

Шишкина Светлана Борисовна

**ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОГО
ЛАКОКРАСОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ДРЕВЕСНОЙ ПОДЛОЖКЕ**

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

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург 2024

Диссертационная работа выполнена на кафедре механической обработки древесины ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научный руководитель **Яцун Ирина Валерьевна** - доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор кафедры механической обработки древесины

Официальные оппоненты **Рыбин Борис Матвеевич** - доктор технических наук, профессор, Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры древесиноведения и технологии деревообработки

Лукаш Александр Андреевич - доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», профессор кафедры лесного дела и технологии деревообработки

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

Защита состоится «04» июля 2024 г. 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, зал заседаний Ученого совета – аудитория 401.

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

Автореферат разослан « » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Шишкина Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Влияние рентгеновского излучения в повседневной жизни человека постоянно изучается, но в большинстве исследований получены выводы о негативных последствиях воздействия проникающих видов волн на живые организмы и необходимости использования различных защитных материалов. Основными требованиями к защитным материалам являются: механическая прочность, стабильность форм и размеров, экологичность, радио- и химостойкость, высокие технико-эксплуатационные свойства и декоративность.

В качестве стандартной защиты от вредного воздействия рентгеновского излучения широкое распространение получили материалы на основе свинца. Основными недостатками данной группы материалов являются их токсичность, большой вес, сложность монтажа защитных конструкций.

Перспективным направлением в области создания композитов с защитными свойствами от рентгеновского излучения является разработка материалов (конструкций, составов), в которых в качестве несущей основы (или защитного слоя) выступают современные, технологичные и экологически безопасные компоненты. Древесина благодаря ее уникальным физико-механическим свойствам в подобных композициях может использоваться в качестве матрицы или подложки.

В ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» уже много лет ведутся работы по разработке и исследованию свойств композиционных материалов, которые можно отнести к линейке конструкционных материалов, в которых рентгенозащитные свойства обеспечиваются введением в структуру минерального наполнителя или прослоек из сплава Вуда. Разработанные материалы, как любые конструкционные, обладают низкими декоративными свойствами и требуют финишной отделки или декорирования. Отделку поверхности таких материалов можно осуществлять как без изменения показателей рентгенозащитных свойств, так и с их увеличением.

Проведенный литературный обзор показал, что повышение рентгенозащитных свойств за счет отделки поверхности может осуществляться лакокрасочными композициями, содержащими в своем составе такие компоненты, как отходы оптического стекла или модифицированные эпоксидные смолы. Таких материалов немного и практически все они имеют ряд технологических и эксплуатационных недостатков. Так, эпоксидные композиции имеют низкую адгезию к древесной подложке, ярко выраженное старение под воздействием ультрафиолетового излучения (желтизна покрытия, отслойка от подложки). Составы, в которых в качестве защитного наполнителя используются отходы оптического стекла, имеют повышенную шероховатость и серый «пыльный» цвет покрытия, что требует дальнейшей дополнительной отделки материалами, не обладающими радиационной стойкостью.

Композиции, относящиеся к группе строительных смесей, входящие в состав композиционных материалов, не имеют или имеют слабовыраженную адгезию к древесной подложке и обладают низкими технико-эксплуатационными

и декоративными свойствами, что существенно ограничивает область их применения. Также большинство полимерных покрытий не выдерживают обработку дезактивирующими и агрессивными моющими средствами, которая является обязательной в специфических помещениях (медицинские кабинеты, лаборатории контроля и т.п.).

На основании проведенного анализа был сделан вывод о том, что дополнительная отделка композициями, повышающими степень защиты от рентгеновского излучения в сочетании с высокими технико-эксплуатационными и декоративными свойствами для облагораживания поверхностей защитных материалов, является актуальным направлением научных исследований.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области защитных конструкционных и отделочных материалов занимались такие ученые, как Прошин А.П., Гришина А.Н., Сидоров Ю.Д., Быкова Э.В., Удалова О.А., Ветошкин Ю.И., Катранова З.Г., Гороховский А.Г., Яцун И.В. и др.

Цель работы. Формирование рентгенозащитного лакокрасочного покрытия на древесной подложке.

Задачи исследования:

1. Экспериментально-аналитически спрогнозировать время высыхания рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) на основе разработанной рентгенозащитной лакокрасочной композиции (РЗ ЛКК) на древесной подложке.

2. Разработать оптимальную и рациональную рецептуру РЗ ЛКК и исследовать свойства оптимального состава.

3. Исследовать технико-эксплуатационные и эстетические свойства рентгенозащитного покрытия, сформированного на древесной подложке и разработать технологический процесс его формирования.

4. Рассчитать экономическую эффективность предложенной разработки.

5. Провести опытно-промышленную апробацию технологического процесса изготовления продукции специального назначения с применением в качестве защиты от рентгеновского излучения разработанной РЗ ЛКК и внедрить результаты апробации в учебный процесс.

Предмет исследования. Разработка состава рентгенозащитной лакокрасочной композиции, закономерности формирования покрытия на ее основе на древесной подложке и оценка их технико-эксплуатационных характеристик.

Объект исследования. Рентгенозащитная лакокрасочная композиция и покрытие на ее основе.

Научной новизной обладают:

1. Разработанная лакокрасочная композиция, отличающаяся от схожих по рентгенозащитным свойствам составов наличием технико-эксплуатационных показателей жидких лакокрасочных материалов и адгезионных свойств к древесной подложке.

2. Впервые полученные результаты прогнозирования времени высыхания РЗ ЛКП на основе разработанной РЗ ЛКК на древесной подложке с использованием теоретических закономерностей кинетики высыхания твердого пористого тела.

3. Впервые полученные регрессионные модели зависимостей рентгенозащитных свойств и времени высыхания при естественной и конвективной сушке РЗ ЛКП, сформированного на древесной подложке, в зависимости от количества исходных компонентов РЗ ЛКК.

4. Впервые полученные оптимальные и рациональные значения количества исходных компонентов в рецептуре разработанной РЗ ЛКК.

5. Результаты впервые исследованных технико-эксплуатационных свойств оптимального состава РЗ ЛКК и РЗ ЛКП, сформированного на древесной подложке.

Теоретическая значимость заключается в том, что математически описаны процессы естественной и конвективной сушки разработанной рентгенозащитной композиции с точки зрения кинетики высыхания твердого пористого тела и подтверждены результатами практического эксперимента.

Практическая значимость заключается в том, что:

- разработана рецептура рентгенозащитной лакокрасочной композиции и определены ее свойства;
- определены свойства рентгенозащитного покрытия, сформированного на основе разработанной композиции на древесной подложке;
- определены параметры технологического процесса формирования рентгенозащитного покрытия на древесной подложке;
- разработан технологический процесс формирования РЗ ЛКП на основе РЗ ЛКК.

Методология и методы диссертационного исследования. Использованы теоретические закономерности кинетики сушки твердого пористого тела, метод оценки цифровых растровых изображений с применением графического редактора Photoshop для определения рентгенозащитных свойств покрытия, весовой метод для определения времени высыхания покрытия, стандартные методики для определения физико-механических показателей рентгенозащитной композиции и технико-эксплуатационных характеристик рентгенозащитного покрытия сформированного на ее основе. Для обработки результатов экспериментов применяли методы математической статистики, метод экспертной оценки, методы математического моделирования и оптимизации с использованием универсальных вычислительных сред MS Excel и MathCAD.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Для прогнозирования времени высыхания РЗ ЛКП на основе разработанной РЗ ЛКК с большим содержанием в своем составе минерального наполнителя представляется возможным использование теоретических закономерностей кинетики высыхания твердого пористого тела.

2. В процессе формирования РЗ ЛКП на основе РЗ ЛКК снижение скорости его высыхания обуславливается тем, что минеральный наполнитель (сульфат бария) одновременно выступает в роли влагоудерживающего агента и, тем самым увеличивает время «физического» высыхания технологического слоя.

3. При формировании рентгенозащитного покрытия на древесной подложке контактное взаимодействие на границе раздела сред (покрытие - древес-

ная подложка) носит адгезионный характер, т.к. его разрушение происходит по когезионному принципу внутри твердого пористого тела.

Степень достоверности результатов исследований основаны на теории кинетики высыхания твердого пористого тела, использовании фундаментальных положений теории ослабления рентгеновского излучения защитными материалами, вероятностно-статистических методах, методах оценки случайных погрешностей в измерениях, методах моделирования и оптимизации процессов деревообработки. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается достаточным количеством экспериментального материала и его обработкой с использованием современных вычислительных сред, а также положительными результатами апробации в учебный процесс и промышленное производство.

Апробация результатов работы. Результаты работы доложены, обсуждены и получили положительные оценки на научно-технической конференции студентов и аспирантов (г. Екатеринбург, 2005 г.); III, V и XX всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (г. Екатеринбург, 2007, 2009, 2024 г.г.); на I, V, VII, IX и XVII Международном Евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (г. Екатеринбург, 2006, 2010, 2012, 2014, 2022 г.г.); на VI международной научно-технической конференции «Урал промышленный – Урал полярный: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (г. Екатеринбург, 2007 г.); на международной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (г. Воронеж, 2014 г.); на VI всероссийской отраслевой научно-практической конференции «Инновации – основа развития целлюлозно-бумажной и лесоперерабатывающей промышленности (г. Екатеринбург, 2018 г.); на XII Международной научно-технической конференции «Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики» (г. Екатеринбург, 2019 г.).

Результаты исследований апробированы на ООО «Атом-Технология» г. Березовский и внедрены в учебные дисциплины «Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий» и «Специальные виды отделки» для обучающихся по направлению подготовки 35.03.02 и 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» профиль «Технология деревообработки».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 19 печатных работ, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов и рекомендаций, библиографического списка, включающего 118 наименований и 28 приложений. Общий объем работы оставляет 213 страниц, в том числе 179 страниц основного текста, 57 рисунков, 55 таблиц, 32 страницы приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту. Раскрывается научная новизна работы, значимость ее результатов для науки и практики. Содержатся данные о месте проведения работы, структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлен проведенный по литературным источникам анализ защитных отделочных материалов. Рассмотрен вопрос механизма ослабления рентгеновского излучения, поведение рентгенозащитных материалов в процессе воздействия проникающих видов волн и приведены требования, предъявляемые к ним.

Во второй главе приведены теоретические исследования прогнозирования времени высыхания рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) на основе разработанной рентгенозащитной композиции (РЗ ЛКК) на древесной подложке. Разработанная композиция на основе полимерного связующего – вододисперсионной акриловой краски (ВД-АК) и природного наполнителя – сульфата бария помимо своей экологичности позволяет обеспечить необходимую степень смачивания инертных и тяжелых по своей природе молекул сульфата бария и удерживать их во взвешенном состоянии достаточно продолжительное время, не нарушая при этом целостности цепочки полимера (Рисунок 1). Таким образом, ВД-АК в РЗ ЛКК выступает не только в роли связующего, но и разбавителя, т.к. уменьшает вязкость исследуемой груботертой композиции.

В процессе апробации был сделан вывод, что присутствие сульфата бария в объемах, сопоставимых или превышающих связующее, превращает композицию в процессе высыхания в твердое («камневидное») тело. Природа таких композиций схожа с растворами строительных смесей, а процесс их высыхания которых является «физическим», т.е. отверждение происходит только за счет испарения жидкости сначала с поверхности пленки, а затем из внутренних слоев (Рисунок 2).

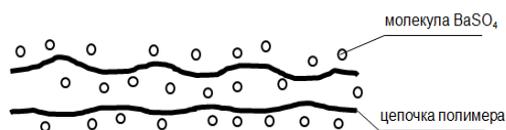


Рисунок 1 - Взаимодействие минерального наполнителя и связующего в разработанной РЗ ЛКК

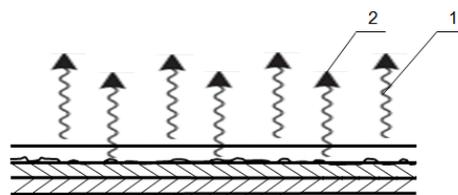


Рисунок 2 - Процесс «физического» высыхания РЗ ЛКК: 1 – испарение жидкости с поверхности пленки; 2 – испарение жидкости из внутренних слоев и стабилизация покрытия (усадка технологического слоя)

Температурно-временная характеристика процесса отверждения (высыхания) таких композиций предполагает, что сушка происходит в трех стадиях: нагрев (I), стабилизация (II), охлаждение (III) (Рисунок 3). Поэтому весь процесс высыхания покрытия условно можно разделить на два периода (Рисунок 4): сушка с постоянной скоростью (участок ВС) и с переменной скоростью (участок СЕ).

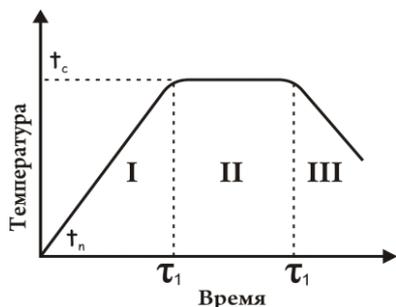


Рисунок 3 – Температурно-временная характеристика процесса высыхания покрытия

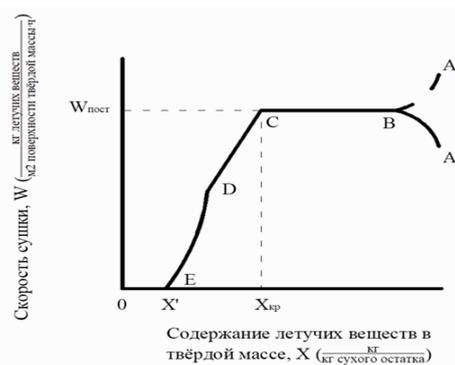


Рисунок 4 - Кривая процесса высыхания твердых тел: ВС – сушка с постоянной скоростью; СЕ- сушка с переменной скоростью

Уравнение скорости высыхания РЗ ЛКП описывается уравнением:

$$W = \frac{-LdX}{Ad\tau}, \quad (1)$$

где: W – скорость высыхания, кг летучих веществ/(м² поверхности твёрдой массы · ч);
 L – вес твёрдого покрытия (массы), считая на сухой остаток, кг;
 X – содержание летучих веществ в твёрдой массе, кг/(кг сухого остатка);
 A – площадь сушки, м²;
 τ – время сушки, ч.

За недостатком данных, часто кривую скорости высыхания между точками С и Е принимают за прямую линию, тогда уравнение (1) имеет вид:

$$W = m(X - X') = \frac{W_{\text{пост}}(X - X')}{X_{\text{кр}} - X'}, \quad (2)$$

где X' – равновесное содержание летучих веществ, кг/(кг сухого остатка);
 $X_{\text{крит}}$ – критическое содержание летучих веществ, кг/(кг сухого остатка);
 $W_{\text{пост}}$ – постоянная скорость высыхания, кг/(м² · ч).

Время высыхания РЗ ЛКП определяется согласно:

$$\tau = \frac{L(X_{\text{крит}} - X')}{W_{\text{пост}}A} \ln \frac{X_{\text{кр}} - X'}{X_2 - X'}. \quad (3)$$

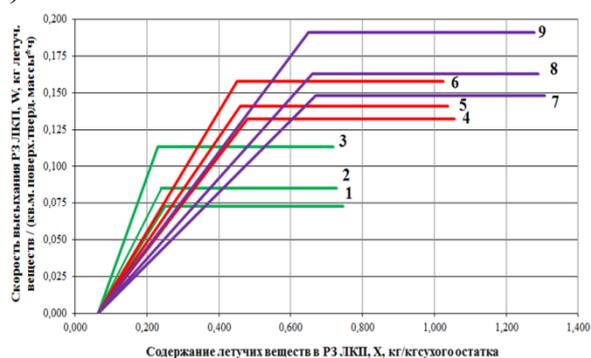
Для подтверждения теоретических закономерностей кинетики высыхания твердого пористого тела - РЗП, сформированного на основе разработанной РЗ ЛКК, использовались образцы фанеры марки ФК, размерами 18×20×5 мм, имеющих шероховатость поверхности 16 мкм. Нанесение слоя РЗ ЛКК толщиной 3 мм (как проявившего наиболее высокие показатели защитных свойств) осуществлялось шпателем вручную с использованием трафарета. Необходимые данные получены путем взвешивания образцов с интервалом 10 мин. до фиксации трех одинаковых показателей значений массы образца.

По результатам проведенных исследований построены зависимости скорости высыхания покрытия для 9 вариантов составов (таблица 1) при естественной (Рисунок 5а) и конвективной сушке (Рисунок 5б). На Рисунке 6 представлены графические зависимости продолжительности высыхания РЗ ЛКП в зависимости от содержания сульфата бария и связующего в составе РЗ ЛКК при естественной и конвективной сушке.

Таблица 1 – Варианты составов РЗ ЛКК

Компоненты композиции	Номер состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество наполнителя (сульфата бария), г	150			200			250		
Количество связующего (ВА-ДК), г	60	75	90	60	75	90	60	75	90
Количество дистиллированной воды, г	60								

а)



б)

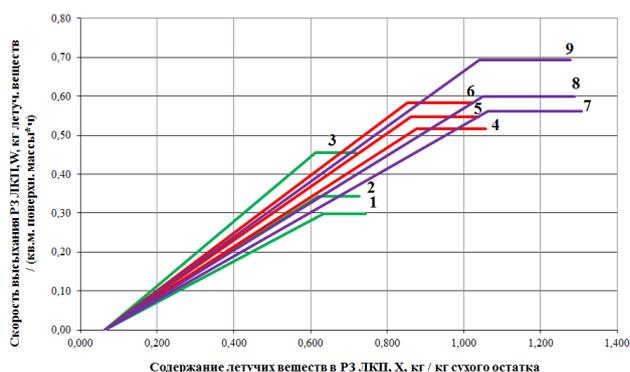
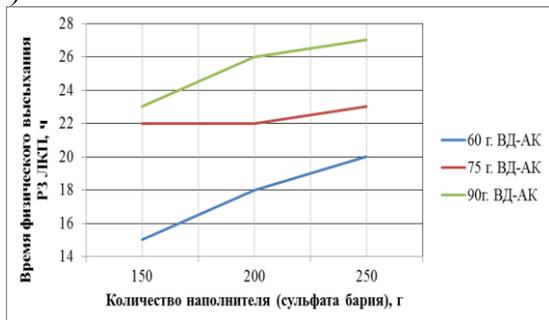


Рисунок 5 - Зависимость скорости высыхания РЗ ЛКП от содержания в составе сульфата бария и связующего (цифрами указан номер состава, содержание дистиллированной воды - постоянное): а) естественная сушка, б) конвективная сушка

а)



б)

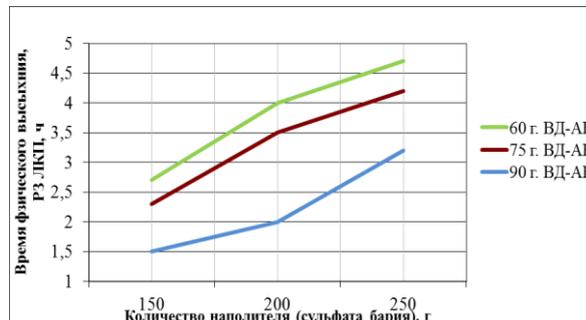


Рисунок 6 - Зависимость продолжительности высыхания РЗ ЛКП от содержания сульфата бария и связующего в составе РЗ ЛКК: а) естественная сушка; б) конвективная сушка

В третьей главе рассматриваются направления исследований, содержатся основные методические положения проведения экспериментальных данных и обработки их результатов, приводятся характеристики используемых материалов, применяемого оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры.

В исследованиях для формирования РЗ ЛКП в качестве древесной подложки использовалась березовая фанера марки ФК толщиной 5 мм, влажностью 8 ± 2 % (ГОСТ 3916.1-2018). В качестве связующего использовалась водорастворимая акриловая краска Акрэм-Комфорт-20 (ТУ 2316-014-0-31953544-00), наполнителя – барий сернокислый (ГОСТ 3158-75), разбавителя – вода дистиллированная (ГОСТ 6709-72).

Оценки физико-механических показателей РЗ ЛКК и технико-эксплуатационных характеристик РЗ ЛКП проводились по стандартным методикам. Рентгенозащитные свойства покрытия оценивались методом обработки

цифровых растровых изображений с применением графического редактора Photoshop, для определения времени высыхания покрытия использовался весовой метод, способность взаимодействия РЗ ЛКК с поверхностью древесного субстрата оценивалось величиной «краевого угла смачивания».

Полученные экспериментальные данные оценивались методами математической статистики, проверка однородности дисперсии опытов проводилась по критерию Кохрена, значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивалась критерием Стьюдента, адекватность модели – критерием Фишера. Для нахождения оптимальной рецептуры РЗ ЛКК использовался метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ), рациональной рецептуры - метод условного центра масс, степень согласованности мнений группы экспертов оценивалась с помощью коэффициента конкордации Кендалла.

В четвертой главе рассмотрены вопросы разработки рецептуры РЗ ЛКК и определения ее свойств.

Для определения оптимальной рецептуры композиции постановку эксперимента осуществляли по плану В₃ (Бокса). Схема проведения эксперимента приведена на Рисунке 7. Наименование управляющих факторов и диапазоны их варьирования приведены в таблице 2, а наименование постоянных факторов в эксперименте и их значения приведены в таблице 3.

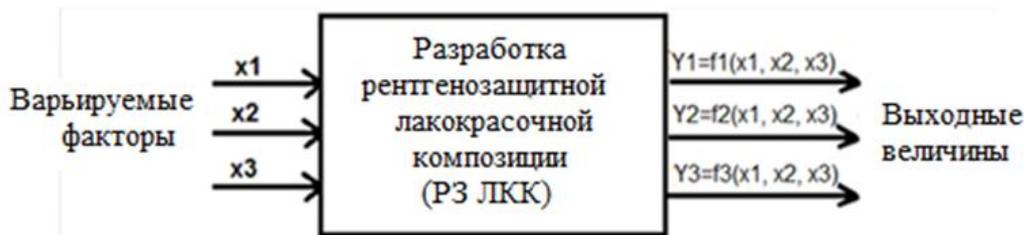


Рисунок 7 - Схема проведения эксперимента по разработке рецептуры РЗ ЛКК

Таблица 2 – Наименование управляющих факторов в эксперименте и диапазоны их варьирования

№ п/п	Наименование фактора	обозначение	Значения на уровнях варьирования					
			нижний		основной		верхний	
			натуральное	нормализованное	натуральное	нормализованное	натуральное	нормализованное
1.	Количество наполнителя, m_1 , г	x_1	150	-1	200	0	250	+1
2.	Количество связующего, m_2 , г	x_2	60	-1	75	0	90	+1
3.	Количество разбавителя, m_3 , г	x_3	50	-1	60	0	70	+1

Таблица 3 – Наименование постоянных факторов в эксперименте и их значения

№ п/п	Постоянный фактор	Показатель
1.	Относительная влажность воздуха, %	65±5
2.	Температура окружающей среды, °С	20±2
3.	Время перемешивания компонентов, входящих в РЗ ЛКК, мин	5±1
4.	Толщина покрытия, мм	3±0,1
5.	Температура агента сушки, °С	60±2

По результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных построены регрессионные модели для различных режимов облучения и толщин покрытия 1,2 и 3 мм образцов. Уравнения регрессии при толщине покрытия 3 мм имеют вид:

а) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 50 кВ:

$$\hat{y}_1^{50,3} = 0,0235 + 0,0046x_1 + 0,0006x_2 - 0,0063x_3 + 0,0083x_1^2 - 0,0068x_2^2 - 0,0062x_3^2 - 0,00064x_1x_2 - 0,0012x_1x_3 - 0,0006x_2x_3; \quad (4)$$

б) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 75 кВ:

$$\hat{y}_1^{75,3} = 0,068 + 0,0043x_1 + 0,0035x_2 - 0,0022x_3 + 0,0018x_1^2 - 0,004x_2^2 + 0,0085x_3^2 - 0,015x_1x_2 - 0,0041x_1x_3 + 0,00002x_2x_3; \quad (5)$$

в) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 100 кВ:

$$\hat{y}_1^{100,3} = 0,1253 + 0,004 + 0,0034x_2 - 0,0021x_3 + 0,0012x_1^2 - 0,004x_2^2 - 0,0082x_3^2 - 0,0019x_1x_2 - 0,045x_1x_3 + 0,0009x_2x_3. \quad (6)$$

г) время высыхания РЗ ЛКП при естественной сушке:

$$\hat{y}_2^3 = 1351,46 + 105x_1 + 27x_2 + 40,67x_3 - 64,72x_1^2 - 54,72x_2^2 - 90,21x_3^2 - 19,58x_1x_2 + 35,42x_1x_3 - 29,58x_2x_3; \quad (7)$$

д) время высыхания РЗ ЛКП при конвективной сушке:

$$\hat{y}_3^3 = 382,3 + 74x_1 + 7,33x_2 - 29,67x_3 - 40,83x_1^2 - 24,17x_2^2 - 20,83x_3^2 + 2,5x_1x_2 + 7,5x_1x_3 + 16,67x_2x_3. \quad (8)$$

где: $\hat{y}_1^{50,3}$, $\hat{y}_1^{75,3}$, $\hat{y}_1^{100,3}$ – величина свинцового эквивалента РЗ ЛКП при анодном напряжении рентгеновской трубки соответственно 50, 75 и 100 кВ;

\hat{y}_3^2 – время высыхания РЗ ЛКП при естественной сушке, с.;

\hat{y}_3^3 – время высыхания РЗ ЛКП при конвективной сушке, с.

Графические интерпретация полученных результатов свинцового эквивалента при анодном напряжении 100 кВ и времени высыхания покрытия приведены на Рисунках 8 - 10.

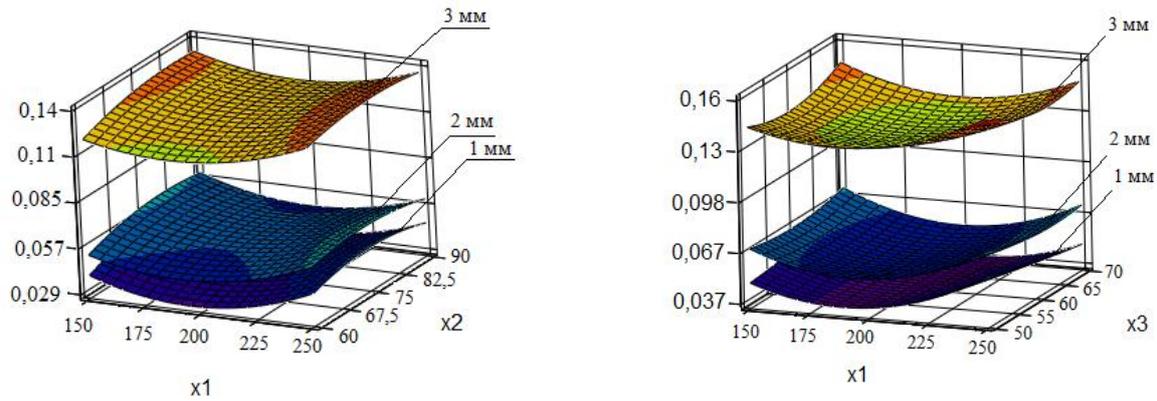


Рисунок 8 - Графическая интерпретация (выходная величина – свинцовый эквивалент РЗ ЛКП при анодном напряжении 100 кВ, мм Рb): x_1 – количество минерального наполнителя, г.; x_2 – количество связующего, г.; x_3 – количество разбавителя, г.

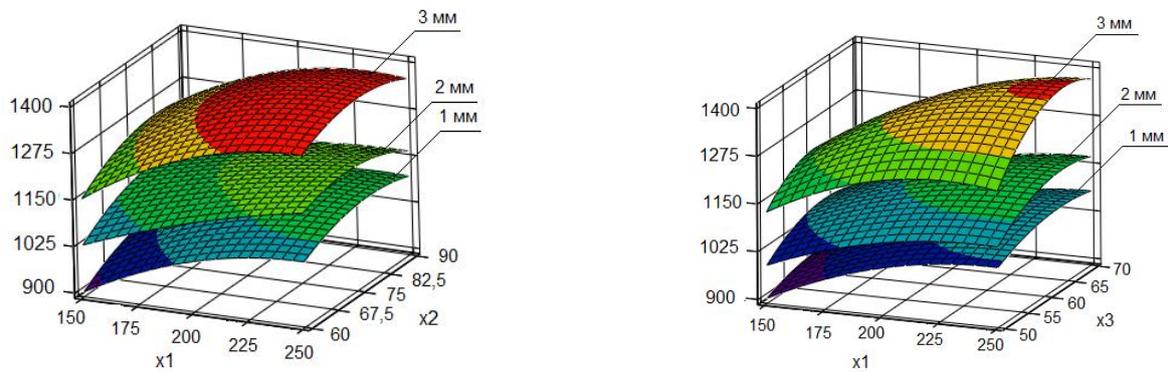


Рисунок 9 - Графическая интерпретация (выходная величина – время высыхания РЗ ЛКП при естественной сушке, мин): x_1 – количество минерального наполнителя, г.; x_2 – количество связующего, г.; x_3 – количество разбавителя, г.

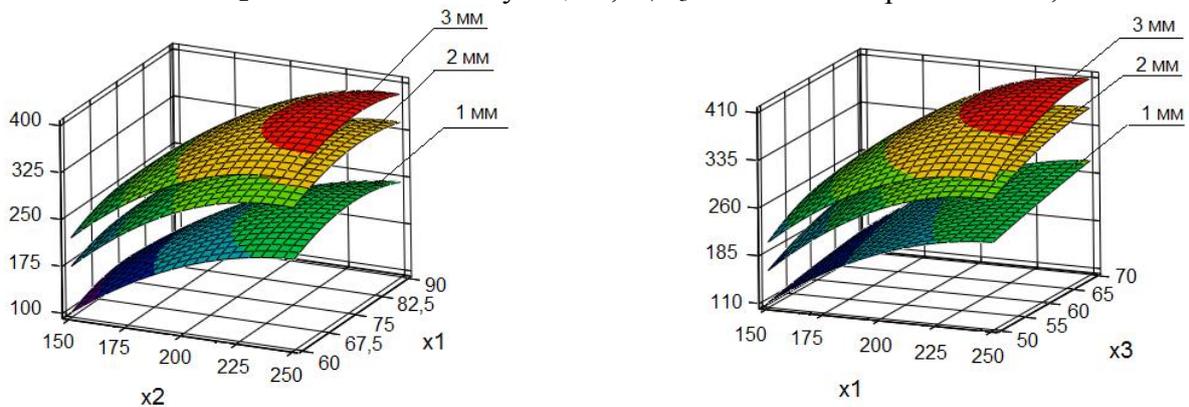


Рисунок 10 - Графическая интерпретация (выходная величина – время высыхания РЗ ЛКП при конвективной сушке, мин): x_1 – количество минерального наполнителя, г.; x_2 – количество связующего, г.; x_3 – количество разбавителя, г.

Вышеприведенные регрессионные модели использовались для нахождения оптимального состава РЗ ЛКК. Задача оптимизации была поставлена следующим образом:

Целевые функции:

а) для нахождения максимального значения рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП при анодном напряжении на рентгеновской трубке 50, 75 и 100 кВ и толщине покрытия 1, 2 и 3 мм:

$$\widehat{W}_1^{50,1}, \widehat{W}_1^{50,2}, \widehat{W}_1^{50,3}, \widehat{W}_1^{75,1}, \widehat{W}_1^{75,2}, \widehat{W}_1^{75,3}, \widehat{W}_1^{100,1}, \widehat{W}_1^{100,2}, \widehat{W}_1^{100,3} \rightarrow \max; \quad (9)$$

б) для нахождения минимума времени высыхания РЗ ЛКП при естественной и конвективной сушке:

$$\widehat{W}_2^1, \widehat{W}_2^2, \widehat{W}_2^3, \widehat{W}_3^1, \widehat{W}_3^2, \widehat{W}_3^3, \rightarrow \min. \quad (10)$$

Система ограничений для целевых функций (19-20) имеет вид:

$$-1 \leq x_1 \leq 1; \quad -1 \leq x_2 \leq 1; \quad -1 \leq x_3 \leq 1; \quad (11)$$

Для решения оптимизационной задачи применена технология оптимизации *MS Excel* встроенной надстройки «Поиск решения» методом обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Для решения компромиссной задачи использован метод условного центра масс. Рациональные значения выходных параметров приведены в таблицах 4-5.

Таблица 4 – Рациональные значения выходных величин при высыхании РЗ ЛКП при естественной сушке

№ п/п	Выходная величина при толщине РЗ ЛКП		
	1 мм	2 мм	3 мм
1.	Свинцовый эквивалент, ммРв		
	при анодном напряжении 50 кВ:		
	0,0142	0,0243	0,0329
	при анодном напряжении 75 кВ:		
	0,0313	0,0391	0,0712
	при анодном напряжении 100 кВ:		
	0,0457	0,0628	0,118
2.	Время высыхания покрытия		
	15 ч. 25 мин.	17 ч. 24 мин.	20 ч. 53 мин.

Таблица 5 – Рациональные значения выходных величин при высыхании РЗ ЛКП при конвективной сушке

№ п/п	Выходная величина при толщине РЗ ЛКП		
	1 мм	2 мм	3 мм
1.	Свинцовый эквивалент, ммРв		
	при анодном напряжении 50 кВ:		
	0,0158	0,0219	0,0328
	при анодном напряжении 75 кВ:		
	0,0327	0,0363	0,0708
	при анодном напряжении 100 кВ:		
	0,0445	0,0627	0,1135
2.	Время высыхания покрытия		
	2 ч. 12 мин.	3 ч. 50 мин.	4 ч. 45 мин.

Однако следует отметить, что достижение минимального времени высыхания РЗ ЛКП, сформированного на основе РЗ ЛКК не является основной целью. Наиболее важную роль в данном случае играет достижение максимальных рентгенозащитных свойств. Поэтому для дальнейших исследований свойств разработанной композиции использовался оптимальный состав, на основе которого получалось покрытие с максимальными рентгенозащитными свойствами.

ми. Значения постоянных факторов при проведении экспериментов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Постоянные факторы при проведении эксперимента

№ п/п	Наименование	Значение
1.	Температура окружающей среды, °С	20±2
2.	Относительная влажность воздуха, %	65±5
3.	Состав РЗ ЛКК: - минеральный наполнитель, г - связующее, г - разбавитель, г	250±1 75±1 60±1

Статистически обработанные экспериментальные данные по исследованию характеристик оптимального состава РЗ ЛКК приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Свойства оптимального состава РЗ ЛКК

№ п/п	Наименование	Значение
1.	Расход, г/м ²	1135
2.	Содержание сухого остатка, %	72
3.	Степень перетира, мкм	0,002 (т.е. груботертая)
4.	Плотность, кг/м ³	2450 (т.е. приближена к плотности баритовой штукатурки - не менее 2700 кг/м ³)
5.	Величина краевого угла смачивания, град.	86

В пятой главе рассматриваются вопросы исследования свойств РЗ ЛКП, сформированного на древесной подложке на основе оптимального состава разработанной РЗ ЛКК при естественной и конвективной сушке. Результаты исследований представлены на Рисунках 11 – 16.

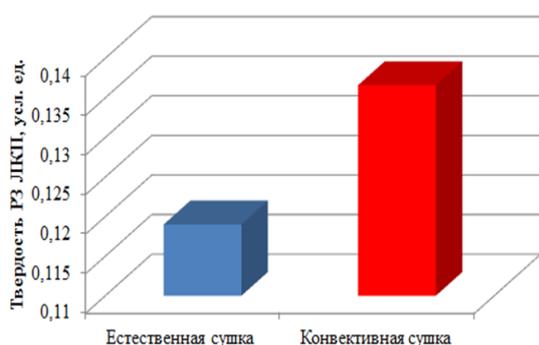


Рисунок 11 - Твердость РЗ ЛКП

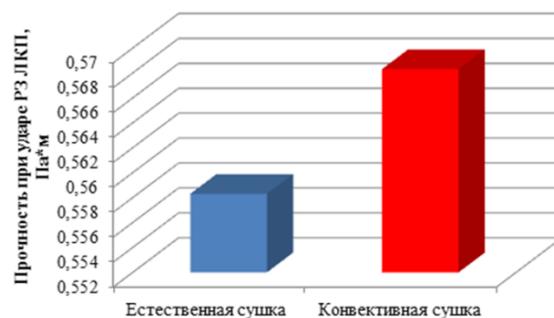


Рисунок 12 – Прочность при ударе РЗ ЛКП

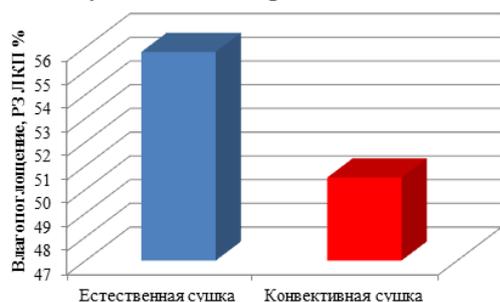


Рисунок 13 – Влагопоглощение РЗ ЛКП

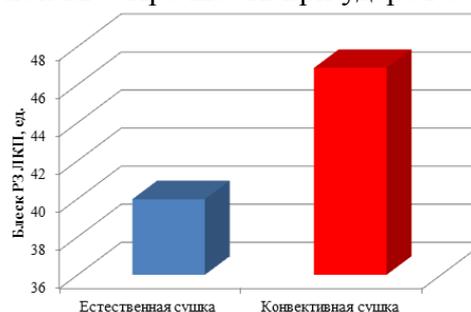


Рисунок 14 – Блеск РЗ ЛКП

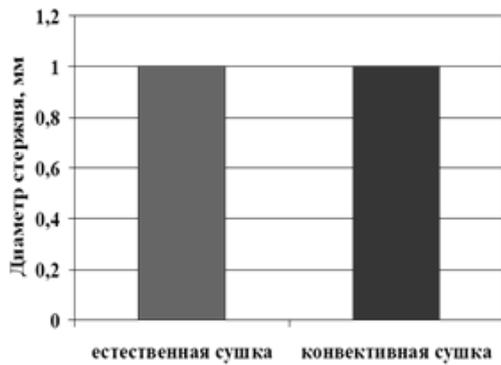


Рисунок 15 – Прочность при изгибе РЗ ЛКП

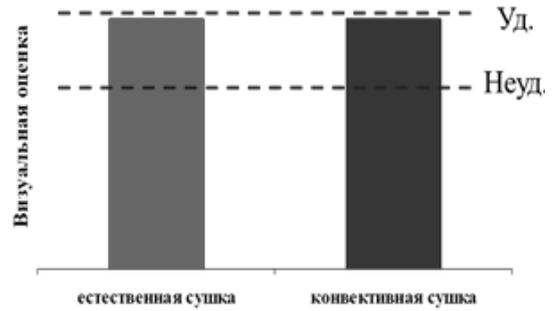
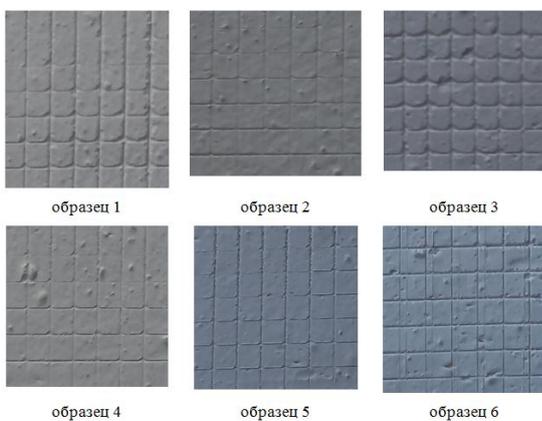


Рисунок 16 – Теплостойкости РЗ ЛКП

Результаты исследований адгезионной прочности РЗ ЛКП толщиной 3мм, сформированного на древесной подложке (фанере) методом решетчатых надрезов для 6 образцов представлены на Рисунке 17.



А	В						Н
	Номер образца						
Эксперт	1	2	3	4	5	6	T_i
1	3	1	5,5	3	3	5,5	30
2	2,5	2,5	5	5	1	5	30
3	2,5	2,5	5	5	1	5	30
4	3,5	3,5	1,5	5,5	1,5	5,5	18
5	5	2,5	2,5	5	1	5	30
6	5,5	3	5,5	3	1	3	30
7	2	2	3	3	2	3	48
8	2,5	2,5	5	5	1	5	30
9	5	2	2	5	2	5	48
$\sum_{i=1}^m u_{ij}$	31,5	21,5	35	39,5	13,5	42	294
Ранг	3	2	4	6	1	6	-

Рисунок 17 - Результаты исследований адгезионной прочности РЗ ЛКП древесной подложке

Так как по результатам экспертной оценки с применением метода ранговой корреляции мнение группы экспертов, состоящей из 9 человек, согласовано на 51 %, следовательно, результатам опроса следует доверять.

В шестой главе в качестве условного изделия была выбрана панель для изготовления рентгенозащитных жалюзи размером 2900×290×12 мм. Для оценки экономического эффекта внедрения разработанной РЗ ЛКК рассмотрены два варианта формирования покрытия на ее основе: с использованием естественной и конвективной сушки. Анализ разработанных планировочных решений участков отделки позволил сделать вывод о том, что использование конвективной сушильной камеры не только существенно сокращает продолжительность отверждения технологического слоя, но и позволяет сократить производственные площади на участке сушки и технологической выдержки. Но выбор оптимального решения может проводиться только в условиях конкретного предприятия с учетом его технических и экономических возможностей.

В таблице 8 приведены основные экономические показатели при производстве условного изделия.

Таблица 8 - Основные экономические показатели

Показатели	Величина показателей
1. Объем выпуска продукции, шт.	10 000
2. Цена единицы продукции, руб.	1500
3. Объем продаж, тыс.руб.	15000
4. Численность персонала, чел	6
5. Инвестиционные затраты, руб.	4844730
6. Средняя заработная плата за месяц, руб.	36505
8. Себестоимость всего объема производства, руб.	9234900
9. Себестоимость единицы продукции, руб.	923,49
10. Балансовая прибыль, руб.	5765100
11. Срок окупаемости, месяцев	13
12. Рентабельность производства, %	37

В таблице 9 приведены расчеты конкурентоспособности условного изделия в сравнении с известными рентгенозащитными материалами.

Таблица 9 - Результаты расчета конкурентоспособности условного изделия в сравнении с известными рентгенозащитными материалами

Наименование показателя	Просвинцованная резина	Материал «Плитотрен»	Баритовая штукатурка «Кнауф»	Панель Протекс ПРЗ 12	Панель, покрытая РЗ ЛКК (3 мм)
Цена м ² , руб.	12000	7000	2150	5540	2200
Срок службы, г	5	5	10	5	5
Стоимость монтажа, руб/м ²	1600	700	1500	1100	800
Расходы за 1 год, руб/м ²	2720	1540	365	1328	600

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для прогнозирования времени высыхания РЗ ЛКП с большим содержанием в своем составе минерального наполнителя представляется возможным использовать теоретические закономерности кинетики высыхания твердого пористого тела, позволяющие определить время высыхания сформированного покрытия на древесной подложке в зависимости от количества компонентов, входящих в состав РЗ ЛКК.

2. С увеличением содержания наполнителя (сульфата бария сернокислого) в составе разработанной композиции снижается скорость высыхания слоя, предположительно потому, что наполнитель одновременно выступает в роли влагоудерживающего агента и, следовательно, увеличивает время «физического» высыхания композиции.

3. С увеличением содержания связующего (вододисперсионной акриловой краски) в составе увеличивается содержание летучих веществ и уменьшается скорость его высыхания.

4. В зависимости от рецептуры состава время «физического высыхания» при естественной сушке колеблется в пределах от 15 до 27 часов. За это время происходит не только формирование пленки на поверхности раздела фаз «жидкость - воздух», но и значительное проникновение разбавителя в слои подлож-

ки, что приводит к затруднениям испарения разбавителя и проявлению дефектов сушки РЗ ЛКП: трещинам, кратерам, неравномерности толщины технологического слоя. При конвективной сушке технологический слой в зависимости от рецептуры состава высыхает в течение 1,5 - 5 часов. Одновременный конвективный нагрев технологического слоя РЗ ЛКК и древесной подложки способствуют ускорению выхода на поверхность разбавителя по всей толщине пленки. При этом значительно повышаются показатели технико-эксплуатационных и эстетических свойств РЗ ЛКП. Поэтому для сокращения производственного цикла изготовления изделий с рентгенозащитными свойствами на деревообрабатывающих предприятиях необходимо предусматривать интенсификацию процесса сушки покрытия.

5. Построены математические модели, представляющие собой зависимости величин свинцового эквивалента (при толщине покрытия 1, 2 и 3 мм, анодном напряжении на рентгеновской трубке 50, 75 и 100 кВ) и времени высыхания при естественной и конвективной сушке РЗ ЛКП от рецептуры рентгенозащитного лакокрасочного состава. В качестве управляющих факторов при оптимизации РЗ ЛКК были выбраны: количество наполнителя, связующего, разбавителя.

6. Оптимальный состав (с максимальными рентгенозащитными свойствами) разработанной РЗ ЛКК (сульфата бария - 65 %, ВДАК - 19 %, дистиллированной воды - 16 %) имеет следующие характеристики: расход - 1135 г/м²; сухой остаток - 72%; степень перетира 0,002 мкм (груботертая); плотность - 2450 кг/м³ (т.е. приближена к плотности баритовой штукатурки - не менее 2700 кг/м³); величина краевого угла смачивания - 86 ° (т.е. не превышают 90°, поэтому способна смачивать поверхность древесной подложки). При формировании РЗ ЛКП толщиной 3 мм величина свинцового эквивалента составит: при анодном напряжении 50 кВ - 0,0363 мм Pb, при 75 Вт - 0,074 мм Pb, при 100 кВ - 0,1305 мм Pb; время высыхания покрытия при естественной сушке составит 16 ч. 5 мин., при конвективной - 3 ч. 40 мин.

7. В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс получена рациональная рецептура состава: содержание сульфата бария - 62 %, ВДАК 15 %, дистиллированной воды - 23 %. Ожидаемые значения выходных параметров представлены в таблицах 4 и 5.

8. В соответствии с ГОСТ 33095– 2014 «Покрытия защитно-декоративные на мебели из древесины и древесных материалов. Классификация и обозначение» сформированное покрытие обозначается: покрытие рентгенозащитное на основе ВДАК – II. Н. ЗП. М. 6 С.

9. Под воздействием УФ-излучения снижение показателей адгезионной прочности РЗ ЛКП не наблюдается, но показатели эстетических свойств снижаются, т.к. покрытие теряет эластичность.

10. Сформированное покрытие обладает достаточной адгезионной прочностью, т.к. его разрушение происходит не на границе раздела сред (покрытие - древесная подложка), а внутри технологического слоя.

11. В состав разработанной РЗ ЛКК входят экологически безопасные, доступные и недорогие материалы, не требующие специальной утилизации. По

своим рентгенозащитным свойствам покрытие максимально приближено к баритовой штукатурке, но имеет более высокие показатели эстетических свойств.

12. При формировании РЗ ЛКП необходимо предусматривать вальцовый или вальцово-ракельный способы нанесения композиции и интенсификацию процесса сушки покрытия.

13. При годовом объеме производства рентгенозащитных панелей в количестве 10000 шт. расчетное значение прибыли составит 15 млн. руб., рентабельность продукции около 37 %, срок окупаемости капитальных вложений чуть более 1 года.

14. Сравнительный анализ показал, что разработанная композиция по своим технико-эксплуатационным характеристикам является конкурентоспособным материалом в ценовом сегменте материалов аналогичного назначения. Ввиду низкой стоимости и продолжительного срока эксплуатации, применение стеновых или других панелей, покрытых рентгенозащитным лакокрасочным материалом, является экономически эффективным и данный вид продукции можно рекомендовать для использования в отделке помещений, где используется рентгеновское излучение, элементах мебели, защитных экранах, ширмах, жалюзи и пр.

15. Изготовленная опытно-промышленная партия рентгенозащитных панелей в условиях ООО «Атом-Технология» г. Берёзовский Свердловской области подтвердила возможность нанесения разработанной РЗ ЛКК на древесную подложку в условиях промышленного производства.

16. Результаты, полученные в процессе диссертационного исследования, внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» для обучающихся направлений подготовки 35.03.02 и 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» профиля «Технология деревообработки» в рамках курса учебных дисциплин «Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий» и «Специальные виды отделки».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Ветошкин Ю.И. Совершенствование технологии создания рентгенозащитных лакокрасочных покрытий / Ю.И. Ветошкин, **С.Б. Шишкина**, И.В. Яцун // Деревообрабатывающая промышленность. 2007. № 5. С. 23-25.

2. Яцун И.В. Применение отходов деревоперерабатывающих производств в изготовлении конструкционных материалов со специфическими свойствами / И.В. Яцун, Ю.И. Ветошкин, **С.Б. Шишкина** // Лесотехнический журнал. 2014. Т. 4. № 3 (15). С. 220-229.

3. **Шишкина С.Б.** Лакокрасочная композиция с защитными свойствами для отделки древесных материалов / С.Б. Шишкина, М.В. Газеев // Хвойные бореальной зоны. 2018. Т. 36. № 5. С. 460-465.

4. **Шишкина С.Б.** Исследование времени «физического» высыхания рентгенозащитного лакокрасочного покрытия на древесной подложке / С.Б.

Шишкина, И.В. Яцун // Деревообрабатывающая промышленность. 2024. № 1. С. 15-23.

В статьях, материалах и тезисах конференций:

5. **Шишкина С.Б.** Лакокрасочные материалы с защитными свойствами от рентгеновского излучения / С.Б. Шишкина, Ю.И. Ветошкин, У.С. Чепурных // Материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. С.64-66.

6. **Шишкина, С. Б.** Лакокрасочные композиции с защитными свойствами от рентгеновского излучения / С. Б. Шишкина, Ю. И. Ветошкин, Г. Г. Говоров // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды международного евразийского симпозиума. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2006. С. 76–79.

7. **Шишкина С.Б.** Декоративные рентгенозащитные стеновые панели / С.Б. Шишкина, Ю.И. Ветошкин, Н.Ю. Анисимкова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы III всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. - Екатеринбург, УГЛТУ, 2007. Ч.1. С.110-111.

8. **Шишкина С.Б.** Определение оптимального состава лакокрасочной композиции с защитными свойствами от рентгеновского излучения / С.Б. Шишкина, Ю.И. Ветошкин // Урал промышленный - Урал полярный: социально-экономические и экологические проблемы. - Екатеринбург, УГЛТУ, 2007. С. 163-165.

9. **Шишкина С.Б.** Влияние конвективной сушки на свойства покрытия, защищающего от рентгеновского излучения / С.Б. Шишкина, А.А. Семашко, Ю.И. Ветошкин // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы V всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов.- Екатеринбург, УГЛТУ, 2009. Ч.1. С.167-169.

10. **Шишкина С.Б.** Определение защитных свойств от рентгеновского излучения лакокрасочной композиции на основе природного минерала / С.Б. Шишкина, Ю.И. Ветошкин, К.С. Соломеин, И.В. Яцун // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды V международного евразийского симпозиума. – Екатеринбург, 2010. С. 141–144.

11. **Шишкина С.Б.** Способ облагораживания поверхности композиционных плитных материалов для придания им рентгенозащитных свойств / С.Б. Шишкина // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды VII международного евразийского симпозиума в рамках V Евро-Азиатского лесопромышленного форума. - Екатеринбург, УГЛТУ, 2012. С. 185-187.

12. Яцун И.В. Исследование процесса сушки армирующего слоя рентгенозащитного композиционного материала на основе древесины / И.В. Яцун И.В., **С.Б. Шишкина**, С.В. Совина // Леса России и хозяйство в них. 2014. № 1 (48). С. 64-67.

13. Яцун И.В. Исследование адгезионных параметров композиционных материалов / И.В. Яцун, **С.Б. Шишкина** // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 1 (6). С. 55-63.

14. Яцун И.В. Исследование процесса сушки армирующего слоя рентгенозащитного композиционного материала на основе древесины / И. В. Яцун, С. Б. Шишкина, С. В. Совина // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды IX международного евразийского симпозиума. – Екатеринбург, УГЛТУ, 2014. С. 111–114.

15. Шишкина С.Б. Определение условного коэффициента защиты лакокрасочной композиции со специфическими свойствами методом оценки результатов цифровой рентгенографии / С.Б. Шишкина, И.В. Яцун, Ю.И. Ветошкин, С.В. Совина // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2015. № 2 (175). С. 174-179.

16. Шишкина С.Б. Формирование покрытия на древесине с рентгенозащитными свойствами / С.Б. Шишкина, Ю.И. Ветошкин, М.В. Газеев // Инновации – основа развития целлюлозно-бумажной и лесоперерабатывающей промышленности. Сборник материалов VI Всероссийской отраслевой научно-практической конференции. - Екатеринбург, УГЛТУ, 2018. С. 254-259.

17. Шишкина С.Б. Влияние конвективной сушки на эксплуатационные характеристики рентгенозащитного покрытия / С.Б. Шишкина, М.В. Газеев // Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики. Материалы XII Международной научно-технической конференции. - Екатеринбург, УГЛТУ, 2019. С. 85-88.

18. Шишкина С.Б. Определение времени «физического» высыхания защитного покрытия со специальными свойствами на древесной подложке / С.Б. Шишкина, И.В. Яцун // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XVII Международного Евразийского симпозиума. Екатеринбург, УГЛТУ, 2022. С. 82-87.

19. Шишкина С.Б. Исследование стойкости рентгенозащитного лакокрасочного покрытия к воздействию ультрафиолетового излучения // С.Б. Шишкина, И.В. Яцун // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы V всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов.- Екатеринбург, УГЛТУ, 2024. С.526-530.

Просим Вас принять участие в работе диссертационного Совета или прислать отзыв на автореферат с заверенной в установленном порядке подписью по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет 24.2.424.01, e-mail: d21228102@vandex.ru

Подписано в печать

Объем

Тираж 100 экз.

Уральский государственный лесотехнический университет

620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

Сектор оперативной полиграфии РИО