

*На правах рукописи*

*Иванов*

**Иванов Александр Михайлович**

**ТЕХНОЛОГИЯ СКЛЕИВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ПОРОШКООБРАЗНЫМИ  
КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНЫМИ КЛЕЯМИ**

05.21.05 – Дровесиноведение, технология  
и оборудование деревопереработки

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова» (СПбГЛТУ)

Научный руководитель

**Варанкина Галина Степановна**

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты

**Тамби Александр Алексеевич**

доктор технических наук, профессор  
кафедры Технология и оборудование  
лесного комплекса факультета  
лесного комплекса и землеустройства  
ФГБОУ ВО «Якутская государственная  
сельскохозяйственная академия»

**Миროнова Стефания Ивановна**

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-  
строительный университет»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Братский

государственный университет»

Защита состоится «16» мая 2019 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.212.220.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова» (194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У. главное здание, зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова и на сайте <http://spbftu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



к.т.н. Хитров Егор Германович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Основой развития и совершенствования производства композиционных материалов является выпуск конкурентоспособной продукции широкого ассортимента. В настоящее время перед отечественным производителем фанеры стоят задачи по увеличению объемов производства, повышению качества и конкурентоспособности облицованной фанеры, снижению ее токсичности. Решение этих задач основано на разработке новых и совершенствовании имеющихся материалов и технологий.

Современный рынок мебели в основном представлен продукцией, изготовленной из композиционных плитных материалов, облицованных синтетическими материалами. Синтетические материалы, несмотря на широкое разнообразие декоров, дают лишь циклическое повторение определенного рисунка и неспособны полностью воспроизвести текстуру натуральной древесины.

Высокая стоимость и дефицит древесины ценных пород ограничивают ее использование в цельном виде. Поэтому с целью удешевления продукции для облицовывания деталей из фанеры предлагается использовать строганый и лущеный шпон толщиной 0,2–0,3 мм. В настоящее время толщина применяемого шпона колеблется в диапазоне 0,5–1,0 мм. Однако существующее шпонострогальное оборудование позволяет получать высококачественный шпон толщиной до 0,2 мм. Попытки использовать шпон пониженной толщины наталкиваются на увеличение брака по причине просачивания клея на лицевую поверхность в процессе облицовывания.

Перспективным направлением является применение клеевых композиций из порошкообразных карбамидоформальдегидных смол. Порошкообразные полимеры имеют свои преимущества применения над жидкими клеями. Срок годности смолы в зависимости от фирмы-изготовителя составляет 6–12 месяцев. Стабильность физико-химических свойств жидких смол не превышает 8 недель. Поскольку приготовление клея происходит на предприятии, то возникает возможность контролировать вязкость, появляется возможность готовить клей с заранее заданными параметрами, в зависимости от его назначения.

Масса порошкообразного полимера на 1/3 меньше жидких карбамидоформальдегидных аналогов, поэтому условия транспортировки также упрощаются, поскольку сухие порошкообразные полимеры возможно перевозить всеми видами транспорта, включая грузовые вагоны. Несомненным достоинством является упрощение хранения смолы.

Производственные испытания на ОАО «Мантуровский фанерный комбинат» показали возможность улучшения технологических свойств порошкообразного клея, и он отличается от жидкого высокой липкостью и клеящей способностью.

В связи с этим, проблема склеивания и облицовывания тонким шпоном фанеры является актуальной и требует дальнейших исследований.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованием процессов склеивания и облицовывания фанеры занимались известные российские ученые: Азаров В. И., Баженов В. А., Бирюков В. Г., Варанкина Г. С., Исаев С. П., Кириллов А. Н., Куликов В. А., Угрюмов С. А., Чубинский А. Н.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является повышение качества фанеры, облицованной шпоном пониженной толщины.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать рецептуру клеевой композиции на основе порошкообразных карбамидоформальдегидных смол (ПКФС).

2. Исследовать технологические и эксплуатационные свойства модифицированных порошкообразных карбамидоформальдегидных смол (МПКФС) и оптимизировать их состав.

3. Обосновать параметры режимов склеивания и облицовывания фанеры модифицированными порошкообразными карбамидоформальдегидными смолами.

4. Исследовать физико-механические и эксплуатационные свойства облицованной продукции на модифицированных порошкообразных карбамидоформальдегидных смолах.

5. Исследовать и математически описать основные закономерности склеивания и облицовывания фанеры модифицированными клеями.

6. Исследовать процессы проникновения клея в древесину.

7. Провести промышленную проверку предложенных технических решений и обосновать их экономическую целесообразность.

**Научной новизной обладают:**

1. Теоретическое и экспериментальное обоснование технологических и эксплуатационных свойств клеевых композиций на основе модифицированной порошкообразной карбамидоформальдегидной смолы.

2. Обоснование и математическое описание процессов склеивания и облицовывания фанеры, исключая просачивание клея.

3. Обоснование применения криогенного метода для определения толщины клеевого соединения.

**Теоретическая значимость работы.** Для теории имеют значение:

1. Математико-статистические модели процессов склеивания и облицовывания фанеры модифицированными порошкообразными карбамидоформальдегидными клеями, препятствующими просачиванию связующего на поверхность шпона.

2. Экспериментальное доказательство применения криогенного метода для определения глубины проникновения клея в древесину.

**Практическая значимость.** Полученные результаты исследований могут быть использованы специалистами деревообрабатывающих производств при управлении технологическими процессами облицовывания. Разработанные составы клеевой композиции на основе МПКФС позволяют:

- 1) повысить прочность и качество облицованной фанеры;
- 2) ускорить процесс отверждения связующего;
- 3) сократить продолжительность облицовывания за счет уменьшения толщины шпона.

**Методология и методы исследования.** Исследования базировались на принципах системного подхода с использованием обоснованных методов и методик научного поиска; современных средств научного проникновения. Применение современных методов исследований, включая инфракрасную спектроскопию, дериватографию, электронную сканирующую микроскопию, поверенного оборудования, приборов и средств контроля, позволило раскрыть механизм модификации порошкообразных карбамидоформальдегидных смол и клеев, обосновать рецептуру клеевых композиций и оптимизировать процессы склеивания и облицовывания фанеры. Методологическую основу исследований составили базовые положения о древесине и методах исследований ее свойств, результаты размерно-качественных характеристик клееной древесины.

Информационную базу исследований составили: патентная информация; материалы периодических изданий; собственные научные исследования; материалы, представленные в сети Интернет.

**Положения, выносимые на защиту.** Основные научные положения, выносимые на защиту, можно классифицировать как научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на разработку ресурсосберегающей технологии склеивания и облицовывания фанеры с повышенными эксплуатационными характеристиками на основе МПКФС.

Указанные положения включают:

1. Порошкообразные карбамидоформальдегидные клеи, модифицированные смесью древесной муки и шунгитов, которые создают прочное клеевое соединение, не допуская просачивание клея на поверхность древесины.

2. Криогенный метод определения глубины проникновения клея в древесину не приводит к пересушке образцов при подготовке и проведению эксперимента в отличие от электронно-сканирующей микроскопии.

3. Математико-статистические модели, описывающие процессы склеивания и облицовывания фанеры.

**Степень достоверности.** Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается обоснованными упрощениями и корректными допущениями при разработке математических моделей; современными средствами научного проникновения, включая спектрофотометрию, электронно-сканирующую микроскопию, криогенный метод, дифференциально-сканирующую калориметрию, методами и средствами экспериментальных исследований, подтверждением адекватности разработанных моделей результатам испытаний, успешной апробацией результатов работы.

**Апробация.** Основные положения диссертации докладывались на международных научно-практических конференциях: «Актуальные

направления научных исследований XXI века: теория и практика», г. Воронеж, ВГЛТА, – 2014 г.; «Инновационная школа Sprungbrett» (г. Бихач (Босния и Герцеговина) – 2015 г.); «Леса России: политика, промышленность, наука, образование», г. Санкт-Петербург, СПбГЛТУ, – 2018 г.). Предложенный способ прошел производственные испытания на ООО «Леспром СПб», ООО «Кадуйский фанерный комбинат» и «Мантуровский фанерный комбинат».

По теме работы опубликовано 6 печатных работ, в том числе 5 работ в журналах, рекомендованных ВАК РФ, два патента на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 153 наименований, содержит 127 страниц основного текста; 23 рисунка; 16 таблиц, 3 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы и проведения исследований, а также оценка современного состояния проблемы. Приведены цель и задачи работы, научная новизна исследований, их теоретическая и практическая значимость, а также сведения о соответствии паспорту специальности.

**В первой главе** «Состояние вопроса. Цель и задачи исследований» проведен аналитический обзор современного состояния рынка клеев и облицовочных материалов, проведен анализ научных работ, направленных на уменьшение просачивания клея на лицевую поверхность фанеры. Для создания клеевой композиции предложена порошкообразная карбамидоформальдегидная смола, модифицированная смесью древесной муки и шунгита.

Применение смеси древесной муки и шунгита обосновано, поскольку древесная мука является наполнителем, снижающим стоимость клея, уменьшающим напряжения в клеевом слое, а шунгит является модификатором – сорбентом. Его структура позволяет активно участвовать в окислительно-восстановительных реакциях, обладает каталитическими и сорбционными свойствами.

Установлено, что повышение качества облицованной фанеры возможно при организации ресурсосбережения, которое может быть обеспечено путем использования тонких слоев шпона 0,2–0,3 мм, новых видов клеевых материалов на основе порошкообразных карбамидоформальдегидных клеев, модифицированных смесью древесной муки и шунгитов, повышающих вязкость клея. Применение данного клея исключает просачивание на лицевую поверхность, при этом сокращаются материальные, энергетические и трудовые затраты, длительность производственного цикла.

**Во второй главе** «Методика проведения исследований. Постановка задачи эксперимента» рассматриваются направления исследований, методики проведения экспериментов и обработки их результатов, приводятся

характеристики используемых материалов, методов и средств измерения, применяемого оборудования и приборов.

Исходные компоненты: порошкообразная карбамидоформальдегидная смола, смесь древесной муки и шунгитовых сорбентов. Полученные клеевые композиции исследовались с применением химического, рентгеноструктурного, дифференциально-термического и электронно-микроскопического анализа. Исследования по определению физико-химических свойств клея проводились в соответствии с ГОСТ 10632. Содержание свободного формальдегида в готовой продукции определяли перфораторным методом (ГОСТ 27678) и на газоанализаторе. Исследование клеевого слоя в просачивании клея проводились двумя методами: оптической микроскопией и компьютерной микротомографией.

Для измерения глубины проникновения клея в древесину и толщины клеевого слоя использовали поляризационный микроскоп РЭМ и томограф Bruker Sky Scan 2011. Степень отверждения исследовали путем применения спектрофотометром типа «Specord».

Для проведения экспериментов в лабораториях и на производстве использовали: для склеивания фанеры – березовый шпон толщиной 1,45 мм, изготавливали фанеру толщиной 4 мм марки ФК, для облицовывания – шпон дуба, махагони, березы толщиной 0,2–0,3 мм. Размеры образцов при проведении лабораторных экспериментов составили 500 × 500 мм.

Термограммы снимались на дериватографе системы Паулик, настроенной по стандартным образцам ДТА – 1/2, ДТГ – 1/10, ТГ – 500 мг. Расшифровку производили по стандартной методике. Электронно-микроскопические исследования выполнены в Санкт-Петербургском государственном университете с использованием растрового электронного микроскопа сверхвысокого разрешения JSM. Глубину проникновения клея в древесину измеряли на срезе с помощью криогенного метода. Эмиссию формальдегида в готовой продукции определяли перфораторным методом и с помощью газового анализа на ОАО «Леспром СПб». Для приготовления препаратов использовали метод водной суспензии.

Физико-механические свойства готовой продукции определяли согласно ГОСТ 9624–2009 «Древесина слоистая клееная. Метод определения предела прочности при скалывании», ГОСТ Р 53920–2010 «Фанера облицованная. Технические условия». Прочность склеенных образцов испытывали в лабораториях фанерных заводов «Леспром СПб», ООО «Кадуйский фанерный комбинат» и ОАО «Мантуровский фанерный комбинат».

Содержание свободного формальдегида в карбамидоформальдегидных смолах определяли с помощью фотоколориметрического метода. Готовую продукцию определяли на содержание свободного формальдегида при помощи газоанализаторного метода.

Физико-химические свойства клеевых композиций исследовали в соответствии с ГОСТ 20501 «Клеи для древесины. Метод определения технологических характеристик», угол смачивания определяли на основе из-

мерения размеров капли, а поверхностное натяжение – методом отрыва кольца.

Исследование характера отверждения клеев проводили методом инфракрасной спектроскопии, так как он дает возможность судить об изменениях в структуре клеевых композиций, возникающих при использовании модификаторов.

Оценка спектрограмм клеевых композиций осуществлялась по изменению интенсивности полос поглощения и наличию смещений их максимума.

Для оценки толщины клеевого слоя облицованной фанеры проведены исследования с помощью электронной микроскопии (РЭМ) с различным сочетанием клеевой композиции.

Для определения глубины проникновения клея в древесину использовали криогенный метод, который не приводит к пересушке образцов при подготовке и проведении эксперимента в отличие от электронно-сканирующей микроскопии и позволяет с помощью окрашивания вольфрамом определить химический состав полимера.

Постоянными факторами во всех экспериментах по облицовыванию шпона приняты:

толщина березового лущеного шпона	- $S=0,27$ мм
толщина строганого шпона из махагони	- $S=0,3$ мм
толщина строганого шпона из дуба	- $S=0,2$ мм
толщина березового лущеного шпона	- $S=1,45$ мм
влажность шпона	- $5,0 \pm 1,0$ %
толщина фанеры	- 4 и 9,5 мм
температура окружающей среды	- $20 \pm 2$ °C
слойность фанеры, облицованной строганым шпоном	- 5 и 9
шероховатость поверхности лущеного шпона, $R_m$ , не более	- 80–100 мкм
шероховатость поверхности строганого шпона, $R_m$ , не более	- 32 мкм
расход клея на основе порошкообразной смолы	- $125$ г/м <sup>2</sup>

Полученные экспериментальные данные описаны с помощью уравнений регрессии.

**В третьей главе** «Исследование свойств и обоснование рецептуры порошкообразного модифицированного карбамидоформальдегидного клея» обоснована рецептура клеевой композиции и доказана возможность использования порошкообразной карбамидоформальдегидной смолы, модифицированной смесью древесной муки и шунгитов для склеивания и облицовывания фанеры.

В соответствии с молекулярно-адсорбционной теорией адгезии, с увеличением площади контакта связующего и подложки повышается прочность клеевого соединения при условии смачивания им древесины. Древесину хорошо смачивают жидкости, у которых поверхностное натя-



жение меньше, чем у нее. Нами установлено, что критическое поверхностное натяжение у березового, дубового шпона и у махагони при влажности 6 % составляет 57,7–64,4 мН/м, что сопоставимо с поверхностным натяжением порошкообразных модифицированных карбаминоформальдегидных смол и свидетельствует о способности древесины смачиваться этими связующими.

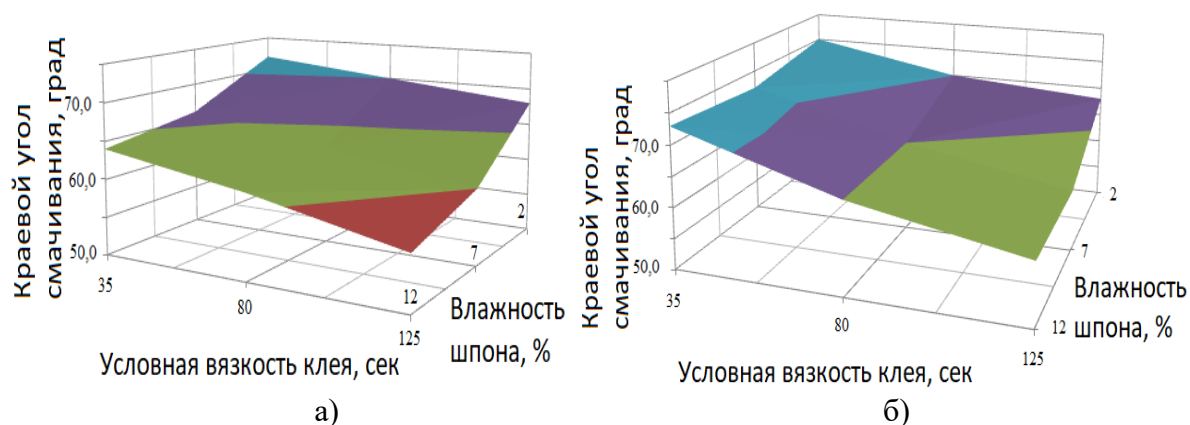
Результаты эксперимента по определению критического поверхностного натяжения древесины в зависимости от смачивающей способности клеевой композиции представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

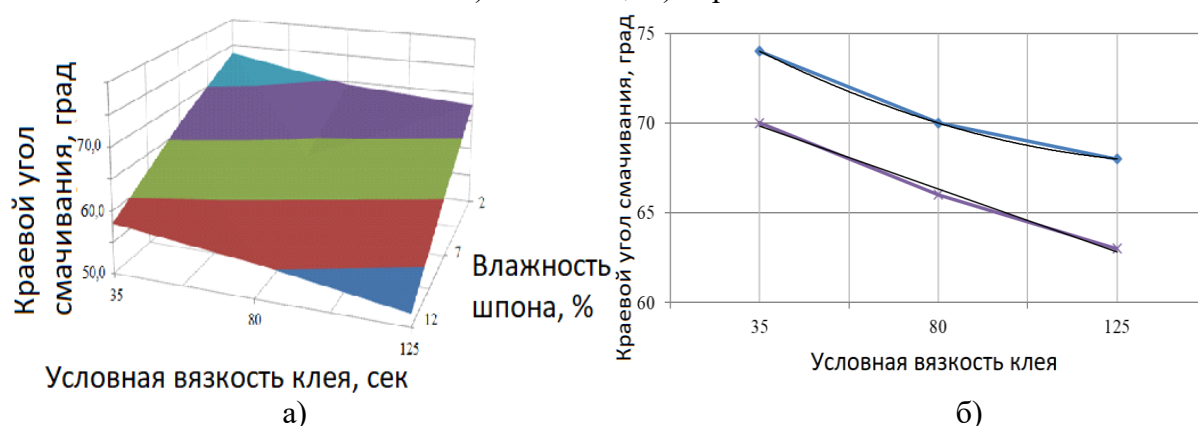
**Критическое поверхностное натяжение древесины разных пород в зависимости от смачивающей способности клеевой композиции**

Порода древесины	Среднее критическое поверхностное натяжение ПКФС, мДж/м <sup>2</sup>	Среднее критическое поверхностное натяжение МПКФС, мДж/м <sup>2</sup>
Махагони	57,7	58,2
Береза	60,4	61,4
Дуб	64,4	64,8

На смачивающую способность оказывают влияние: анатомическое строение, плотность, влажность и шероховатость шпона, условная вязкость клея (рис. 1, 2).



**Рис. 1.** Зависимость угла смачивания от условной вязкости клея и влажности шпона: а) махагони; б) береза



**Рис. 2.** Зависимость угла смачивания от условной вязкости клея и влажности шпона: а) дуба; б) зависимость краевого угла смачивания от условной вязкости клея для березы и махагони

Анализ результатов исследований показывает необходимость ограничения содержания смеси древесной муки и шунгита в клее для создания рабочей вязкости и условий межмолекулярного взаимодействия.

Зависимость смачивающей способности клея от влажности шпона и условной вязкости клея описывается уравнениями регрессии (1), (2):

$$\theta = 34,981 - 0,0337R_a - 0,4486W - 0,08\eta - 0,007R_aW - 0,0027W\eta + 0,00067R_a\eta + 0,0004R_aW\eta; \quad (1)$$

$$\sigma_{жг} = 55,177 - 0,0844R_a - 0,827W - 0,144\eta - 0,00261R_aW - 0,003W\eta + 0,0005R_a\eta + 0,0005R_aW\eta \quad (2)$$

при  $60 \text{ мкм} \leq R_a \leq 180 \text{ мкм}$ ;  $2 \% \leq W \leq 12 \%$ ;  $35 \text{ с} \leq \eta \leq 125 \text{ с}$ ,  
 где  $\theta$  – угол смачивания, град.;  $\sigma_{жг}$  – поверхностное натяжение клея, мН/м;  
 $R_a$  – шероховатость поверхности шпона, мкм;  $W$  – влажность шпона, %;  $\eta$  – условная вязкость клея, с.

Полученные уравнения регрессии позволяют определить рациональный состав клеевой композиции для склеивания и облицовывания фанеры:

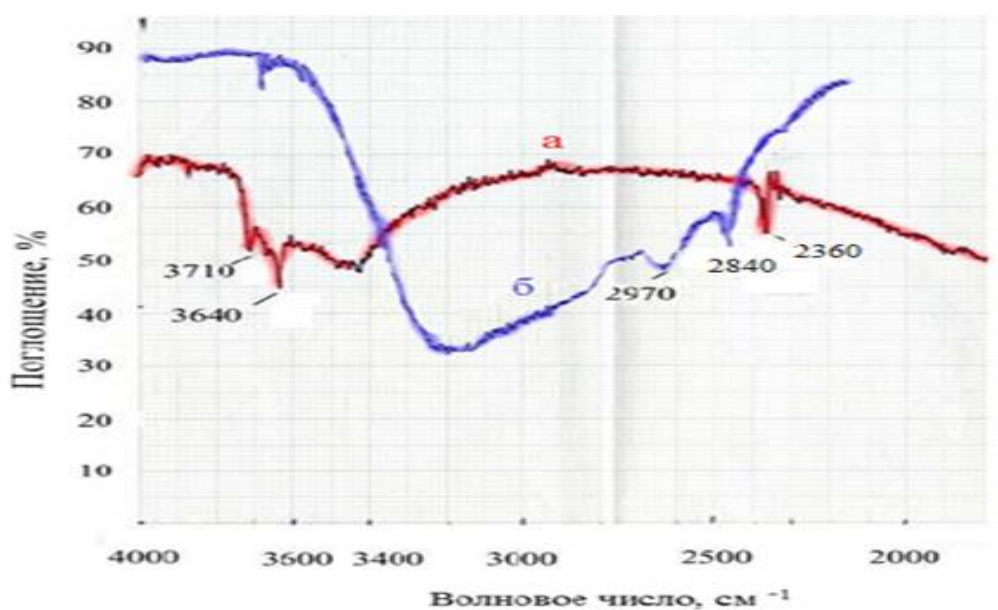
порошкообразная смола – 55–57 мас.ч.

вода – 43–45 мас.ч.

аммоний хлористый – 1 мас.ч.

смесь древесной муки и шунгита – 7,5 мас.ч. (3,75 % – древесная мука, 3,75 % – шунгиты).

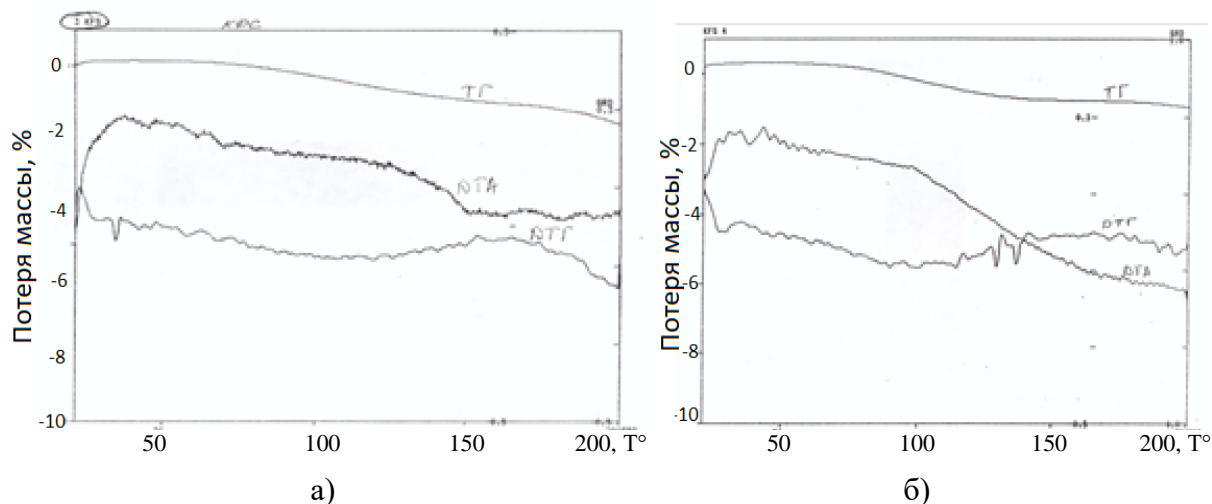
Для оценки характера действия смеси древесной муки и шунгитовых сорбентов снята спектрограмма ИК-спектра поглощения порошкообразной смолы без модификатора и с модификатором (рис. 3).



**Рис. 3.** ИК-спектры клея на основе порошкообразной смолы: а) порошкообразная карбамидоформальдегидная смола с 7,5 мас.ч. смеси; б) порошкообразная карбамидоформальдегидная смола без смеси

Спектральный анализ подтвердил, что смесь древесной муки и шунгитовых сорбентов является реакционноспособным веществом, способным связывать свободный формальдегид.

Проведя термический анализ смолы с помощью кривой дериватограммы ДТА (рис. 4), можно увидеть, что эндотермический эффект, т. е. полное испарение влаги с поглощением тепла, происходит при температуре  $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 4.** Результаты дериватограммы порошкообразного карбамидоформальдегидного клея: а) без модификатора; б) с модификатором

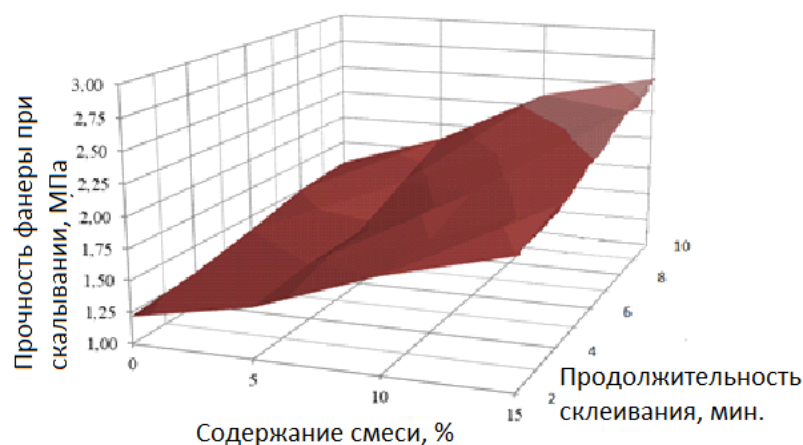
Термический анализ, проведенный с помощью метода дериватографии, подтвердил, что модификатор является реакционноспособным веществом и позволяет уменьшить время отверждения модифицированной смолы, тем самым снижает основной параметр режима склеивания – продолжительность прессования.

На основании результатов эксперимента (рис 1, рис 2 а) можно заключить, что в зависимости от породы и технологии получения шпона, предназначенной для облицовывания, смачивающая способность клея может изменяться в пределах 53–74 град., что необходимо учитывать при выборе параметров связующего.

**В четвертой главе** «Исследование и обоснование режимов склеивания шпона и облицовывания фанеры. Исследование клеевого слоя» представлены результаты экспериментального обоснования режимов склеивания и облицовывания фанеры.

Особенность предлагаемой технологии облицовывания заключается в том, что все операции, связанные с подготовкой клея к нанесению производятся в совокупности с процессом облицовывания, в результате чего сокращается производственный цикл, материальные, трудовые и энергетические затраты.

Основными прочностными показателями фанеры является прочность при скалывании по клеевому слою (рис. 5), а также содержание свободного формальдегида и визуальный осмотр лицевых слоев шпона на просачивание в готовой продукции.



**Рис. 5.** Прочность при скалывании по клеевому слою по сухому образцу в зависимости от содержания смеси и продолжительности склеивания

Для обоснования эффективности технологии склеивания и облицовывания фанеры проведен многофакторный эксперимент по облицовыванию фанеры лущеным и строганым шпоном с использованием МПКФС [уравнение (3), (4)].

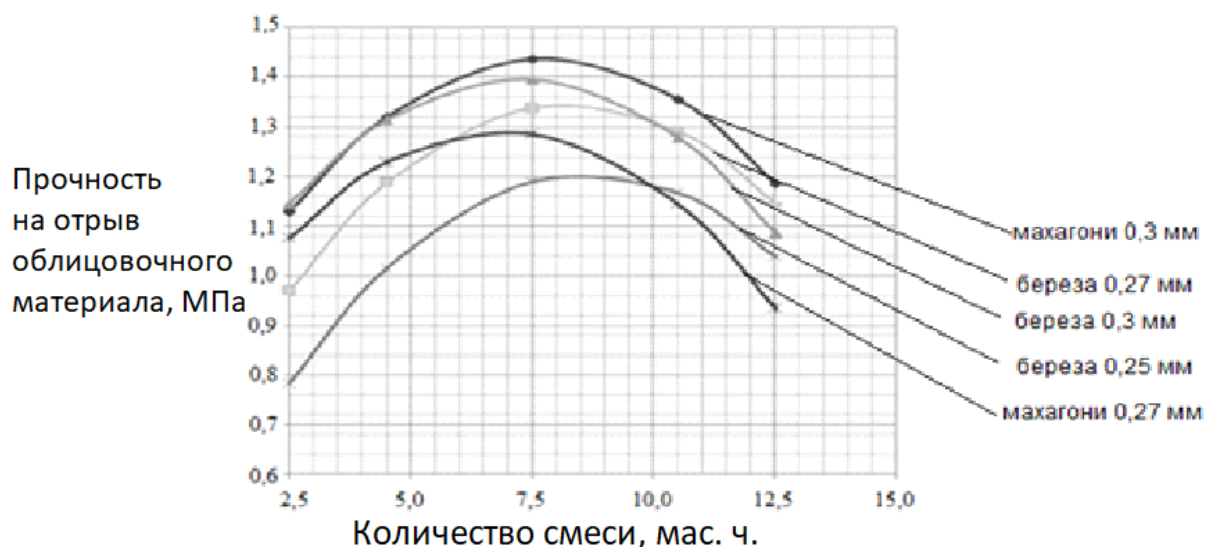
$$\sigma^{\text{скал}} = 1,792 - 0,004n + 0,057t; \quad (3)$$

$$m = 0,16 - 0,0004n - 0,003t \quad (4)$$

при  $0 \% \leq n \leq 20 \%$ ;  $2 \text{ мин} \leq t \leq 10 \text{ мин}$ ,

где  $\sigma^{\text{скал}}$  – прочность при скалывании по клеевому слою, МПа;  $m$  – содержание свободного формальдегида в смоле, %;  $n$  – содержание наполнителя в смоле, %;  $t$  – продолжительность склеивания, мин.

На рис. 6 представлены графики зависимости предела прочности на отрыв облицовочного материала от количества смеси (древесной муки и шунгита).



**Рис. 6.** Зависимость прочности на отрыв облицовочного материала от количества смеси древесной муки и шунгитового сорбента

Введение смеси позволяет увеличить прочность на отрыв облицовочного материала, но до определенного предела. При введении смеси до 7,5 мас. ч. прочность увеличивается, а затем падает. Очевидно, введение смеси до определенного предела заполняет поры и микронеровности, увеличивает площадь контакта клея с поверхностью основы и шпона, поэтому обеспечивает образование сплошного клеевого слоя и уменьшает просачивание клея на лицевую поверхность. Однако чрезмерное количество смеси ухудшает смачивание древесины. Максимальные значения предела прочности при нормальном отрыве облицовочного материала получены при введении смеси 7,5–10 мас. ч. Содержание сухого вещества в клеевой композиции составило 54%.

Физико-механические показатели фанеры и содержание свободного формальдегида в готовой продукции, изготовленной с применением полученных клеевых композиций представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Физико-механические показатели облицованной фанеры,  
изготовленной с применением полученных клеевых композиций**

Показатели	Клеевые составы							Прото-тип
	1	2	3	4	5	6	7	
Прочность фанеры при скалывании по клеевому слою, $\tau_{ск}$ , МПа	2,2	2,2	2,3	2,48	2,4	2,43	2,5	2,2
Прочность фанеры при скалывании по клеевому слою после выдержки в воде в течение 24 час, $\tau_{ск}$ , МПа	1,54	1,54	1,56	1,96	1,6	1,6	1,9	1,5
Содержание формальдегида, мг на 100 г абс. сух. фанеры	3,4	3,1	2,8	2,3	2,8	2,5	2,3	7,8
Просачиваемость клея на наружные слои фанеры	-	-	-	-	-	-	-	-
Прочность на отрыв, МПа, строганый шпон махагоны $S=0,3$ мм	1,3	1,4	1,45	1,4	1,4	1,4	1,4	-
Прочность на отрыв, МПа, лущеный шпон березы $S=0,27$ мм	1,18	1,27	1,35	1,32	1,32	1,32	1,32	-

Для определения зависимости прочности фанеры и содержания в ней свободного формальдегида от влияющих факторов проведен полный факторный эксперимент. Переменные факторы и уровни их варьирования представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Переменные факторы и уровни их варьирования

Наименование фактора	Уровни варьирования факторов			Интервал варьирования
	верхний $X_{\max}$	нижний $X_{\min}$	основной $X_{\text{ср}}$	
Количество смеси $C_{\text{см}}$ , %,	15	2,5	7,5	2,5
Температура $T$ , °С,	125	105	115	10
Продолжительность $\tau$ , мин	5	3	4	1,0
Давление $P$ , МПа,	1,4	1,2	1,3	0,1

Эти зависимости могут быть записаны уравнениями регрессии (5)

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{\text{ск}}^{\text{сух}} &= 3,494 - 0,003C_{\text{см}} - 0,0012T - 0,004\tau \\
 \sigma_{\text{ск}}^{\text{М}} &= 3,367 - 0,001C_{\text{см}} - 0,0017T - 0,006\tau \\
 m_{\text{ф}} &= 2,376 - 0,005C_{\text{см}} - 0,006P - 0,0023T - 0,010\tau
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

при:  $2,5 \leq C_{\text{см}} \leq 15$   
 $1,2 \leq P \leq 1,4$   
 $105 \leq T \leq 125$   
 $3 \leq \tau \leq 6$

где  $\sigma_{\text{ск}}^{\text{сух}}$  – прочность на скалывание по клеевому слою (по сухому образцу), МПа;  $\sigma_{\text{ск}}^{\text{М}}$  – прочность на скалывание по клеевому слою (по мокрому образцу), МПа;  $m_{\text{ф}}$  – содержание свободного формальдегида в готовой продукции, мг/100 г;  $C_{\text{см}}$  – количество смеси древесной муки и шунгита, %;  $P$  – давление прессования, МПа;  $T$  – температура склеивания, °С;  $\tau$  – продолжительность прессования, мин.

Математическая модель прочности фанеры при статическом изгибе и скалывании от соотношения смолы в порошкообразном клее, продолжительности выдержки под давлением и температурой прессования представляет собой функцию трех переменных (6), (7):

$$\sigma_{\text{изг}} = 40,08 + 0,32n - 0,65\tau_{\text{выд}} - 0,09T; \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{ск}} = 1,40 - 0,0048n + 0,023\tau_{\text{выд}} + 0,0005T \quad (7)$$

при  $55 \text{ мас. ч.} \leq n \leq 65 \text{ мас. ч.}$ ;  $3,0 \text{ мин} \leq \tau_{\text{выд}} \leq 5,0 \text{ мин}$ ;  $105 \text{ °С} \leq T \leq 120 \text{ °С}$ , где  $\sigma_{\text{изг}}$  – предел прочности при статическом изгибе, МПа;  $\sigma_{\text{ск}}$  – предел прочности при скалывании по клеевому слою, МПа;  $n$  – соотношение смо-

лы в порошкообразном клее, мас. ч.;  $\tau_{\text{выд}}$  – продолжительность выдержки под давлением, мин,  $T$  – температура прессования, °С.

На основании полученных уравнений регрессии и достижения требуемой стандартами прочности склеивания фанеры и при минимальной эмиссии формальдегида предложены режимы склеивания фанеры марки ФОК (табл. 4), которые апробированы на ООО «Леспром СПб» и на ООО «Кадуйский фанерный комбинат».

Т а б л и ц а 4

**Режимы склеивания фанеры толщиной 4 мм на МПКФС**

Наименование влияющих факторов	Обозначение	Размерность	Показатели
Количество смеси	$C_{\text{см}}$	%	7,5
Температура плит пресса	$T$	°С	110
Продолжительность прессования	$\tau$	мин	3 ÷ 4
Давление плит пресса	$P$	МПа	1,3

При проведении эксперимента по существующим режимам облицовывания, количество клея, поглощаемого основой из фанеры, составляет 18–20 % от общего расхода и зависит от плотности фанеры, вязкости клея, продолжительности его контактирования в состоянии жидкой фазы с поверхностью основы.

В процессе прессования под действием давления клей проникает в полости древесины и, при наличии сквозных капилляров и трещин, выдавливается на лицевую поверхность шпона, образуя бесформенные пятна (рис. 7). Это явление, получившее название «просачивания», приводит к неисправимому браку деталей.

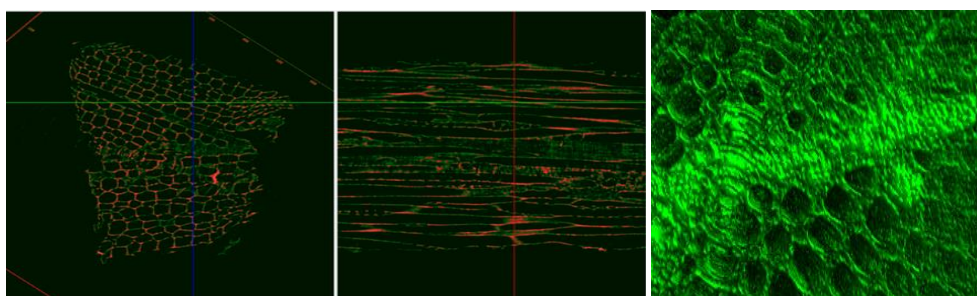


**Рис. 7.** Клей, просочившийся на лицевую поверхность шпона при толщине  $S=0,6$  мм

С уменьшением толщины шпона количество сквозных полостей увеличивается и вероятность просачивания клея на лицевую поверхность воз-

растает, поэтому в настоящее время минимальная толщина шпона, применяемого в мебельном производстве, составляет 0,6 мм.

С помощью оптического микроскопа установлено, что толщина клеевого соединения на модифицированном порошкообразном клее не равномерна по всей длине исследуемого сортимента, и изменяется в диапазоне до 122 мкм, а не модифицированном до 140 мкм. Определено, что при содержании в клеевой композиции древесной муки и шунгита, достоверная оценка толщины клеевого соединения затруднена, поскольку в процессе резания нож микротомы растирает по формируемой поверхности образца шунгитовые сорбенты. Для получения достоверной информации о структуре клеевого соединения, точной оценки его толщины использовали компьютерную томографию (рис. 8).



**Рис. 8.** Цифровое изображение клеевых соединений на основе карбамидоформальдегидной смолы с помощью компьютерной микротомографии при различном освещении при толщине шпона  $S=0,6$  мм.

Исследования проводились на микроуровне томографом Bruker Sky Scan 2011. Исследованию подлежали наиболее распространенные в деревообрабатывающей промышленности толщины шпона (0,6; 0,8; 1,0; 1,2 мм) для дуба, березы и махагоны. Результаты эксперимента и данные предприятий показали, что при использовании классических жидких клеев просачивание составляет 6,8 % от общего объема облицованных продуктов.

Традиционно принято разделять клеевое соединение на непосредственно сам клеевой слой и зону древесины, пропитанную клеем, что доказывается анализом объемных моделей клеевого соединения, представленных в табл. 5. Зона древесины, пропитанная клеем, представляет полости древесины, заполненные клеем.

Исследуемая порошкообразная модифицированная карбамидоформальдегидная смола удовлетворяет требованиям по прочности клеевого соединения 1,5–1,6 МПа, что соответствует прочности облицовочного материала при влажности 8 %. На прочность оказывает влияние зона древесины, пропитанная клеем, ее «площадь контакта» и глубина, а также природа самого клея, механизм перехода из жидкого состояния в твердое, адгезионная и когезионная прочности.



Параметры клеевого соединения МПКФС и ПКФС

Вид клея	Толщина клеевого соединения, мкм	Толщина клеевого слоя, мкм	Толщина зоны древесины, пропитанная клеем, мкм	Прочность клеевого соединения, МПа	Расход клея, кг/м <sup>3</sup>
ПКФС	140	56,2	83,8	1,5	125
МПКФС	122,1	76,2	45,9	1,5–1,6	125

Толщина клеевого соединения различна при разном сочетании клеевой композиции. В первом образце толщина клеевого слоя меньше и составляет 56,2 мкм, а с модификатором больше и равна в среднем 76,2 мкм. Различие в толщине клеевого слоя можно объяснить вязкостью клея. Для клеевой композиции с древесной мукой и шунгитовыми сорбентами толщина клеевого слоя составляет 76,0–77,0 мкм, а без модификатора 55,2–57,4 мкм (рис. 9).

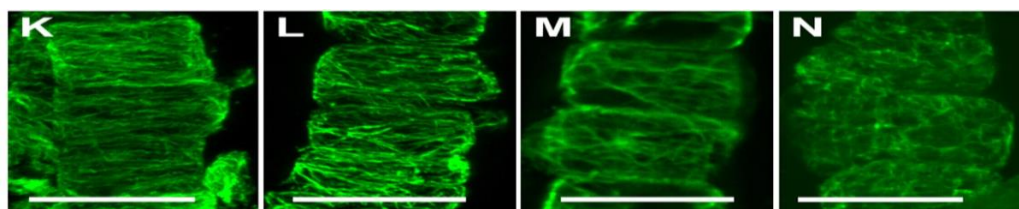


Рис. 9. а. К) Клеевой слой без модификатора; L) 3,5 % модификатора; М) 7,0 % модификатора; N) 10,5 % модификатора

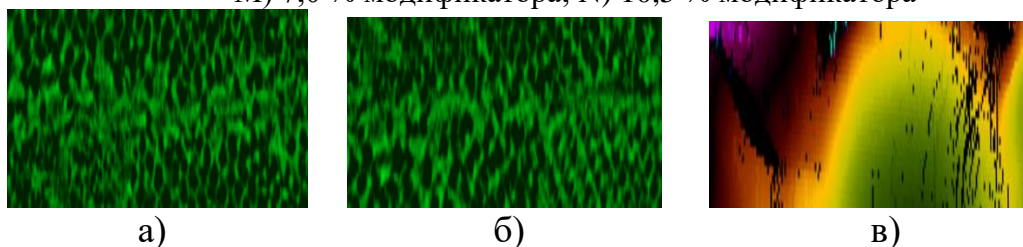


Рис. 9. б. Изображения клеевого слоя, полученные при использовании криогенного метода на МКФС связующем с различным сочетанием клеевой композиции: а) без модификатора; б, в) с модификатором

Криогенные методы позволяют получать изображения замороженных биологических образцов без их обезвоживания.

При помощи ультрамикротомов с лезвиями из полированного алмаза делали срезы тканей толщиной 30–40 нм. Смонтированные образцы окрасили с помощью шприца соединением вольфрама для усиления контраста отдельных компонентов клея или структуры древесины.

В результате исследований доказали, что толщина клеевого слоя увеличивается незначительно, а зона древесины, пропитанная клеем, уменьшается, поэтому просачивание клея на лицевую поверхность не происходит. Модификаторы повышают вязкость, поэтому их количество должно быть ограниченным. Условная вязкость модифицированного клея не должна превышать 125 с.

**В пятой главе** представлен расчет экономической эффективности предлагаемых технологических решений (табл. 6). Техничко-экономические расчеты подтвердили значительную экономию древесного сырья и снижения себестоимости строганого шпона при уменьшении его толщины.

Т а б л и ц а 6

**Техничко-экономические показатели по производству облицованной фанеры на модифицированном связующем**

Наименование показателей	Единицы измерения	По проекту
Объем производства экспериментальной фанеры	м <sup>3</sup>	1000
Полная себестоимость 1 м <sup>3</sup> экспериментальной фанеры	руб.	37 350
Полная себестоимость 1 м <sup>3</sup> фанеры марки ФОК	руб.	45 000
Прирост прибыли	тыс. руб.	17650

Отсутствие брака по причине просачивания клея на лицевую поверхность шпона, снижение толщины облицовочного шпона, снижение стоимости модифицированного клея на основе порошкообразной смолы позволяет сэкономить 9 млн 380 тыс. руб. на 1000 м<sup>3</sup> продукции.

### **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. Установлено, что повышение качества облицованной фанеры возможно путем использования тонких слоев шпона 0,2–0,3 мм, новых видов клеевых материалов, на основе модифицированных порошкообразных карбамидоформальдегидных смол. Применение порошкообразного карбамидоформальдегидного клея исключает просачивание на лицевую поверхность, при этом сокращаются материальные и трудовые затраты, длительность производственного цикла.

2. Рассмотрены вопросы адгезии порошкообразных карбамидоформальдегидных смол и поверхностных явлений применительно к производству облицованной фанеры, в результате чего рекомендована модификация порошкообразных карбамидоформальдегидных смол смесью древесной муки и шунгитовых сорбентов с целью снижения токсичности фанеры, изменения вязкости клея для уменьшения его просачивания на лицевую поверхность.

3. Получены математические зависимости краевых углов смачивания от поверхностного натяжения клеевой композиции применительно к различным породам шпона. Установлено, что критическое поверхностное натяжение у березового, дубового шпона и у махагони при влажности 6 % составляет 57,7–64,4 мН/м, что сопоставимо с поверхностным натяжением порошкообразных модифицированных карбамидоформальдегидных смол и свидетельствует о способности древесины смачиваться этими связующими.

4. Разработана рецептура клеевой композиции на основе порошкообразной карбамидоформальдегидной смолы, смеси древесной муки и шунги-

товых сорбентов, хлористого аммония  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , отличающаяся тем, что в качестве готовой смолы используется порошок, который разводится непосредственно перед нанесением на шпон, а не варится в реакторе. По результатам ИК-спектроскопии установлено, что смесь древесной муки и шунгитовых сорбентов является реакционноспособным веществом, способным связывать свободный формальдегид, а с помощью кривой дериватограммы ДТА можно увидеть, что эндотермический эффект, т. е. полное испарение влаги с поглощением тепла, происходит при температуре  $T = 140\text{ }^\circ\text{C}$  и способствует ускорению процесса отверждения клея.

5. Определены рациональные технологические режимы облицовывания фанеры с применением модифицированных порошкообразных клеевых композиций на основе карбамидоформальдегидных смол. Параметры режима облицовывания: температура плит пресса  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , давление прессования  $1,0\text{ МПа}$ , продолжительность облицовывания  $70\text{ с}$ .

6. Разработана методика замера толщины клеевого соединения с помощью криогенного метода для двух типов связующих: порошкообразной карбамидоформальдегидной смолы и модифицированной порошкообразной карбамидоформальдегидной смолы, отличающаяся тем, что криогенный метод определения глубины проникновения клея в древесину не приводит к пересушке образцов при подготовке и проведении эксперимента в отличие от электронно-сканирующей микроскопии.

7. Исследования, выполненные с помощью химического, газового, спектрального анализа и электронной сканирующей микроскопии, позволили объяснить механизм снижения эмиссии формальдегида смесью древесной муки и природными модификаторами. Механизм снижения заключается в сорбционной способности шунгитов. Эффект снижения токсичности карбамидоформальдегидных смол при введении в них шунгитов усиливается, благодаря его взаимодействию с водой, в результате которого выделяется атомарный кислород, окисляющий формальдегид.

8. Определена экономическая эффективность производства облицованной фанеры. Затрачиваемые на реконструкцию инвестиционные вложения окупаются за счет снижения производственных затрат и увеличения прибыли от реализации продукции. Использование лущеного и строганого шпона толщиной  $0,2\text{--}0,3\text{ мм}$  вместо  $0,6\text{ мм}$  для облицовывания фанеры по разработанной технологии позволит сэкономить  $32\%$  ценного древесного сырья, при этом себестоимость продукции снизится на  $17\%$ .

9. Основные технические разработки нашли отражение в технической документации, апробированы на фанерных предприятиях ОАО «Леспром СПб» и на ООО «Кадуйский фанерный комбинат», ОАО «Мантуровский фанерный комбинат».

## СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Варанкина, Г. С. Снижение токсичности древесных клееных материалов на основе модифицированных лигносульфонатами карбаминоформальдегидных смол [текст] / Г. С. Варанкина, Д. С. Русаков, А. В. Иванова, А. М. Иванов // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 3. (31) – С. 154–160.
2. Варанкина, Г. С. Склеивание осинового шпона модифицированной фенолоформальдегидной смолой [текст] / Г. С. Варанкина, Д. С. Русаков, И. В. Коваленко, А. М. Иванов, Г. П. Плотникова // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 4. (32) – С. 158–164.
3. Иванов, А. М. Облицовывание фанеры с применением порошкообразных клеев на основе карбаминоформальдегидных смол [текст] / А. М. Иванов, Д. С. Русаков, Г. П. Плотникова // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 2. (34) – С. 181–187.
4. Иванов, А. М. Модификация алюмосиликатами фенолоформальдегидных смол для склеивания фанеры [текст] / А. М. Иванов, Д. С. Русаков, Г. С. Варанкина, А. Н. Чубинский // Клеи. Герметики. Технологии. – 2017. – № 3. – С.13–17.
5. Русаков, Д. С. Исследование критического поверхностного натяжения и способности смачиваться древесины разных пород [текст] / Д. С. Русаков, А. М. Иванов, М. А. Чубинский, Г. С. Варанкина // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2017. – Вып. 221. – С. 271–281.

### Авторские свидетельства, патенты

1. Брутян, К. Г., Варанкина Г. С., Иванов А. М., Русаков Д. С., Соколова В. А., Коваленко И. В., Чубинский А. Н. / Модифицированная фенолоформальдегидная смола для производства древесных клееных материалов и способ изготовления модификатора // Патент на изобретение № 2016106675 от 25.02.2016 г.
2. Брутян, К. Г., Варанкина Г. С., Русаков Д. С., Иванов А. М., Чубинский А. Н. / Клеевая композиция на основе порошкообразных термореактивных полимеров // Патент на изобретение № 2016106673 от 16.03.2017 г.

### В прочих изданиях

1. Варанкина, Г. С. К вопросу о склеивании древесно-стружечных плит / Г. С. Варанкина, К. В. Чаузов, А. М. Иванов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – № 1. – С. 13–18.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 212.220.03 или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова.