании связующего С-1 и С-2 (≈ 60%), при этом разрушение большинства образцов при испытании на скалывание происходило не по клеевому слою, а по древесине. Прочностные характеристики трехслойной фанеры на связующем С-1 превосходят прочностные характеристики трехслойной фанеры на связующем С-2 на 3,9-9,1%.

Учитывая полученные результаты прочностных характеристик образцов трехслойной березовой фанеры с использованием связующих С-1, С-2 и С-3, результаты синтеза фенолкаминов (Таблица 1), а также тот факт, что процесс

вакуумной сушки протекает в более «мягких» условиях за счет температуры кипения этилендиамина (117-119°C при 101,3 кПа), для дальнейшего исследования был выбран фенолкамин 1.2 и соответственно связующее С-1.

Одним из важных параметров аминных отвердителей эпоксидных смол (ЭС) является амин-протон эквивалентный вес (АНЕВ, г/экв), который позволяет рассчитать стехиометрическое соотношение ЭС:аминный отвердитель. Исходя из предполагаемой структуры фенолкамин 1.2, было предположено, что АНЕВ = 91 г/экв, а также АНЕВ был найден для фенолкамина 1.2 через температуру стеклования отвержденных композиций состава 100:37,4-53,5 (ЭС:фенолкамин 1.2) методом дифференциально-сканирующей калориметрии и составил 92,5 г/экв. Стоит отметить, что отклонение амин-протон эквивалентного веса (найденного с помощью температуры стеклования) от предполагаемого (исходя из предложенной структуры фенолкамина, 1.2) составило 2,67%.

Для удобства дальнейшей работы было выбрано рабочее соотношение ЭС:отвердитель = 100:50 м.ч., что соответствует амин-протон эквивалентному весу, равному 93,5 г/экв.

Было показано, что КЭМ превосходит эпоксидную матрицу с ПЭПА по таким показателям как «Разрушающее напряжение при сжатии», «Разрушающее напряжение при изгибе», «Разрушающее напряжение при растяжении», «Разрушающее напряжение при сдвиге» и «Ударная вязкость по Шарпи» на 50%, 52%, 56%, 24% и 69% соответственно, а показатель «Водопоглощение, при 23±2°C за 24 часа» уменьшился на 77%.

В **четвертой** главе приведены результаты по получению и изучению физико-механических свойств СОДКМ с КЭМ, оптимизации технологических факторов с целью получения композита с улучшенными характеристиками, влиянию геометрии армирующего элемента на свойства СОДКМ с КЭМ с улучшенными характеристиками.

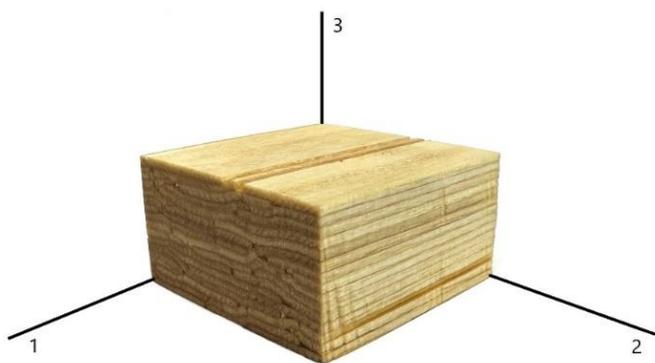


Рисунок 2 – Образец СОДКМ (опыт №12) с указанием осей симметрии материала

Для изучения влияния технологических факторов, давления, температуры и время прессования (P , T , τ) на свойства СОДКМ с КЭМ был проведен трехфакторный эксперимент. Матрица плана эксперимента представляет собой трехфакторный ортогональный, центрально-композиционный план Бокса-Уилсона с пятью опытами на нулевом уровне, план матрица

эксперимента был сформирован средствами программного пакета Statgraphics Centurion XV.

Найденные значения свойств для каждого опыта (№1-19) из плана эксперимента были усреднены.

Коэффициенты корреляции Пирсона между свойствами СОДКМ (C_2 , B_2 , I_2 и S_{12}) и (C_3 , B_3 , I_3 и S_{13}) для пар свойств положительны и значимо больше 0 ($C_2/C_3 = 0,9712$; $B_2/B_3 = 0,9718$; $I_2/I_3 = 0,8928$ и $S_{12}/S_{13} = 0,9527$), а Р-значение значительно меньше 0,001. Для дальнейшего анализа решено было воспользоваться критерием Стьюдента для парных сравнений средних значений прочностных свойств СОДКМ (C_2/C_3 , B_2/B_3 , I_2/I_3 и S_{12}/S_{13}).

В результате проведенного анализа можно сделать выводы, что свойства (С, В, I) статистически неразличимы в осях 2 и 3; свойство (S) статистически не различимо в плоскостях 1-2 и 1-3; и как следствие, плоскость 2-3 является изотропной (Рисунок 2).

При изучении полученных статистических данных был сделан вывод о том, что СОДКМ можно отнести к трансверсально-изотропным материалам. Поэтому при дальнейшем анализе использовались только значения свойств D, WA, TC, C_1 , C_2 , B_1 , B_2 , I_1 , I_2 , S_{12} и S_{23} .

Для нахождения экспериментально-статистических моделей свойств СОДКМ была принята регрессионная модель линейного полинома второй степени.

Средствами программного пакета Statgraphics был проведен регрессионный анализ полученных результатов эксперимента, в результате которого были получены β -коэффициенты, позволяющие оценить относительный вклад каждого независимого фактора в предсказание свойств СОДКМ (Таблица 2).

Таблица 2 – Параметры полученных уравнений регрессии

Факторы	Натуральные β -коэффициенты уравнений регрессии										R^2
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{11}	β_{22}	β_{33}	β_{12}	β_{13}	β_{23}	
D	342,95	29,48	1,28	1,12	2,52	0	0	0	0	0	0,98
WA	31,88	-0,85	-0,08	0	-0,08	0	0	0	0	0	0,85
TC	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0,99
C_1	-380,71	5,37	0	0	0	0	0,06	0	-0,11	0,04	0,95
C_2	33,08	3,72	0,21	0	0,24	0	0	0	-0,10	0	0,90
B_1	-0,171	0,03	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0,55
B_2	51,29	0,21	0	0	0	0	-0,01	0	-0,02	0	0,88
S_{12}	-19,69	1,79	0	0	0	0	0	0,06	0	0	0,58
S_{23}	-86,52	1,16	0	0	0,17	0	0	0	0	0,01	0,72
I_1	-2154,22	-4,63	-0,72	0	2,80	0,06	0,30	0	0,37	0	0,90
I_2	1515,37	-27,97	-4,40	0	8,05	0	0	0	0	0	0,64

Примечание: D – плотность, кг/м³; WA – водопоглощение за 24 ч, %; TC – теплопроводность, Вт·(м/К); C_1 – разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси 1, МПа; C_2 – разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси 2, МПа; C_3 – разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси 3, МПа; B_1 – разрушающее напряжение при трехточечном изгибе вдоль оси 1, МПа; B_2 – разрушающее напряжение при трехточечном изгибе вдоль оси 2, МПа; B_3 – разрушающее напряжение при трехточечном изгибе вдоль оси 3, МПа; S_{12} – разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 1-2, МПа; S_{13} – разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 1-3, МПа; S_{23} – разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 2-3, МПа; I_1 – ударная вязкость вдоль оси 1, кДж/м²; I_2 – ударная вязкость вдоль оси 2, кДж/м²; I_3 – ударная вязкость вдоль оси 3, кДж/м².

Для поиска рациональных значений технологических факторов (P , T , τ), обеспечивающих получение СОДКМ с максимальными значениями плотности, теплопроводности, прочностных свойств и с минимальным значением водопоглощения, средствами программного пакета Statgraphics была проведена оптимизация композиционной функции, а также была построена поверхность отклика целевой функции (Рисунок 3).

Результаты оптимизации композиционной функции позволили предположить, что в изученной области факторного пространства возможно получение материала с заданными характеристиками при $x_1=1,471$ ($P=14$ МПа), а также что на поверхности отклика можно наблюдать два экстремума А и Б.

Значения композиционной функции для данных экстремумов соответственно равны 0,819206 и 0,828085. Координаты вершин экстремумов равны А ($x_2=-1,471$; $x_3=-1,113$) и Б ($x_2=1,442$; $x_3=0,396$), что соответствует натуральным значениям факторов $T_A=50^\circ\text{C}$, $\tau_A=64$ мин. и $T_B=100^\circ\text{C}$, $\tau_B=79$ мин.

Форму поверхности отклика и наличие экстремума А, соизмеримого по высоте с экстремумом Б, можно объяснить присутствием шумового фактора, которым является тепловой эффект реакции отверждения связующего С-1.

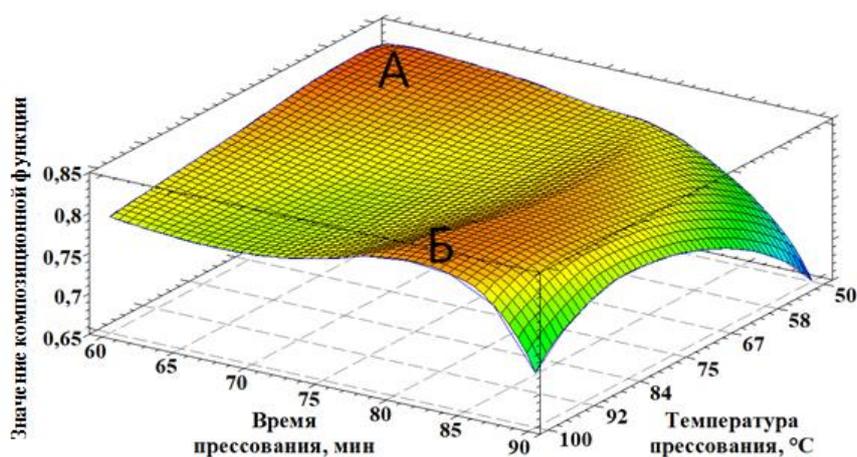


Рисунок 3 – Расчетная поверхность отклика целевой, композиционной функции, при $P=14$ МПа

Используя найденные значения факторов экстремумов А и Б, были изготовлены образцы СОДКМ №20, №21 соответственно, полученные значения физико-механических свойств приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства полученных материалов СОДКМ №20, 21 и 22

Материал	D	WA	TC	C ₁	C ₂	B ₁	B ₂	S ₁₂	S ₂₃	I ₁	I ₂
СОДКМ №20	1021	14,77	0,168	111,9	43,2	0,92	8,2	25,4	20,7	315	1551
СОДКМ №21	1217	6,78	0,192	147,9	66,9	0,84	6,5	49,2	27,8	253	1338
СОДКМ №22	1445	5,90	0,223	153,3	69,9	0,88	7,0	51,4	29,4	264	1424

Полученные значения характеризуются удовлетворительным соответствием между расчетными и фактическими значениями показателей свойств СОДКМ №20 (соответствие заявленным характеристикам составило 55,7%) и хорошее для СОДКМ №21 (соответствие заявленным характеристикам составило 89,4%). Условиям поставленной задачи соответствует вершина экстремума СОДКМ №21 (экстремум Б).

В рамках изучения влияния геометрии (ширины) армирующего элемента на свойства СОДКМ были изготовлены образцы СОДКМ №22 со значениями технологических факторов для экстремума Б.

Анализ результатов полученных значений свойств СОДКМ №22 (Таблица 3) позволил сделать вывод, что уменьшение ширины ламели в четыре раза приводит к изменению физических свойств (D , WA и TC) на +15,78%, -14,94% и +13,79% соответственно, а прочностных свойств (C_1 , C_2 , B_1 , B_2 , S_{12} , S_{23} , I_1 , I_2) в среднем на +4,92%. Данный факт можно объяснить тем, что с уменьшением ширины ламели происходит увеличение площади контакта фаз, составляющих материал, объемной доли межфазного слоя, а также пенетрации связующего С-1 в массу древесного материала.

В пятой главе приведены результаты по получению и изучению физико-механических свойств слоистых, гибридных СОДКМ с КЭМ, выявление зависимости «состав-свойство» полученных слоистых, гибридных СОДКМ с КЭМ методом симплексных решеток и методами машинного обучения.

Для получения слоистых, гибридных древесно-композиционных материалов были использованы такие листовые материалы, как угле-, стекло-, арамидные пластики, титан, резина, поликарбонат, полиэтилен и СОДКМ №23.

Листы СОДКМ №23 толщиной 2 мм были получены аналогично СОДКМ №22. Содержание карданолсодержащей эпоксидной матрицы составило ≈ 27 % массовых.

Для нахождения зависимостей «состав-свойство» полученных гибридных материалов использовались непараметрические модели машинного обучения – «Дерево решений» и «Случайный лес», а также линейная экспериментально-статистическая модель, построенная с помощью симплексных решеток в виде полинома первой степени.

Полученные значения были проанализированы с использованием программного пакета Statgraphics Centurion XV, в результате были найдены линейные коэффициенты уравнений, описывающих зависимость свойств D_i , WA_i и E_i от состава композиционного материала (Таблица 4).

Таблица 4 – Параметры полученных уравнений регрессии

Факторы	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	R^2
D_i	0,07	0,19	0,26	0,10	0,01	0,00	0,70	0,03	0,98	98,71
WA_i	0,89	0,00	0,03	0,12	-0,02	-0,08	0,06	0,01	-0,13	89,25
E_i	0,05	0,46	0,11	0,19	0,01	-0,02	0,01	-0,05	0,91	90,30

Примечание: D_i – плотность; $кг/м^3$; WA_i – водопоглощение за 24 ч, %; E_i – модуль упругости при трехточечном изгибе поперек пласти, ГПа.

Непараметрические методы машинного обучения были реализованы в среде VSCode. В результате были найдены оптимальные значения параметров каждой обучаемой модели по каждому свойству. Критериями для оптимизации являются коэффициент детерминации и средняя абсолютная ошибка, выраженная в процентах (MAPE). В результате непараметрические модели показали высокую эффективность при определенных параметрах моделирования.

В шестой главе рассмотрены технико-экономические и экологические вопросы производства СОДКМ с КЭМ. Разработанные материалы Кардамин Д-1.2 и СОДКМ №22 успешно прошли стадию промышленной апробации (синтез связующего, изготовление композита), а экономическая оценка инвестиционного проекта показала его эффективность.

В ходе проведения данного исследования и апробации его результатов была разработана блок-схема производства фенолкамина 1.2, СОДКМ №22 и слоистых, гибридных композиционных материалов, рисунок 4.

На блок-схеме приведены производственные этапы, позиции оборудования и потоки сырья.

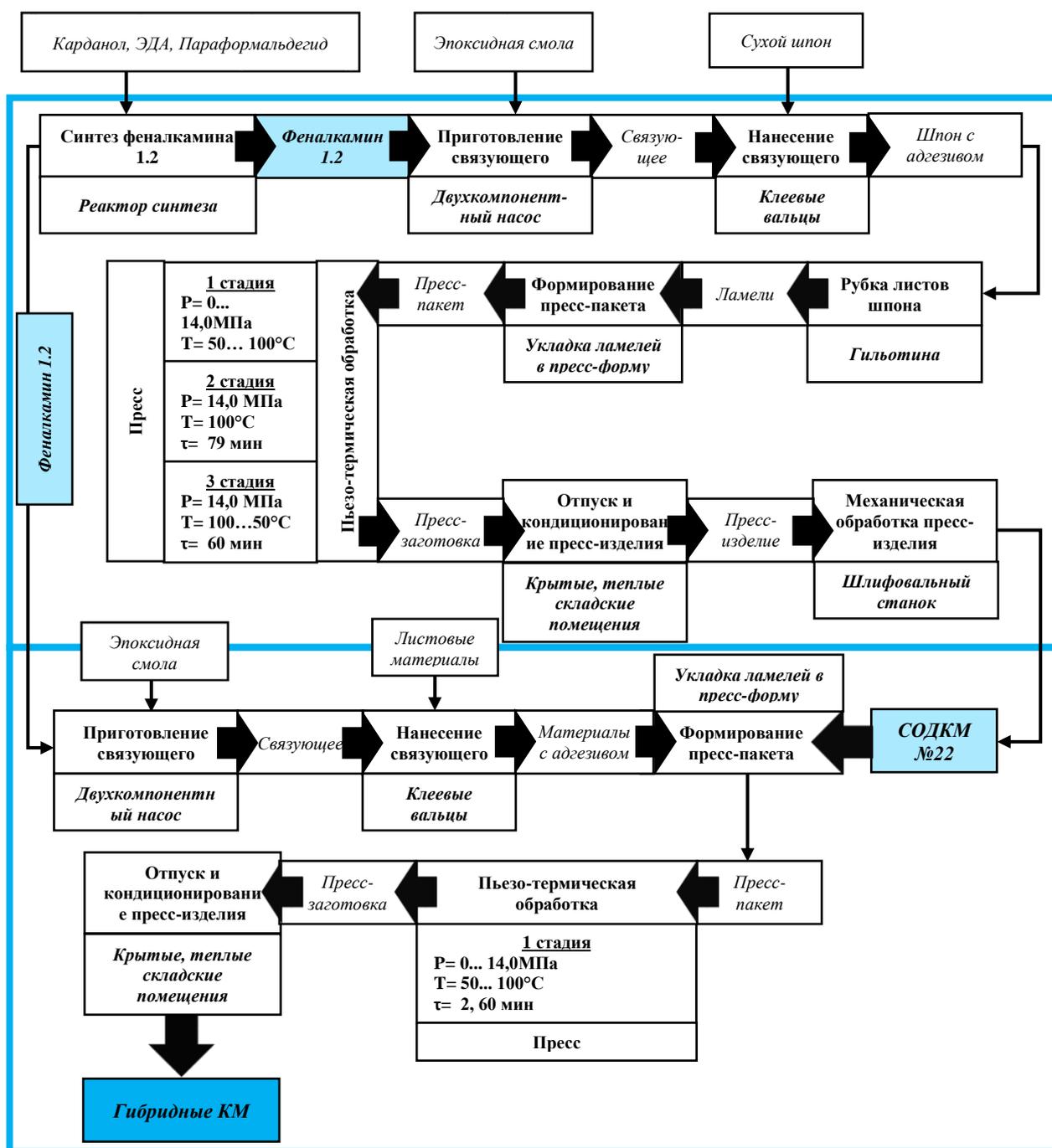


Рисунок 4 – Блок схема производства фенолкамина 1.2, СОДКМ №22 и гибридных КМ

Для получения фенолкамина 1.2 предлагается использовать технологию синтеза прошедшую апробацию на ПАО «Уралхимпласт», и подробно изложенную в 3 главе диссертационного исследования.

1. Загрузка в реактор карданола (1 моль) и этилендиамина (2 моль).

2. Порционная загрузка параформальдегида (2 моль), в течение 120 минут при температуре не более 90-100°C.

3. Конденсация при температуре 110-115°C в течение 60 минут.

4. Вакуумная сушка (0,1-15 кПа) до температуры 85-115°C.

Для получения СОДКМ №22 предлагается использовать технологию получения прошедшую апробацию на ООО «Вагонский деревообрабатывающий завод», и подробно изложенную в 4 главе диссертационного исследования.

1. Приготовление связующего С-1 в соотношении (ЭС:отвердитель |100:50).

2. Нанесение связующего на листы березового шпона с двух сторон, расход связующего – 125 г/м².

3. Рубка листов с нанесенным связующим на ламели шириной 5,0 мм;

4. Формирование пресс-пакета в пресс-форме путем укладки ламелей плоскопараллельно друг-другу и дну формы, с разбежкой швов.

5. Трех-стадийное прессование, первая стадия: набор давления до 14,0 МПа в течение 2 минут, затем разогрев пресс-формы до 100°C в течение 60 минут; вторая стадия: выдержка при давлении 14,0 МПа и температуре 100°C в течение 79 минут; третья стадия: охлаждение пресс-формы с заготовкой при давлении 14,0 МПа до температуры 50°C в течение 60 минут.

6. Отпуск и кондиционирование пресс-изделия для снятия остаточных напряжений в материале после его пьезо-термической обработки в течение суток при температуре 20-25°C и относительной влажности воздуха 65±5%.

7. Механическая обработка пресс-заготовок – шлифовка.

Для получения гибридных, слоистых композитов предлагается использовать технологию получения, подробно изложенную в 5 главе диссертационного исследования:

1. Приготовление связующего С-1 в соотношении (ЭС:отвердитель |100:50);

2. Нанесение связующего на листы материалов со стороны склеивания, расход связующего – 125 г/м²;

3. Формирование пресс-пакета путем укладки листов материалов в холодную пресс-форму плоскопараллельно друг другу и дну формы.

4. Одностадийное прессование: давление 2,5 МПа, температура 25-30°C время прессования 240 минут.

5. Отпуск и кондиционирование пресс-изделия для снятия остаточных напряжений в материале после его пьезо-термической обработки в течение суток при температуре 20-25°C и относительной влажности воздуха 65±5%.

Использование карданола в качестве основного компонента связующей системы позволяет значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду. Расчеты, проведенные в рамках работы, показали теоретическое предотвращение экологического ущерба атмосферному воздуху.

Разработанный и апробированный древесный композит является экологически чистым и может быть использован в качестве общеконструкционного, инженерного, дизайнерского материала, расширяющего номенклатуру и ассортимент существующих древесных композитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Апробирован и верифицирован метод определения амин-протон эквивалентного веса (АНЕВ) карданолсодержащих оснований Манниха через температуру стеклования отверждённой композиции, найденную методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Полученное значение $АНЕВ = 93,5$ г/экв для феналкамина 1.2 подтверждено спектральными методами анализа (ИК и ЯМР), что позволяет точно рассчитывать стехиометрическое соотношение компонентов при формировании эпоксидного связующего.

2. Впервые получен и исследован новый экологически чистый древесно-композиционный материал общеконструкционного назначения – структурно-ориентированный древесно-композиционный материал (СОДКМ) на основе эпоксидного связующего с карданолсодержащим основанием Манниха («Кардамин Д-1.2»).

3. Установлено и доказано, что полученные древесные композиты относятся к трансверсально-изотропным композиционным материалам, что подтверждено статистическим анализом механических свойств в различных осях и плоскостях симметрии (оси 2 и 3 статистически не различимы по прочностным характеристикам).

4. Разработан метод синтеза карданолсодержащего основания Манниха «Кардамин Д-1.2» с заданными проектными нормами.

5. Показано, что трехслойная березовая фанера, полученная на связующем С-1 (феналкамин 1.2) превосходит по эксплуатационным характеристикам превосходит фанеру, полученную с феналкаминами 2.2 и 3.1. Показано что КЭМ по своим физико-механическим свойствам превосходит эпоксидную матрицу, полученную с использованием ПЭПА.

6. Создана и оптимизирована технология получения СОДКМ с использованием лущёного березового шпона, одноосной ориентации ламелей и пьезо-термической обработки в закрытой пресс-форме. Оптимальные параметры: давление 14 МПа, температура 100 °С, время выдержки 79 мин. Уменьшение ширины ламели с 20 мм до 5 мм повысило прочностные характеристики в среднем на 4,9 % и снизило водопоглощение на 14,9 %.

7. Построены регрессионные модели (полиномы 1–2 степени), описывающие зависимости физико-механических свойств СОДКМ от технологических факторов (давление, температура, время прессования). Модели адекватны ($R^2 \geq 0,50$; $P \leq 0,05$) и позволяют целенаправленно управлять свойствами материала.

8. Получены и исследованы новые слоистые гибридные композиты на основе СОДКМ, включая комбинации с угле-, стекло-, арамидными тканями, полимерами (ПЭ, ПК, резиной) и титаном. Построены регрессионные модели (полином 1 степени), описывающий зависимость физико-механических свойств

гибридов от их компонентного состава. Наилучшие результаты по предсказанию свойств ($МАРЕ \approx 15\%$) показали непараметрические методы машинного обучения: «Дерево решений» и «Случайный лес».

9. Выпуск опытно-промышленной партии «Кардамин Д-1.2» на ПАО «Уралхимпласт» подтверждает технологическую реализуемость процесса. Выпуск опытно-промышленной партии СОДКМ на ООО «Вагонский ДОЗ» подтверждает технологическую реализуемость процесса. Подтверждена экономическая целесообразность проекта: срок окупаемости 6 лет, индекс рентабельности инвестиций 1,14. Рассчитан предотвращенный экологический ущерб атмосферному воздуху: использование карданола в связующем позволило снизить потенциальный ущерб на сумму 7,4 млн руб./год.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИК	– инфракрасный
КЭМ	– карданолсодержащая эпоксидная матрица
СОДКМ	– структурно-ориентированный древесно-композиционный материал
С	– связующее
ТВО	– температурно-влажностная обработка
ЭС	– эпоксидная смола
ЯМР	– ядерно-магнитный резонанс
АНЕW	– амин-протон эквивалентный вес
LVL	– брус из клееного шпона
МАРЕ	– средняя абсолютная ошибка, выраженная в процентах
OSB	– ориентированная стружечная плита

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобр науки РФ:

1. Перспективные связующие для фанеры на основе эпоксидных систем с карданолсодержащими основаниями Манниха / **А. Ю. Тесленко**, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих, О. С. Ельцов // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 1(45). – С. 85-90. – DOI 10.18324/2077-5415-2020-1-85-90.

2. **Тесленко, А. Ю.** Исследование влияния технологических факторов на свойства лушено-рубленого древесно-композиционного материала (ЛРДКМ) с карданолсодержащей эпоксидной матрицей / **А. Ю. Тесленко**, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 1(61). – С. 138-146. – DOI 10.18324/2077-5415-2024-1-138-146.

3. Получение гибридных древесно-композиционных материалов с карданолсодержащей эпоксидной матрицей / **А. Ю. Тесленко**, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих, И. К. Некрасов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2024. – № 4. – С. 74-83.

4. Изучение физико-механических свойств карданолсодержащей эпоксидной матрицы / **А. Ю. Тесленко**, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих, О. С. Ельцов // Леса России и хозяйство в них. – 2025. – № 2(93). – С. 141-159.

Публикации в других изданиях:

5. **Тесленко А. Ю.** Синтез карданолсодержащего основания Манниха – перспективного отвердителя эпоксидных связующих для древесных композитов / **А. Ю. Тесленко**, О. Ф., Шишлов, В. В. Глухих // Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики : матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования и науки РФ, Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2017. – С. 315–317.

6. **Тесленко А. Ю.** Исследование процесса отверждения эпоксидных смол карданолсодержащим основанием Манниха – перспективного адгезива для получения древеснокомпозиционных материалов / **А. Ю. Тесленко**, О. Ф. Шишлов // Химия и технология растительных веществ: матер. XI Всероссийской науч. конф. / С-во образования и науки РФ, Инст. химии Коми НЦ УрО РАН ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. – Сыктывкар, 2019. – С. 220.

7. **Тесленко, А. Ю.** Синтез и Свойства карданолсодержащего основания Манниха на основе изофорондиаминна / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих** // Актуальные проблемы науки о полимерах : сборник трудов Всероссийской научной конференции (с международным участием) преподавателей и студентов вузов, Казань, 21–22 апреля 2020 года / Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2020. – С. 27.
8. **Тесленко А. Ю.** Влияние аминных отвердителей на физико-механические свойства фанеры с эпоксидным связующим / **А. Ю. Тесленко, О.Ф. Шишлов, В.В. Глухих** // Состояние и перспективы развития производства древесных плит : материалы 23-ей Международной научно-практической конференции, Балабаново, 18–19 марта 2020 года / Акционерное общество «Научно-исследовательский институт ВНИИДРЕВ» – Балабаново: НТО древпром, 2020. – С. 85-89.
9. **Тесленко, А. Ю.** Синтез карданолсодержащего основания Манниха и получение полимерного древесно-композиционного материала на его основе / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих** // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы Всероссийской V научно-технической конференции-вебинара, Санкт-Петербург, 16–18 июня 2020 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 251-253.
10. **Тесленко, А. Ю.** Применение эпоксидного связующего с карданолсодержащим основанием Манниха в производстве клееного бруса из параллельных волокон древесины (PSL) / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих** // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды XVI Международного евразийского симпозиума, Екатеринбург, 21–24 сентября 2021 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный лесотехнический университет», 2021. – С. 94-97.
11. **Тесленко, А. Ю.** Получение древесно-слоистого пластика с использованием карданолсодержащего основания Манниха / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих** // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса : материалы XIII Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 02–04 февраля 2021 года. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный лесотехнический университет", 2021. – С. 568-571.
12. **Тесленко, А. Ю.** Изучение влияния эпоксидной смолы на физико-механические свойства древесно-слоистого пластика с карданолсодержащим основанием Манниха / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих** // Актуальные проблемы науки о полимерах : Сборник трудов II Всероссийской научной конференции (с международным участием) преподавателей и студентов вузов, Казань, 25–26 мая 2021 года / Отв. редактор Н.Е. Темникова. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. – С. 123-124.
13. **Тесленко, А. Ю.** Влияние эпоксисовлачного связующего с карданолсодержащим основанием Манниха на получение пиломатериалов с параллельными прядями / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих.** – Текст : электронный // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет ; [ответственный за выпуск Л. В. Малютина]. – Екатеринбург, 2022. – С. 705–709.
14. **Тесленко, А. Ю.** Влияние типа связующего на свойства PSL / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих** // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : Труды XVII Международного Евразийского симпозиума, Екатеринбург, 13–16 сентября 2022 года. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный лесотехнический университет", 2022. – С. 153-156.
15. **Тесленко, А. Ю.** Экспериментально-статистические модели свойств луцено-рубленого древесно-композиционного материала (ЛРДКМ) с карданолсодержащей эпоксидной матрицей (КЭМ) / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих** // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России : Материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 01–14 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2024. – С. 809-813.
16. **Тесленко, А. Ю.** К вопросу о классификации ЛРДКМ / **А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов.** – Текст : электронный // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды XIX Международного евразийского симпозиума 18–20 сентября 2024 г. / под науч. ред. В. Г.

Новоселова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург, 2024. – С. 159–165.

ПАТЕНТ:

17. Патент RU2832284(C1) Российская Федерация. Способ изготовления структурно-ориентированного древесно-композиционного материала : заявл. 2024-04-12 : опубл. 2024-12-23 / А. Ю. Тесленко, О. Ф. Шишлов, Д. П. Трошин [и др.] : заявитель: Публичное акционерное общество «Уралхимпласт» – 12 с.

Отзывы на автореферат с заверенной подписью и указанием фамилии, имени отчества, почтового адреса, наименования организации, должности и ученой степени (с указанием шифра специальности, по которой была защищена диссертация) лица, составившего отзыв, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет 24.2.424.01, e-mail: d21228102@yandex.ru

Подписано в печать XX.12.2025 г. Объем 1,0 авт.л. Заказ № XXX. Тираж 100 экз.
ФБГОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»
620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37
Сектор оперативной полиграфии РИО