

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский государственный лесотехнический
университет»

На правах рукописи

Шишкина Светлана Борисовна

**ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОГО
ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ДРЕВЕСНОЙ ПОДЛОЖКЕ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Яцун Ирина Валерьевна

Екатеринбург – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	14
1.1. Характеристика и классификация лакокрасочных материалов и покрытий на их основе.....	14
1.2. Теоретические основы ослабления рентгеновского излучения защитными материалами	17
1.2.1. Краткие сведения о рентгеновском излучении.....	17
1.2.2. Ослабление рентгеновского излучения защитными материалами и требования, предъявляемые к ним	20
1.2.3. Ослабление рентгеновских лучей древесиной и древесными композитами.....	29
1.3. Влияние проникающих излучений на высокомолекулярные соединения.....	32
1.4. Композиционные составы, применяемые для защиты от рентгеновского излучения.....	35
1.5. Рентгенозащитная лакокрасочная композиция	39
1.6. Основные выводы. Задачи исследований	40
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ВЫСЫХАНИЯ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОГО ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ДРЕВЕСНОЙ ПОДЛОЖКЕ...	42
2.1. Постановка задачи	42
2.2. Теоретические закономерности кинетики высыхания пористых твердых тел.....	44
2.3. Исследования по определению времени высыхания рентгенозащитного лакокрасочного покрытия.....	48
2.4. Выводы по главе	52
3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ	

ИССЛЕДОВАНИЙ.....	54
3.1. Общие положения	54
3.2. Исходные материалы и их характеристики	54
3.2.1. Древесная подложка.....	54
3.2.2. Рентгенозащитная лакокрасочная композиция.....	55
3.3. Характеристики применяемого оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры.....	58
3.4. Методика изготовления опытных образцов.....	61
3.5. Методики проведения экспериментальных исследований	62
3.5.1 Исследование свойств рентгенозащитной лакокрасочной композиции.....	63
3.5.1.1. Определение рентгенозащитных свойств.....	63
3.5.1.2. Определение времени высыхания.....	66
3.5.1.3. Определение расхода и сухого остатка.....	67
3.5.1.4. Определение степени перетира.....	69
3.5.1.5. Определение плотности.....	70
3.5.1.6. Определение величины краевого угла смачивания.....	72
3.5.2. Исследования свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия.....	74
3.5.2.1. Определение твердости.....	75
3.5.2.2. Определение прочности при изгибе.....	78
3.5.2.3. Определение прочности при ударе.....	79
3.5.2.4. Определение влагопоглощения.....	81
3.5.2.5. Определение блеска.....	82
3.5.2.6. Определение адгезионной прочности	83
3.5.2.7. Определение прочности при истирании.....	85
3.5.2.8. Определение теплостойкости.....	86
3.5.2.9. Определение стойкости к воздействию ультрафиолетового	

излучения.....	87
3.6. Методика статистической обработки полученных экспериментальных данных.....	88
3.7. Определение рациональных значений исследуемых параметров.....	94
4. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ РЕЦЕПТУРЫ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОЙ ЛАКОКРАСОЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЕЕ СВОЙСТВ.....	96
4.1. Разработка рецептуры рентгенозащитной лакокрасочной композиции.....	96
4.1.1. Постановка задачи.....	96
4.1.2. Планирование эксперимента.....	96
4.1.3. Результаты эксперимента и обработка полученных экспериментальных данных.....	99
4.1.4. Построение регрессионных моделей	101
4.1.5. Решение задачи оптимизации.....	108
4.1.6. Определение рациональной рецептуры рентгенозащитной лакокрасочной композиции.....	111
4.2. Исследования по определению свойств рентгенозащитной лакокрасочной композиции.....	113
4.2.1. Постановка эксперимента.....	113
4.2.2. Определение расхода и сухого остатка.....	113
4.2.3. Определение степени перетира.....	114
4.2.4. Определение плотности.....	115
4.2.5. Определение величины краевого угла смачивания.....	116
4.3. Выводы по главе.....	119
5. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОГО ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА	

ДРЕВЕСНОЙ ПОДЛОЖКЕ.....	121
5.1. Постановка задачи	121
5.2. Исследования свойств покрытия.....	122
5.2.1. Определение твердости.....	122
5.2.2. Определение прочности при изгибе.....	124
5.2.3. Определение прочности при ударе.....	124
5.3.4. Определение влагопоглощения.....	125
5.5.5. Определение блеска.....	127
5.2.6. Определение адгезионной прочности.....	128
5.2.7. Определение степени истирания.....	131
5.2.8. Определение теплостойкости	131
5.3.9. Определение стойкости к воздействию ультрафиолетового излучения.....	132
5.3. Выводы по главе.....	133
6. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОГО ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ДРЕВЕСНОЙ ПОДЛОЖКЕ.....	135
6.1. Особенности технологии нанесения высоковязких лакокрасочных материалов.....	135
6.2. Разработка технологии изготовления изделия с рентгенозащитными свойствами.....	140
6.2.1. Выбор схемы технологического процесса.....	141
6.2.2. Технические характеристики применяемого оборудования..	142
6.2.3. Режимные параметры технологических операций.....	144
6.2.4. Расчет производительности оборудования.....	145
6.2.5. Описание технологического процесса.....	149
6.2.6. Выводы по оценке технологического процесса.....	152

6.3. Оценка экономической эффективности технологического процесса.....	153
6.3.1. Расчет стоимости основных средств.....	153
6.3.2. Расчет стоимости материальных ресурсов.....	154
6.3.3. Расчет амортизационных отчислений.....	155
6.3.4. Расчет численности работающих и фонда оплаты труда.....	156
6.3.5. Расчет общепроизводственных расходов.....	159
6.3.6. Расчет общехозяйственных расчетов.....	159
6.3.7. Расчет коммерческих расходов.....	160
6.3.8. Калькуляция себестоимости.....	160
6.3.9. Планирование сбыта продукции.....	161
6.3.10. Расчет чистой прибыли.....	161
6.3.11. Экономическая эффективность разработанной технологии	162
6.4. Оценка экономической эффективности применения разработанного материала.....	163
6.5. Выводы по главе.....	164
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	165
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	169
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	180

ВВЕДЕНИЕ

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 исследований:

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. При выполнении работы 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, согласно ГОСТ 19007-73, ГОСТ 3193-2012, ГОСТ 31973-2013, ГОСТ 31992.1-2012, ГОСТ 8832-76 и стандартные методики для определения технико-эксплуатационных характеристик рентгенозащитного покрытия сформированного на его основе, согласно ГОСТ 5233-2021, ГОСТ 31974-2012, ГОСТ 4765-73, ГОСТ 33352-2015, ГОСТ 31975-2017, ГОСТ 31149-2014, ГОСТ 53651-2009, ГОСТ 9.401-91, ГОСТ 20811-75.

Для обработки результатов экспериментов применяли методы математической статистики, метод экспертной оценки и 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 - древесная 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» (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.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Характеристика и классификация лакокрасочных материалов и покрытий на их основе

Отделкой называется технологический процесс придания различным поверхностям защитных и декоративных свойств. Процесс отделки - конечная технологическая операция, которая направлена на улучшение внешнего вида и защиту изделий от непосредственного воздействия окружающей среды и негативных искусственных факторов. Защитно-декоративное покрытие (ЗДП) придаёт изделию как эстетические, так и специфические (прогнозируемые) свойства, что увеличивает срок его эксплуатации.

За последнее время в технологии формирования ЗДП произошли значительные изменения: существенно расширились ассортимент отделочных материалов и специализированного оборудования, область применения покрытий специального назначения. Отделка древесины достигла высокого уровня и заняла одну из ведущих позиций в деревообработке [25].

Основу лакокрасочных покрытий составляют полимерные пленки преимущественно органической природы, поэтому нередко лакокрасочные покрытия называют органическими. Поскольку они, как правило, содержат разные ингредиенты – пленкообразователь (полимер), пигменты, наполнители, модифицирующие и другие добавки, то их можно рассматривать как типичные композиционные полимерные материалы.

Под термином *плёнка* понимают состояние вещества в виде сплошного тонкого слоя. Различают плёнки *свободные* и *адгезированные*.

Лакокрасочные покрытия (ЛКП) – это плёнки, связанные адгезионными силами с твёрдой поверхностью (субстратом) различного происхождения. Такое состояние обеспечивается спецификой ЗДП. Связь с субстратом создаётся не посредством наложения готовой плёнки, а в процессе её формирования

(плёнкообразования). ЛКП имеют две разные поверхности контакта: одну - с внешней средой (как правило, газообразной или жидкой), другую с твёрдым телом, или подложкой. Влияние внешней среды и подложки проявляется в химическом составе и структуре материала контактных слоёв плёнок. Поэтому ЛКП следует рассматривать как физически и химически неоднородные системы.

ЛКП классифицируют преимущественно по двум основным признакам: химическому и эксплуатационному.

В основу *химической классификации* положена природа плёнкообразующего вещества лакокрасочного состава, из которого изготовлено покрытие.

В настоящее время ассортимент лакокрасочных материалов включает в себя широкую гамму составов, различных по природе, свойствам и назначению.

Классификация лакокрасочных материалов представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1. – Классификация лакокрасочных материалов

Классификация покрытий по эксплуатационному признаку, или по назначению также очень распространена и наиболее популярна для потребителей,

т.к. ориентирует на конкретные области использования того или иного покрытия (атмосферостойкие, термостойкие, покрытия целевого назначения и др.).

Менее популярна *структурная классификация* Дринберга А.Я., по которой все ЛКП подразделяются на 2 группы: непревращаемые и превращаемые (в трёхмерное состояние). По данным признакам можно судить о процессах формирования покрытий (получены ли они вследствие химической реакции или физического высыхания), а также о некоторых их свойствах (растворимость, термопластичность и др.) [22].

Эксплуатационные свойства ЛКП определяются в основном характеристиками применяемых материалов. Для отделки поверхности древесины применяются композиции, способные обеспечить формирование на подложке сплошных полимерных покрытий с заданным комплексом показателей, которые и будут определять область применения ЗДП. Основные характеристики покрытия представляются в виде обозначения по ГОСТ 33095-2014 «Покрытия защитно-декоративные на мебели из древесины и древесных материалов. Классификация и обозначение».

Для обеспечения высокого качества покрытия лакокрасочные материалы должны отвечать следующим главным требованиям:

- допускать возможность равномерного распределения на покрываемой поверхности;
- быть способными к плёнкообразованию;
- образовывать покрытия, обладающие комплексом технологических свойств.

Первому требованию наиболее полно удовлетворяют материалы, являющиеся жидкостями. Жидкое состояние, как никакое другое, позволяет легко и многими способами получать разные по толщине слои в широком интервале температур. Жидкие плёнкообразующие системы делятся на две разновидности:

- 1) составы, не содержащие летучих компонентов (жидкие мономеры, олигомеры или полимеры, наносимые в состоянии расплава);

2) составы, содержащие летучие компоненты (растворы, водные дисперсии или органодисперсии твёрдых полимеров или олигомеров).

Развитие современной науки и техники требует разработки новых материалов с заранее прогнозируемыми свойствами, поэтому классификация по этому признаку представляет наибольший интерес [14].

Покрyтия целевого назначения позволяют получить высокую степень защиты от известного негативного фактора или увеличить срок эксплуатации изделия в неблагоприятных условиях.

Широкое распространение в повседневной жизни получают различные виды электромагнитных излучений, в т.ч. рентгеновское.

Поэтому разработка новых лакокрасочных материалов со специальными защитными свойствами, в том числе рентгенозащитными является актуальным и востребованным направлением научных исследований.

Рассмотрим подробно теоретические основы ослабления рентгеновского излучения защитными материалами.

1.2. Теоретические основы ослабления рентгеновского излучения защитными материалами

1.2.1. Краткие сведения о рентгеновском излучении

Электромагнитное излучение возникает в пространстве при изменении состояния (возмущении) электромагнитного поля. Среди электромагнитных полей, порождённых электрическими зарядами и их движением, принято относить к излучению ту часть переменных электромагнитных полей, которая способна распространяться наиболее далеко от своих источников — движущихся зарядов, затухая наиболее медленно с расстоянием [1].

Электромагнитное излучение способно распространяться практически во всех средах. В вакууме (пространстве, свободном от вещества и тел, поглощающих или испускающих электромагнитные волны) электромагнитное

излучение распространяется без затуханий на большие расстояния, но в ряде случаев достаточно хорошо распространяется и в пространстве, заполненном веществом (несколько изменяя при этом своё поведение) [15]. Основные характеристики электромагнитного излучения представлены на рисунке 1.2.

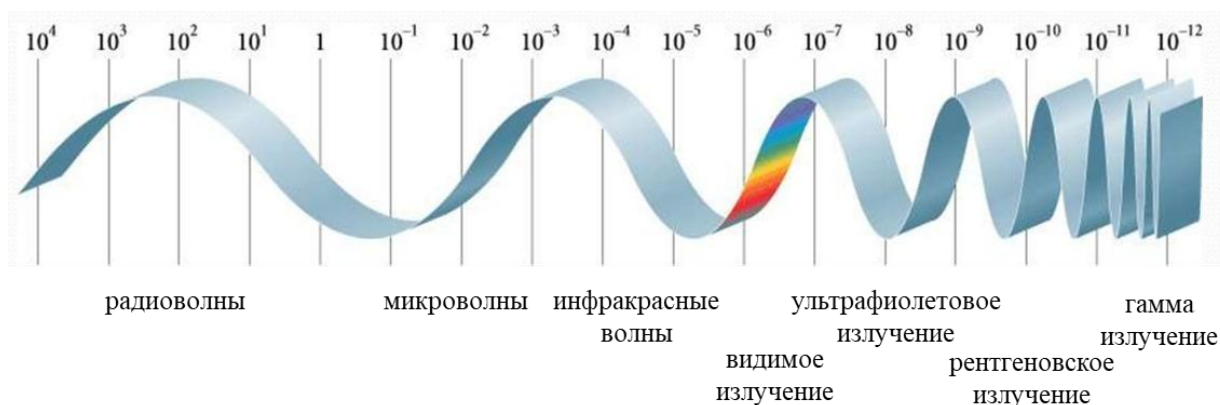


Рисунок 1.2. – Основные характеристики электромагнитного излучения

Рентгеновское излучение – электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на энергетической шкале между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от 10^{-14} до 10^{-8} м [21]. Энергетические диапазоны рентгеновского излучения и гамма-излучения перекрываются в широкой области энергий. Оба типа излучения являются электромагнитным излучением и при одинаковой энергии фотонов – эквивалентны. Терминологическое различие лежит в способе возникновения – рентгеновские лучи испускаются при участии электронов (либо в атомах, либо свободных), в то время как γ -излучение испускается в процессах девозбуждения атомных ядер.

Рентгеновские лучи возникают либо при сильном ускорении заряженных частиц (тормозное излучение), либо при высокоэнергетичных переходах в электронных оболочках атомов или молекул [41]. Оба эффекта используются в рентгеновских трубках (Рисунок 1.3), в которых электроны, испущенные катодом, ускоряются под действием разности электрических потенциалов между анодом и катодом (при этом рентгеновские лучи не испускаются, так как ускорение

слишком мало) и ударяются об анод, где происходит их резкое торможение. При этом испускаются рентгеновские лучи, то есть тормозное излучение, и в то же время выбиваются электроны из внутренних электронных оболочек атомов анода. Пустые места в оболочках занимают другими электронами атома. При этом испускается рентгеновское излучение с характерным для материала анода спектром энергий.

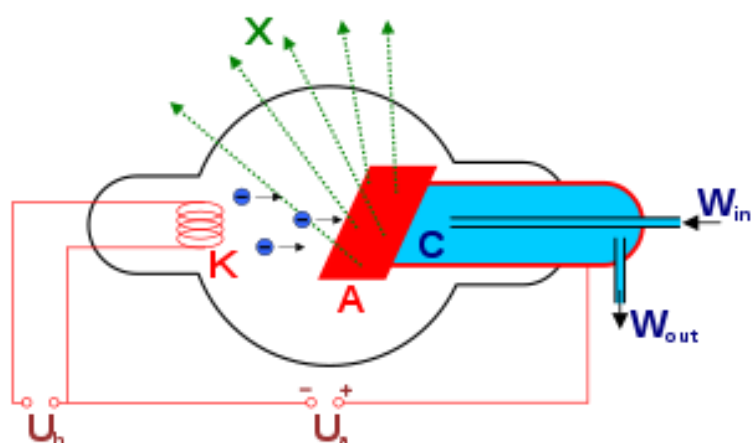


Рисунок 1.3. – Схематическое изображение рентгеновской трубки:

X – рентгеновские лучи, K – катод, A – анод (иногда называемый антикатодом),
C – теплоотвод, U_h – напряжение накала катода, U_a – ускоряющее напряжение,
 W_{in} – впуск водяного охлаждения, W_{out} – выпуск водяного охлаждения

Энергетический диапазон рентгеновского излучения находится в интервале от 100 эВ до 0,1 МэВ. Рентгеновские лучи с длиной волны более 0,2 нм условно называются жёсткими, а с длиной менее 0,2 нм — мягкими рентгеновскими лучами [80].

Длина волны рентгеновских лучей сравнима с размерами атомов, поэтому не существует материала, из которого можно было бы изготовить линзу для рентгеновских лучей. Кроме того, при перпендикулярном падении на поверхность рентгеновские лучи почти не отражаются.

Малая длина волны данного вида излучения, большая «жёсткость» обеспечивает высокую проникающую способность, вызывает ионизацию облучаемого вещества. В связи с этим рентгеновские лучи нашли широкое

применение в медицинской диагностике, методиках неразрушающего контроля, криминалистических экспертизах и сфере обеспечения общественного порядка.

Несомненная польза от применения рентгеновского излучения превышает значимость негативного воздействия данного вида лучей на живые организмы. В результате воздействия данного вида излучения на живые организмы в тканях происходят сложные физические, химические и биологические процессы, вызывающие обратимые и необратимые процессы, в критических случаях – летальный исход.

Важным фактором воздействия ионизирующего излучения на организм являются доза и время облучения. Мощность дозы увеличивает поражающее действие. Рентгеновское излучение субъективно не ощущается человеком, а лучевая болезнь проявляется спустя некоторый промежуток времени после прямого контакта с источником облучения. Поэтому при практическом применении данного вида излучения необходима защита, выполненная в виде различных материалов.

1.2.2. Ослабление рентгеновского излучения защитными материалами и требования, предъявляемые к ним

Рентгеновские лучи, проходя через слой какого-либо материала, подчиняются общим законам ослабления. Ослабление излучения – явление сложное, получаемое от наложения нескольких процессов, разным образом зависящих от атомного номера среды и от энергии квантов. Основные эффекты – интенсивное поглощение и рассеивание – описывают количественную сторону процесса ослабления [24].

Рентгеновские лучи, проходя через какую-либо среду, взаимодействуют с электронами и ядрами атомов, входящих в состав поглощающего вещества. Электромагнитное излучение высокой энергии может поглощаться тремя путями:

а) *фотоэлектрический эффект* - в этом случае фотон отдаёт всю свою энергию связанному электрону, который вырывается; этот процесс удовлетворяет уравнению:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(\nu' - \nu_0), \quad (1.1)$$

где m - масса электрона;

v - скорость электрона;

$h\nu'$ - энергия вырванного фотона;

$h\nu_0$ - энергия ионизации.

Вырванные электроны могут в свою очередь вызвать дальнейшую ионизацию. Атомный коэффициент поглощения μ_α в случае фотоэлектрического поглощения зависит от третьей степени длины волны, и поэтому очень быстро уменьшается с увеличением энергии излучения, становясь пренебрежительно малым при энергиях выше 0,5 МэВ для поглотителей со сравнительно малым атомным номером, таких, как вода и большинство органических соединений.

2) *эффект Комптона*. При взаимодействии жёсткого электромагнитного излучения с веществом часть рассеянного излучения имеет ту же длину волны, что и исходное; это может быть объяснено классическим процессом абсорбции и повторного излучения резонансными диполями поглотителя. Однако другая часть рассеянного излучения обладает большей длиной волны, и этот эффект не поддаётся классическому объяснению. Эффект Комптона превалирует в области более коротких волн и наиболее важен в интервале энергий 0,01 - 1 МэВ. Вклад эффекта Комптона в массовый коэффициент поглощения μ/ρ зависит лишь от числа электронов на 1 грамм поглотителя. Поэтому для воздуха и всех органических соединений относительный вклад эффекта Комптона приблизительно одинаков и не зависит от химического состава.

3) *образование пар*. Известно, что электроны могут существовать в состояниях как положительной, так и «отрицательной» кинетической энергии. Отрицательные электроны с отрицательной энергией присутствуют повсюду. При столкновении достаточно энергичного γ -фотона с одним из этих электронов

фотон может вырвать его из состояния отрицательной энергии и таким образом освободить его. Электрон вылетит как обычный отрицательный электрон с положительной кинетической энергией, оставив положительную «пустоту» в сплошном фоне отрицательного заряда. Эта пустота ведёт себя как положительный заряд, т.е. позитрон. Позитрон и электрон имеют одинаковую массу покоя m_0 , энергетический эквивалент которой равен m_0c^2 . Фотон с энергией $2m_0c^2$ (1,02 МэВ) или большей может таким образом вызвать рождение электрон-позитронной пары. Из всей энергии фотона первые 1,02 МэВ используются для создания массы покоя, а остаток переходит в кинетическую энергию электрона и позитрона. Фотон не рассеивается в этом процессе, а полностью поглощается. Вследствие требований сохранения энергии и импульса рождение пар не может происходить в пустом пространстве, ему в большой степени способствует наличие атомных ядер; рождение пар может происходить и в присутствии электрона. В первом приближении вероятность рождения пар в поглощающей среде пропорциональна Z^2 , так что для его изучения наиболее удобны элементы с большим атомным номером, к которым относится свинец. Этим процессом и объясняется высокая поглощающая способность данного вещества и содержащих его материалов [41].

Кроме вышперечисленных физических процессов, вызывающих ослабление жесткого γ – излучения, может происходить ядерный фотоэффект. Известно, что наблюдается около 11 процессов, происходящих при взаимодействии γ – лучей с веществом, но на практике ограничиваются лишь выше перечисленными процессами (Рисунок 1.4).

Линейный коэффициент ослабления будет равен сумме коэффициентов, характеризующих каждый процесс в отдельности:

$$\mu = \tau + \sigma_{\text{кв.}} + \sigma_{\text{кл.}} + \chi + \tau_{\text{яд.}}, \quad (1.2)$$

где τ – линейный коэффициент фотоэлектрического поглощения;

$\sigma_{\text{кв.}}$ – линейный коэффициент поглощения, характеризующий комптон-эффект;

$\sigma_{\text{кл.}}$ – линейный коэффициент рассеивания, характеризующий эффект Томсона;

χ – линейный коэффициент ослабления в процессе образования пар;

$\tau_{\text{яд.}}$ – линейный коэффициент поглощения за счет ядерных превращений.

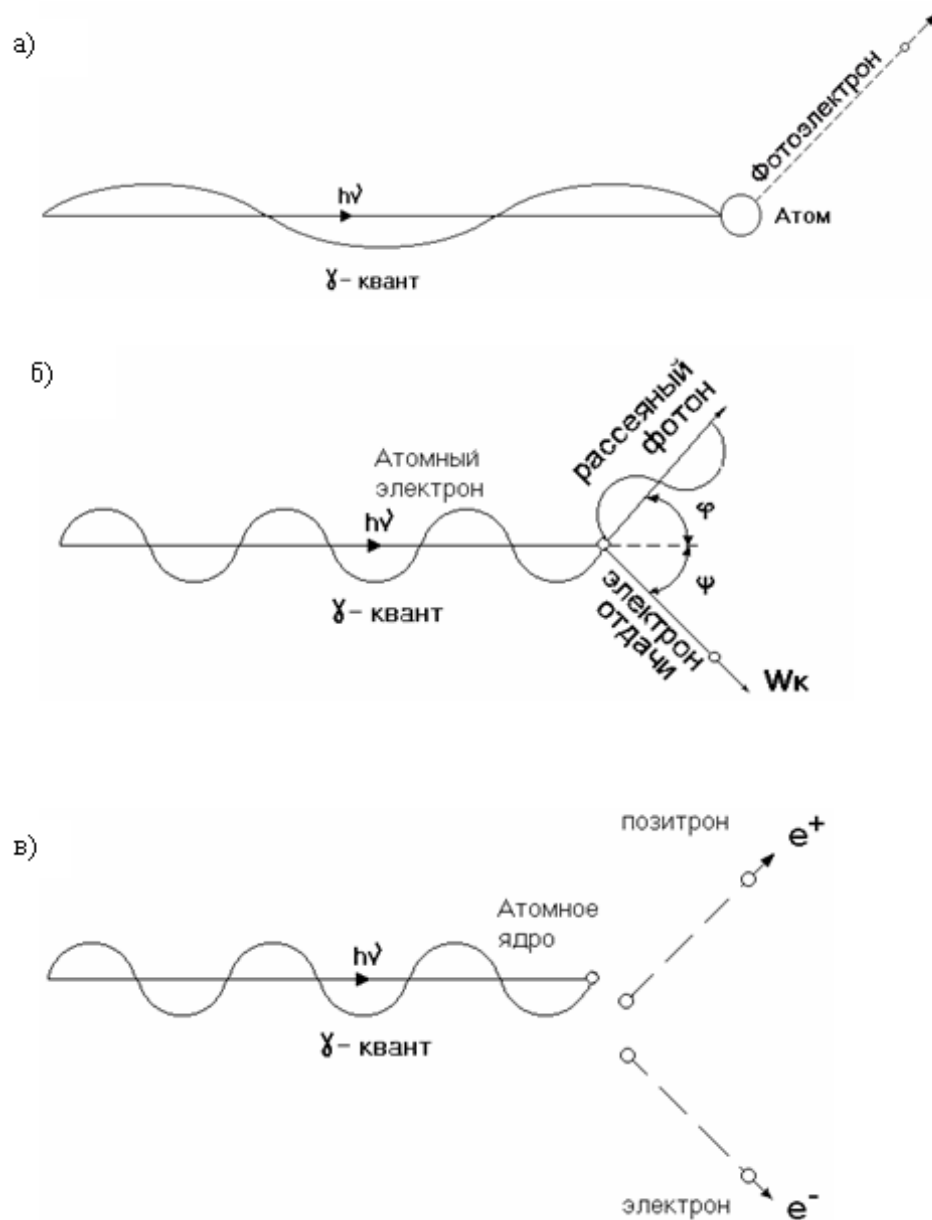


Рисунок 1.4. – Физические процессы, вызывающие ослабление γ – излучения:

а) фотоэлектрическое поглощение; б) комптон-эффект; в) образование пар

В области энергии γ – квантов до 500 кэВ (в частности, рентгеновское излучение) преобладающим процессом при ослаблении потока γ – квантов является фотоэлектрический эффект.

Рентгеновские лучи могут проникать сквозь вещество, причём различные вещества по-разному их поглощают. Поглощение рентгеновских лучей является важнейшим их свойством в рентгеновской съёмке. Интенсивность рентгеновских лучей экспоненциально убывает в зависимости от пройденного пути в поглощающем слое, Рисунок 1.5.

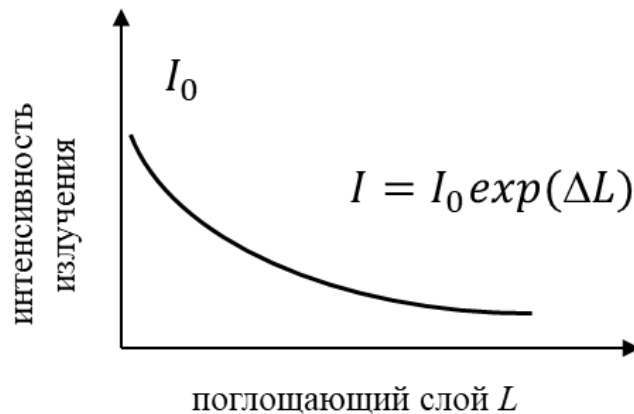


Рисунок 1.5. – Кривая ослабления рентгеновских лучей поглощающим слоем

Количественная сторона возникающих при этом процессов определяется энергией и спектральным составом падающего пучка рентгеновских лучей, плотностью и химическим составом облучаемой среды [48].

Обозначим через I интенсивность достаточно узкого монохроматического пучка лучей, т.е. энергию излучения, подающую за 1 с на 1 см^2 площадки, перпендикулярной к направлению распространения. Интенсивность I связана с числом N γ – квантов, падающих за 1 с на 1 см^2 площади, соотношением:

$$I = N h \nu, \quad (1.3)$$

где $h \nu$ – энергия γ – кванта, кэВ.

При прохождении слоя однородной среды толщиной dx интенсивность уменьшается на величину dI , т.е.:

$$dI = -\mu I dx, \quad (1.4)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} .

Интегрируя соотношение (1.4) и полагая, что при $x = 0$ интенсивность $I = I_0$, имеем:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1.5)$$

где I_0 и I – соответственно значение интенсивности пучка, падающего на вещество и дошедшего до глубины x , кэВ.

Линейный коэффициент ослабления определенного элемента пропорционален его плотности, поэтому вводят массовый коэффициент ослабления, характеризующий ослабление излучения единицей массы вещества:

$$\mu_m = \mu / \rho, \quad (1.6)$$

где μ_m – массовый коэффициент ослабления, $\text{см}^2/\text{г}$;

ρ – плотность вещества, $\text{г}/\text{см}^3$.

Для вещества сложного химического состава имеем:

$$\mu_m = \mu_{m1} P_1 + \mu_{m2} P_2 + \dots + \mu_{mn} P_n, \quad (1.7)$$

где $\mu_{m1} = \mu_1 / \rho_1$, $\mu_{m2} = \mu_2 / \rho_2$, ..., $\mu_{mn} = \mu_n / \rho_n$ – массовые коэффициенты ослабления соответствующих частей;

P_1, P_2, \dots, P_n – их относительные весовые количества.

Изменение интенсивности излучения часто выражают не через коэффициент ослабления μ , а через слой половинного ослабления Δ .

Слоем половинного ослабления Δ называется такая толщина поглощающей среды, при прохождении которой интенсивность излучения уменьшается в 2 раза.

Используя выражение (1.5) и полагая, что $x = \Delta$, можно определить соотношение между μ и Δ :

$$I/I_0 = 1/2 = e^{-\mu \Delta} \text{ или } \Delta \mu \lg e = \lg 2 \quad (1.8)$$

$$I/I_0 = 1/2 = e^{-\mu \Delta} \text{ или } \Delta \mu \lg e = \lg 2. \quad (1.9)$$

Отсюда:

$$\Delta = 0,693/\mu \quad (1.10)$$

В формуле (1.5) коэффициент μ учитывает и поглощение, и рассеяние, но при этом каждый рассеянный квант «выбывает из игры» и не участвует в создании интенсивности I . Это справедливо только в условиях «узкого пучка». В общем случае интенсивность будет равна суммарной интенсивности от первичного излучения и рассеянного излучения. По формуле (1.5) можно определить только интенсивность первичного излучения. Пренебечь квантами, испытавшими одно- и многократное рассеяние, и получить возможность пользоваться формулой для «узкого пучка» можно лишь при определенных условиях, при так называемой «хорошей геометрии», которая создается за счет коллимации пучка лучей. Если в пучке роль рассеянных квантов велика, то такой пучок называют «широким пучком» излучения.

Для этого случая интенсивность излучения определяется по формуле:

$$I = I_0 e^{-\mu x} B(h\nu, Z, \mu x) \quad (1.11)$$

где $B(h\nu, \mu x)$ – является «фактором накопления» и зависит от энергии квантов, порядкового номера поглощающего вещества и величины пробега.

Численные значения $B(h\nu, \mu x)$ для различных веществ различны и представлены в [1].

На рисунке 1.6 построена универсальная кривая ослабления так, что толщина поглощающей среды выражена в долях слоя половинного ослабления. Построив эту кривую и зная толщину слоя половинного ослабления для данного вещества, всегда можно построить кривую ослабления излучения [118].

Для защиты живых организмов от различного вида излучений, как было сказано выше, применяются разнообразные материалы, как по составу, конструкции, так и по сочетанию композитов [16]. Несмотря на разнообразие гаммы защитных материалов, для них справедливы общие основные законы ослабления рентгеновского излучения, прошедшего через слой защитного материала [93].

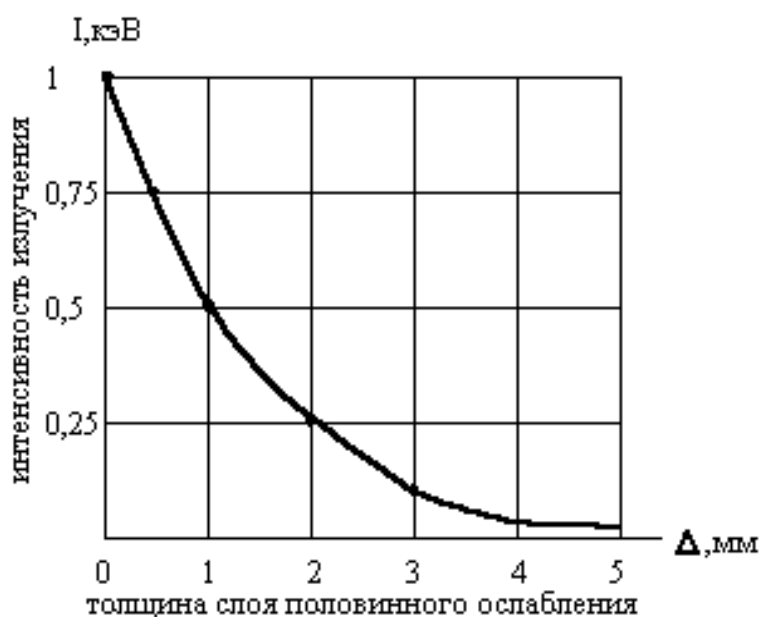


Рисунок 1.6. – Универсальная кривая ослабления интенсивности рентгеновских лучей от толщины слоя половинного ослабления

Защитный материал - это вещество, предназначенное для использования в целях ослабления любого вида излучений [17]. Чаще всего защита от первичного «узкого» пучка представляет собой слой материала, размещенный между анодом рентгеновской трубки и защищаемым объектом и достаточный для снижения мощности дозы излучения до предельно допустимых значений.

Степень защиты любого материала определяется следующими регламентированными характеристиками:

1) *кратностью ослабления* K – это величина, показывающая, во сколько раз данный материал позволяет уменьшить значения мощности дозы рентгеновского излучения, измеренное в данной точке в воздухе:

$$K = \frac{I_0}{I_x}, \quad (1.12)$$

где I_0 – мощность дозы рентгеновского излучения в воздухе, измеренная в данной точке в отсутствии защитного материала, кЭВ;

I_x – мощность дозы рентгеновского излучения в воздухе, измеренная в данной точке за слоем защитного материала толщиной x , кЭВ;

2) *свинцовый эквивалент* – толщина свинцового слоя в миллиметрах, обеспечивающая при заданных условиях облучения рентгеновским излучением такую же кратность ослабления, как и рассматриваемый материал.

Рентгеновское излучение эффективно ослабляется материалами с высокой плотностью [98]. Наиболее широко в качестве защиты применяются свинцовосодержащие материалы (свинец, просвинцованная резина, свинцовое стекло и пр.) [81,85,91]. Основными недостатками материалов данной группы являются токсичность, сложность монтажа, большой вес конструкций и изделий, непродолжительный срок эксплуатации [91]. Поэтому вопрос замены таких материалов на более современные, но не уступающие по уровню защиты, является актуальным направлением научных разработок [41].

Для свинца известны показатели ослабления рентгеновских лучей, имеющих различную длину волны в области напряжений от 75 до 200 кэВ. Международные рекомендации для определения толщины свинцового защитного слоя приведены в таблице 1.1 [48].

Таблица 1.1 – Международные рекомендации для определения толщины свинцового защитного слоя

Напряжение, кэВ	75	100	125	150	175	200
Толщина свинца, мм	1	1,5	2	2,2	3	4

Соотношение кратности ослабления и величины свинцового эквивалента представлено в таблице 1.2 [19]:

Таблица 1.2 - Соотношение кратности ослабления и величины свинцового эквивалента

Кратность ослабления	17	30	40	75	125	200	520	2000
Свинцовый эквивалент, мм	0,25	0,35	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	2,0

Современные медицинские приборы и другие специализированные источники рентгеновского излучения изначально обладают режимными характеристиками, позволяющими сделать воздействие рентгеновских лучей максимально безопасным для человека. Поэтому защитные материалы также должны отвечать всем современным требованиям: обладать механической прочностью, быть нетоксичными, иметь в своем составе экологичные компоненты, обладать радиационной и химической стойкостью, сочетать эксплуатационные и декоративные характеристики [92].

1.2.3. Ослабление рентгеновских лучей древесиной и древесными композитами

Древесина – уникальный природный композиционный материал, который можно рассматривать как неоднородную пористую систему, состоящую из аморфной матрицы (содержащей в основной массе лигнин) и наполнителя (микроскопических волокон целлюлозы) [94]. Компоненты системы являются взаимно нерастворимыми органическими полимерами, при взаимодействии между собой на границе раздела фаз они придают древесине свойства, которыми по отдельности не обладают. Техничко-эксплуатационные характеристики натуральной древесины позволили ей занять достойное место среди конструкционных материалов в различных областях применения, в частности, использоваться в качестве несущего элемента – подложки [8].

Однако, древесина, как и любой другой органический материал, достаточно проницаема для различных видов излучений. Проницаемость рентгеновскими лучами зависит от различных сопутствующих факторов: породы древесины, влажности, наличия пороков [112].

Древесина является сложным по химическому составу материалом, поэтому для нее ослабление интенсивности рентгеновских лучей будет описываться выражениями (1.5) и (1.7) [118].

В [52] получены значения линейных коэффициентов ослабления для радиального, тангентального и продольного направлений древесины некоторых лиственных и хвойных пород. Величина этих значений для одной и той же породы древесины в различных направлениях отличается в пределах 6-26%. На основе приведенных значений можно сделать вывод, что значение линейного коэффициента ослабления не зависит от направления волокон древесины. Древесина не обладает защитными свойствами от проникающего излучения [71]. Средние показатели линейного коэффициента ослабления μ для сухой древесины составили $0,2-0,008 \text{ см}^{-1}$ при энергии излучения 20–100 кэВ [14].

В работах [59, 64,65] установлено, что наибольшее влияние на прохождение γ -лучей через древесину оказывает влажность: между линейным коэффициентом ослабления и влажностью древесины (от 0 до 153 %) существует линейная зависимость в области влажности около 45 % [66].

Также исследовались устойчивость древесины при гаммаскопии, компоненты лигнинуоуглеводного комплекса, получение радиоизотопов древесины, модификации древесины [71]. В СПб ГЛТА проводились эксперименты по проверке защитных свойств уплотненной древесины и древесины, пропитанной раствором борной кислоты. Были получены данные, что коэффициент поглощения быстрых нейтронов при воздействии нейтронных потоков различной плотности для полиэтилена и модифицированной древесины одинаковы, а тепловых нейтронов в 2,63 раза больше. Также доказано, что цельная и измельченная борированная древесина может использоваться для защиты от нейтронных потоков малых и средних энергий при стоимости в 20 – 30 раз дешевле применяемых в настоящее время водородосодержащих защитных материалов [45].

Фанера – широко распространенный материал на основе древесины, но существенно отличающийся от нее своими технико-эксплуатационными характеристиками [95]. Фанера представляет собой формат плиты, состоящий из склеенных между собой листов лущеного шпона, нередко в композиции с другими материалами. В листе фанеры различают наружные (лицевой и

оборотный) и внутренние слои шпона, отличающиеся качеством и иногда породой древесины. В основу классификации фанеры положен ряд конструктивных и технологических признаков, определяющих эксплуатационные качества каждого ее вида [60].

Способность фанеры пропускать рентгеновские лучи подробно изучена в работе [72]. Воздействию проникающего излучения подвергались образцы фанеры из шпона различных пород древесины, разной толщины, слойности (3,5,7), с применением клеев на основе смол СФЖ-3014 и КФ-Ж. В результате исследований установлено, что порода древесины, вид клея и толщина шпона, а также наличие пороков и дефектов обработки в слоях фанеры существенного влияния на величину защитных свойств не оказывают. Однако увеличение толщины фанеры положительно влияет на защитные свойства [111].

При введении в состав материалов на основе древесины дополнительных компонентов можно получить прогнозируемые свойства, что позволит существенно расширить область применения древесных композитов [62].

Так, на кафедре механической обработки древесины ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» разработана широкая линейка рентгенозащитных материалов на основе фанеры торговой марки «Фанотрен» и на основе измельченной древесины торговой марки «Плитотрен» [70]. Данные группы относятся к конструкционным материалам, представляют собой разновидность плит с высокими показателями защитных свойств от рентгеновского излучения (в том числе, от рассеянного вторичного) [117]. Область применения плит «Фанотрен» и «Плитотрен» достаточно обширна: рентгенозащитные ширмы и жалюзи, облицовки стен, потолков, перегородки, основа для напольного покрытия [118]. Однако в оригинальном виде применение данных композитов ограничено в силу низких декоративно-эстетических свойств. Для таких поверхностей требуется финишная отделка в виде дальнейшего облицовывания декоративными пленками, тиснения поверхности или нанесения лакокрасочных материалов [19].

1.3. Влияние проникающих излучений на высокомолекулярные соединения

Под действием спектра проникающих волн в полимерных составах могут происходить два процесса [100]:

1) *деструкция*, т.е. разрывы молекулярных цепей, приводящее к уменьшению среднего молекулярного веса;

2) *сшивание полимерных цепей*, ведущее к возрастанию молекулярного веса и при достаточно больших дозах к образованию нерастворимой сетки.

Во многих полимерах оба процесса идут одновременно, и отнесение полимера к той или иной группе зависит от того, какой из них доминирует [82]. В таблице 1.3 приведена классификация известных полимеров по характеру воздействия на них ионизирующих излучений, основанная на наблюдениях Лоутона [15].

Таблица 1.3 – Действие ионизирующих излучений на полимеры

Сшивающиеся полимеры	Деструктурирующиеся полимеры
Полиакриловые эфиры	Целлюлоза
Полиакриловая кислота	Поли- α -метилстирол
Полиакриламид	Полиизобутилен
Полиметилакрилат	Политетрафторэтилен
Поливинилалкильные эфиры	Поливинилиденхлорид
Поливинилметилкетон	Поливинилхлорид
Полистирол	Полиметакриламид
Полиэфиры	Полиметилметакрилат
Полиэтилен	Полиметакриловая кислота
Полиметилен	-
Полипропилен	-
Хлорированный полиэтилен	-

Сшивающиеся полимеры	Деструктирующиеся полимеры
Хлорсульфированный полиэтилен	-
Натуральный каучук	-

Предложено несколько объяснений различной восприимчивости разных полимерных структур к деструкции и сшиванию: наличие кислорода в процессе облучения полимера, образование свободных радикалов, наличие ароматических групп в качестве специальных добавок в состав пленкообразователя. Когда сшивание преобладает над деструкцией, образцы полимеров заметно изменяют растворимость, механические свойства и поведение при нагревании [43].

Срок службы покрытий в условиях воздействия ионизирующего излучения определяется в первую очередь природой пленкообразующего вещества [61]. Пигменты не оказывают существенного влияния на стойкость покрытий, однако, введение наполнителей волокнистой, чешуйчатой природы или минералов со стойкой ромбической ионной решеткой дает положительный эффект [63]. Стойкость покрытий на различных подложках неодинакова. Признаками разрушения покрытий являются выраженное изменение цвета, потеря глянца, появление пузырей или трещин, липкость или шелушение, снижение адгезии. В таблице 1.4 приведены характеристики радиационной стойкости для различных покрытий при предельных дозах излучения [58].

Таблица 1.4 – Предельные дозы излучения для различных покрытий

Наименование покрытия	Доза излучения, МГр
Полистирольное	50
Кремнийорганическое	50
Эпоксидно-фенолформальдегидное	50
Эпоксидное	1-10
Полиметилакрилатное	1-10

Наименование покрытия	Доза излучения, МГр
Полиуретановое	1-10
Битумное	1-10
Меламиноформальдегидное	5
Поливинилацетатное	5
Поливинилхлоридное	1
Полиэтиленовое	1
Фторопластовое (фторопласт-3, 32Л, 42Л)	0,1-1
Перхлорвиниловое	0,1
Нитроцеллюлозное	0,001

Особенности поведения под воздействием ионизирующего излучения основных для лакокрасочной промышленности пленкообразователей являются предметом многолетних исследований. Данные были необходимы для разработки лакокрасочных материалов, применяемых в ядерной отрасли, медицине и строительстве [3].

В таблице 1.5 представлена краткая информация о том, как изменяются физико-механические свойства высокомолекулярных соединений при воздействии на них ионизирующего излучения. Знаком «+» отмечено увеличение свойства после облучения, знаком «-» уменьшение указанного свойства [54].

Таблица 1.5 - Влияние ионизирующего излучения на физико-механические свойства высокомолекулярных соединений

Свойство полимеров	Сшивающиеся полимеры	Деструктурирующиеся полимеры
Молекулярная масса	+	-
Растворимость	-	+
Интенсивность газовыделения	+	+

Свойство полимеров	Сшивающиеся полимеры	Деструктурирующиеся полимеры
Коэффициент теплового расширения	-	нет данных
Газопроницаемость и гигроскопичность	-	+
Плотность	+	нет данных.
Относительное удлинение	-	- или +
Модуль упругости	+	-
Прочность при растяжении	+	-
Твердость	+	-
Химическая стойкость	+	-
Электрическая прочность	+	-

1.4. Композиционные составы, применяемые для защиты от рентгеновского излучения

- *бетоны* – материалы, отличающиеся по своему составу и свойствам, производимые на матрицах цементных, акриловых, полимерных, полиэфирных, эпоксидных, фенолоформальдегидных и др. и по прочности приближаются к металлам. Известны декоративные бетоны (материал для защиты от радиоактивного воздействия патент №2063074 от 27.11.1995) [46];

- *составы на основе барита (тяжелый шпат)* - природный материал, применяемый в качестве баритовой штукатурки [10] и стяжки [102], баритобетона [46] для изготовления рентгенозащитных ограждений. Он обладает большой поглощающей способностью и используется в натуральном виде или в виде отходов цинкового производства – салаарский пылевой баритовый концентрат. Сульфат бария ($BaSO_4$) встречается в виде бесцветных кристаллов, но бывает окрашен и примесями сульфатов стронция или кальция [9]. Плотность 4480 кг/см³, твердость – 3–3,5 единиц [99]. Толщина баритовой штукатурки в

помещении с радиоизлучением зависит от мощности прибора (например, от напряжения на рентгеновской трубке) и в каждом случае рассчитывается индивидуально согласно СанПиН 2.6.1.1192-03. Например, для отделки помещения, где согласно проекту листы свинца должны иметь толщину 1,47 мм, потребуется слой штукатурки марки «Сорель М150» толщиной 10 мм. Чтобы выполнить слой требуемой толщины, понадобится 15 кг сухой смеси. На рисунке 1.7 представлены сравнительные показатели расхода сухих строительных смесей для формирования защитного слоя, равноценного 2 мм свинца [101].

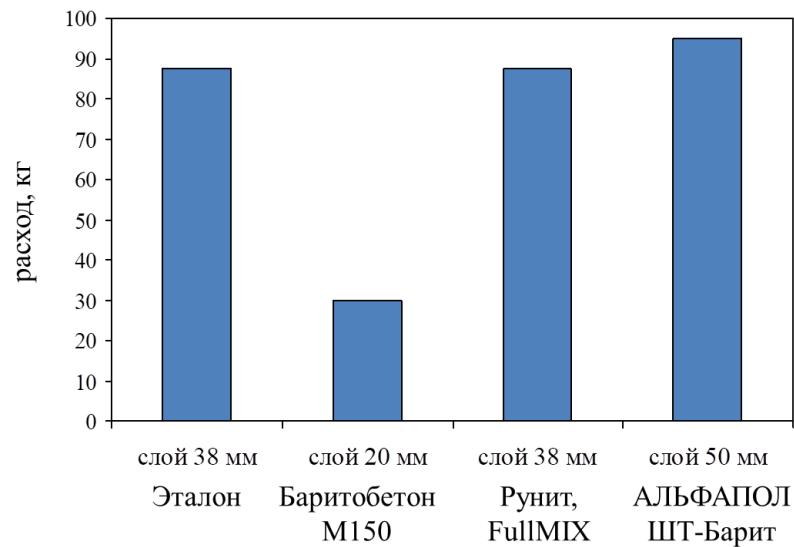


Рисунок 1.7. – Расход строительных смесей для обеспечения защитных свойств, эквивалентных толщине свинца 2 мм.

- магнезиально-баритовый составы в отличие от баритового являются активными. Поэтому устанавливать внутри таких смесей любые металлические сетки для армирования нежелательно, так как они начнут быстро корродировать и в последствии и вовсе разрушатся. Но при использовании защитных материалов иногда просто невозможно отказаться от использования сеток, например, если слой настенной штукатурки должен составлять более 40 мм. Магнезиальные баритовые составы можно использовать и в этом случае, но сетка должна быть обязательно оцинкованной, что увеличивает цену работ.

- *рентгенозащитная шпатлевка Кнауф Сейфборд Шпахтель* - представляет собой порошкообразный материал на основе специального гипса с минеральным наполнителем и регуляторами твердения. Для правильной идентификации, шпатлёвка КНАУФ-Сейфборд-Шпахтель имеет желтый цвет. Предназначена для заделки вручную, без армирующей ленты, швов специальных рентгенозащитных плит КНАУФ-Сейфборд и создания непроницаемой защиты от вредного воздействия радиационного излучения. Применяется для отделочных работ внутри помещений. Имеет малый по сравнению со свинцовыми пластинами вес и тем самым дает меньшую нагрузку на стены, экологически безопасен; улучшает звукоизоляцию в помещении; возможность создания криволинейных поверхностей и имеет меньшую стоимость по сравнению со свинцом [84].

- *строительная композиция для защиты от ионизирующего излучения* - предназначена для заделки стыков, трещин и каверн в строительных конструкциях и изделиях, местах сопряжения конструкций в радиационно-опасных местах сочленения установок. Содержит следующие компоненты, мас. %: жидкое стекло 21,02-24,35; низкомолекулярный полиэтилен 4,14-4,22; сажа 0,66-0,7; хлорид свинца 9,54-11,09; оксид свинца 59,76-64,51. Изделия имеют среднюю плотность 2820-3250 кг/м³, прочность при сжатии (в возрасте 3 суток) 1,56-1,69 МПа, прочность при изгибе 0,46-1,28 МПа, коэффициент выведения нейтронов спектра деления 0,029-0,031 см⁻¹, коэффициент ослабления гамма-излучения (при энергии фотонов 0,1 - 0,5 МэВ) 0,39 - 13,203 [97].

- *рентгенозащитные панели Протекс ПРЗ*. Это комбинированная деталь, состоящая из баритонаполненного радиационно-защитного материала и негорючего стекломагнезитового листа. Свинцовый эквивалент панелей зависит от толщины сердечника – среднего слоя панели. Монтаж осуществляется аналогично с гипсокартонными листами на алюминиевые монтажные профили [83]. Значения свинцового эквивалента для панели Протекс ПРЗ 12 мм при различном напряжении анодной трубки представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Свинцовый эквивалент, обеспечиваемый панелью Протекс ПРЗ 12 мм при различном напряжении анодной трубки

Значения свинцового эквивалента панелей марки Протекс ПРЗ 12											
напряжение на трубке, кВ	70	80	90	95	100	110	120	125	130	140	150
свинцовый эквивалент, ммPb	0,74	0,86	0,9	0,87	0,82	0,73	0,64	0,61	0,59	0,56	0,51

Для облагораживания поверхностей композиционных материалов необходима отделка высоковязкими составами. Таких материалов немного и практически все они имеют ряд технологических и эксплуатационных недостатков [68]. Так, эпоксидные композиции имеют низкую адгезию к древесной подложке, ярко выраженное УФ-старение (желтизна покрытия, отслойка от подложки) [57]. Составы, в которых в качестве защитного наполнителя используются отходы оптического стекла, имеют повышенную шероховатость и серый «пыльный» цвет покрытия, что влечет дополнительную отделку. Полистирольные покрытия из-за хрупкости практически не применяются. Кроме того, большинство полимерных покрытий не выдерживают обработку дезактивирующими и агрессивными моющими средствами, которая является обязательной в специфических помещениях (медицинские кабинеты, лаборатории контроля и т.п.) [56].

Таким образом, можно сделать вывод, что создание рентгенозащитной композиции является актуальным направлением исследовательской деятельности [110]. На кафедре механической обработки древесины ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» в течение нескольких лет ведется разработка линейки рентгенозащитных композитов, в том числе композиции со специфическими свойствами для формирования покрытия на древесине и древесных материалах.

1.5. Рентгенозащитная лакокрасочная композиция

Разработанная на кафедре МОД ФГБОУ ВО УГЛТУ линейка плитных рентгенозащитных материалов на основе древесины и древесных материалов не обладает достаточными эстетическими свойствами, поэтому необходимо предусмотреть для них финишную отделку лакокрасочными материалами, по возможности усиливающими показатели рентгенозащитных свойств [19].

С этой целью разработана лакокрасочная композиция, на основе которой будет формироваться рентгенозащитное покрытие на древесной подложке [107]. Для ее создания используются следующие компоненты: в качестве связующего используется водо-дисперсионная акриловая краска, в качестве наполнителя - сульфат сернистой кислоты, в качестве разбавителя - дистиллированная вода. Композиция представляет собой аналог шпатлевочного состава, обладает высокой вязкостью и продолжительным временем высыхания (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.8 – Внешний вид рентгенозащитного покрытия на древесной подложке

Представляется целесообразным продолжить исследования по разработке оптимального состава рентгенозащитной композиции по комплексу физико-механических и рентгенозащитных свойств и технико-эксплуатационных свойств покрытия, сформированного на древесной подложке.

1.6. Основные выводы. Задачи исследований

1. Человечество накопило огромный практический и теоретический опыт по применению в различных областях защитных материалов от ионизирующих излучений. Пагубное воздействие на живой организм рентгеновского излучения является мощным стимулом для развития науки и техники, занимающейся разработкой и изготовлением всевозможных средств защиты как коллективного, так и индивидуального применения.

2. В настоящее время на отечественном рынке представлена широкая гамма разнообразных материалов, способных выполнять защиту от рентгеновского излучения, среди которых черные и цветные металлы, строительные и композиционные материалы. Основным недостатком этих материалов являются низкие эксплуатационные, конструкционные, экологические, декоративные свойства и высокая стоимость.

3. Линейка рентгенозащитных ЛКМ представлена небольшим ассортиментом (эпоксидные, на основе жидкого стекла, полиэфирные и др.), многие материалы имеют ограниченную область применения, т.к. обладают адгезией только к одному виду подложки.

4. Исследования защитных и технико-эксплуатационных свойств разработанной рентгенозащитной композиции и покрытия, сформированного на древесной подложке, являются актуальными и своевременными.

На основании сделанных выводов поставлены следующие **задачи работы**:

1. Экспериментально-аналитически спрогнозировать время высыхания РЗ ЛКП на основе разработанной РЗ ЛКК на древесной подложке.

2. Разработать оптимальную и рациональную рецептуру РЗ ЛКК и исследовать ее свойства.

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

4. Рассчитать экономическую эффективность производства изделия специального назначения и сравнить ее с материалами-конкурентами.

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.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ВЫСЫХАНИЯ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОГО ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ДРЕВЕСНОЙ ПОДЛОЖКЕ

2.1. Постановка задачи

Проведенные на кафедре механической обработки древесины ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» исследования разработанных рентгенозащитных лакокрасочных композиций (РЗ ЛКК), предназначенных для отделки изделий из древесины и древесных композитов, в состав которых входят минеральный наполнитель и различные виды связующих (водные, эпоксидные, силикатные и др.) показали, что наиболее высокие показатели по совокупности рентгенозащитных и технико-эксплуатационных свойств, проявили составы на основе полимерного связующего – вододисперсионной акриловой краски (ВД-АК) [110].

Данные варианты составов РЗ ЛКК, помимо своей экологичности, позволяет обеспечить необходимую степень смачивания инертных и тяжелых по своей природе молекул сульфата бария и удерживать их во взвешенном состоянии [67] достаточно продолжительное время, не нарушая при этом целостности цепочки полимера (Рисунок 2.1). Поэтому ВД-АК в разработанной РЗ ЛКК выступает не только в роли связующего, но и является разбавителем, т.к. уменьшает вязкость исследуемой груботертой композиции [105].

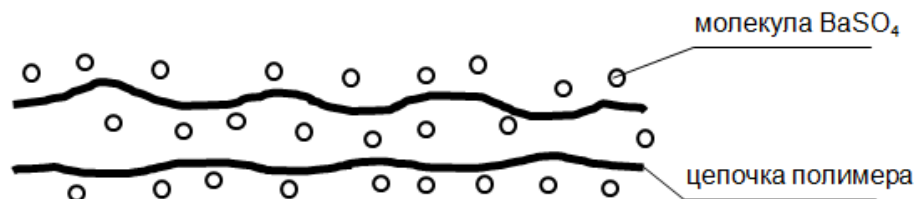


Рисунок 2.1. – Взаимодействие минерального наполнителя
и связующего разработанной РЗ ЛКК

Получаемое рентгенозащитное лакокрасочное покрытие (РЗ ЛКП) на основе разработанной РЗ ЛКК соответствует ГОСТ 33095-2014 «Покрyтия защитно-декоративные на мебели из древесины и древесных материалов. Его структурная схема представлена на Рисунке 2.2.

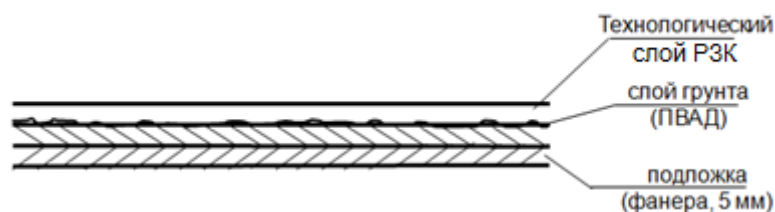


Рисунок 2.2. – Структурная схема РЗ ЛКП на основе разработанной РЗ ЛКК

Так как рентгенозащитные свойства разработанной РЗ ЛКК проявляются только при нанесении ее на подложку, то встает задача подбора режимных параметров формирования РЗ ЛКП. Как известно, одной из наиболее важных технико-эксплуатационных характеристик при этом является время высыхания состава на древесной подложке [20].

В процессе технологической апробации были сделан вывод о том, что присутствие минерального наполнителя в объемах, сопоставимых или превышающих связующее, превращает композицию в процессе высыхания в твердое пористое («камневидное») тело [55]. Природа таких композиций схожа с растворами строительных смесей, процесс высыхания которых является «физическим», т.е. отверждение происходит только за счет испарения жидкости сначала с поверхности пленки, а затем из внутренних слоев. Схематично этот процесс представлен на Рисунке 2.3.

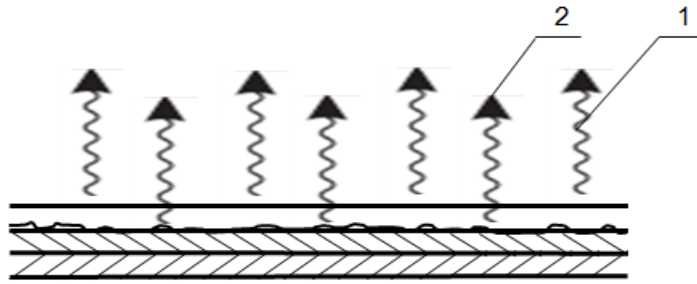


Рисунок 2.3. – Процесс «физического» высыхания РЗ ЛКП:

1 – испарение жидкости с поверхности пленки; 2 – испарение жидкости из внутренних слоев и стабилизация покрытия (усадка технологического слоя)

Продолжительность процесса высыхания покрытия в таких случаях зависит от соотношения компонентов в композиции, толщины технологического слоя, природы и гигроскопичности подложки и параметров агента сушки (температуры и влажности). Поэтому для прогнозирования времени высыхания РЗ ЛКП было принято решение об использовании теоретических закономерностей кинетики высыхания твердых пористых тел [18].

2.2. Теоретические закономерности кинетики высыхания твердых пористых тел

С теплотехнической точки зрения в процессе отверждения (высыхания) покрытий можно выделить три стадии (Рисунок 2.4): I - подъем температуры; II - собственно сушка; III - охлаждение покрытия [18].

Стадия I характеризуется наличием температурного градиента в пленке $\Delta t = t_c - t_n$, который тем больше, чем выше температура агента сушки t_c и ниже температура нагреваемых материалов покрытия и подложки t_n . Большой перепад температур приводит к неравномерному протеканию процесса отверждения: в верхней части пленки возможны деструктивные процессы, тогда как в других слоях пленки процесс может быть еще полностью не завершен.

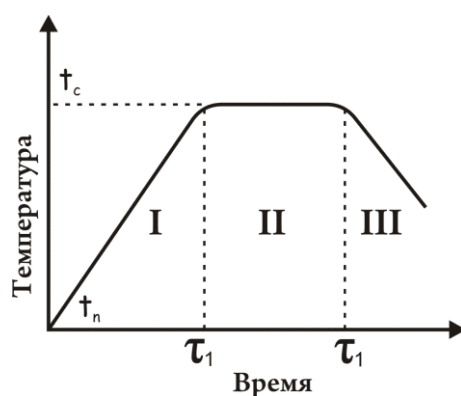


Рисунок 2.4. – Температурно-временная характеристика процесса отверждения (высыхания) покрытий

Стадия I обычно длительна и во многом определяет общее время высыхания покрытия. Время τ_1 зависит от массы и теплофизических параметров материалов покрытия и подложки, а также скорости подвода к ним теплоты. Ориентировочно время τ_1 (в мин.), необходимое для выравнивания t_n и t_c , определяется как утроенное произведение толщины покрываемого изделия δ (в мм), т.е. $\tau_1 = 3\delta$.

Продолжительность стадии II зависит от скорости протекания процессов в пленке и является функцией температуры.

Стадия III может быть проведена как в пределах сушильной установки, так и за её пределами.

Для того чтобы определить время высыхания РЗ ЛКП, воспользуемся следующими соображениями. На Рисунок 2.5 изображена кривая, по которой протекает процесс высыхания РЗ ЛКП за счёт испарения растворителей из плёнки, в нашем случае - воды.

Кривая процесса высыхания твердых пористых тел, протекающего за счет испарения летучих веществ, представлена на Рисунке 2.5.

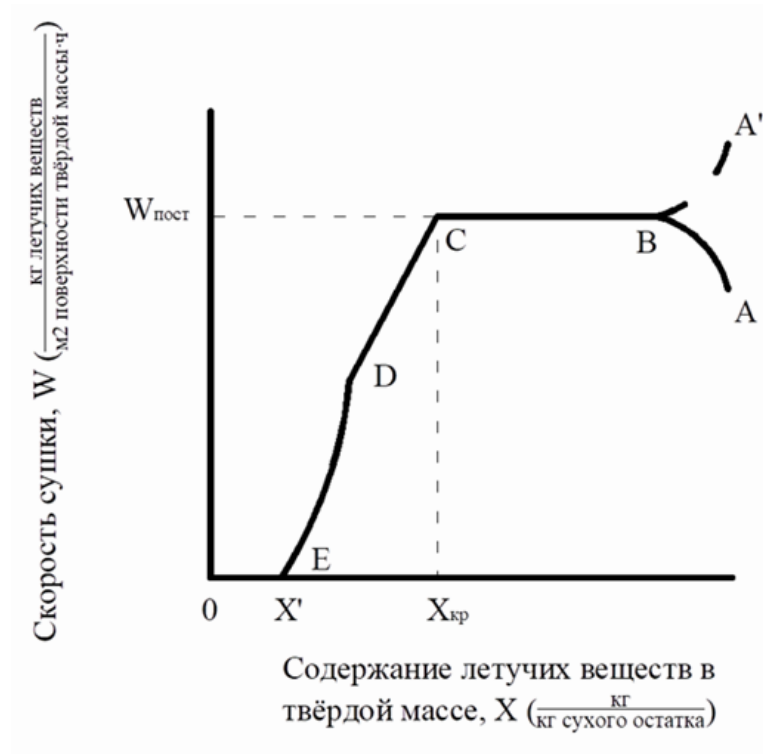


Рисунок 2.5.- Кривая процесса высыхания твердых пористых тел, протекающего за счёт испарения летучих веществ

Весь процесс сушки лакокрасочного покрытия условно можно разделить на два периода: сушка с постоянной скоростью (участок BC) и сушка с переменной скоростью (участок CE). Для упрощения расчетов при построении графиков кривую высыхания на участке между точками C и E рассматривается как отрезок.

Уравнение скорости высыхания РЗ ЛКП будет иметь вид:

$$W = \frac{-LdX}{Ad\tau}, \quad (2.1)$$

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.

Проинтегрировав зависимость (2.1) в пределах от X_1 до X_2 , получим:

$$\tau = \int_0^{\tau} d\tau = \frac{L}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{W}. \quad (2.2)$$

Для периода высыхания с постоянной скоростью, когда X_1 и $X_2 > X_{\text{крит}}$ и $W = W_{\text{пост}}$, уравнение (2.2) принимает следующий вид:

$$\tau = \frac{L(X_1 - X_2)}{AW_{\text{пост}}}. \quad (2.3)$$

Для периода высыхания с убывающей скоростью, когда X_1 и $X_2 < X_{\text{крит}}$, имеем два случая:

а) *общий случай*. Для любого вида кривой высыхания уравнение (2.2) может быть проинтегрировано графически с получением соответствующего значения τ .

б) *специальный случай*. Величина W линейна относительно X , как, например, в области CD на Рисунок 2.2. В этом случае:

$$W = mX + b, \quad (2.4)$$

где m – значение тангенса угла наклона прямолинейной части кривой;
 b – постоянная.

Подставив W в уравнение (2.2) получим:

$$\tau = \frac{L}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{mX + b} = \frac{L}{mA} \ln \frac{mX_1 + b}{mX_2 + b}. \quad (2.5)$$

Преобразовав уравнение (2.5) приводим его к следующему виду:

$$\tau = \frac{L(X_1 - X_2)}{A(W_1 - W_2)} \ln \frac{W_1}{W_2} = \frac{L(X_1 - X_2)}{AW_{\text{cp}}}, \quad (2.6)$$

где – средняя логарифмическая разность между W_1 при X_1 и W_2 при X_2 .

За недостаточным именем соответствующих данных, часто кривую скорости высыхания между точками С и Е принимают за прямую линию. Тогда имеем:

$$W = m(X - X') = \frac{W_{\text{пост}}(X - X')}{X_{\text{кр}} - X'}, \quad (2.7)$$

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).

Таким образом, для уравнения (2.6) имеем:

$$\tau = \frac{L(X_{\text{крит}} - X')}{W_{\text{пост}}A} \ln \frac{X_{\text{кр}} - X'}{X_2 - X'}. \quad (2.8)$$

2.3. Исследования по определению времени высыхания рентгенозащитного лакокрасочного покрытия

С целью определения времени высыхания РЗ ЛКП были изготовлены образцы из березовой фанеры ГОСТ 3916.1-2018 «Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Технические условия» размерами 18×20×5 мм, которые использовались в качестве древесной подложки. Далее полученные образцы шлифовались до шероховатости поверхности $R_{m_{max}} \leq 16$ мкм с последующим нанесением слоя грунтовки на основе поливинилацетатной дисперсии (ПВАД). Нанесение РЗ ЛКК на подложку осуществлялось шпателем вручную. Для получения толщины рентгенозащитного слоя $3 \pm 0,1$ мм использовался трафарет в размер образца подложки. Схема формирования толщины технологического слоя РЗ ЛКП представлена на Рисунке 2.6. Варианты составов РЗ ЛКК наносимых на древесную подложку представлены в таблице 2.1. Количество воды во всех составах было постоянным и составляло 60 г. Образцы с нанесенным РЗ ЛКП высушивались в помещении при температуре воздуха 20 ± 2 °С (при естественной сушке) и 60 ± 2 °С (при конвективной сушке) и относительной влажностью воздуха 65 ± 5 % [103].

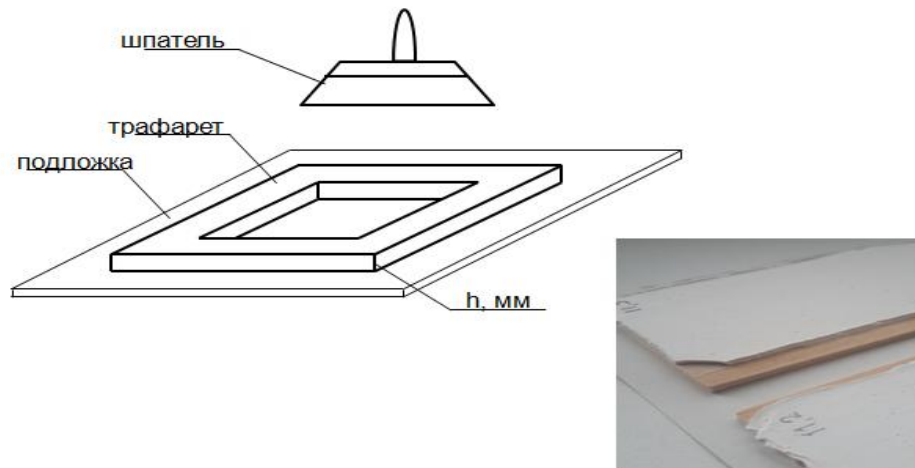


Рисунок 2.6. – Схема формирования толщины технологического слоя РЗ ЛКП

Таблица 2.1 – Варианты составов РЗ ЛКК

Компоненты композиции, г	Номер состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество наполнителя (сульфат бария)	150			200			250		
Количество связующего (вододисперсионная акриловая краска)	60	75	90	60	75	90	60	75	90
Количество разбавителя (вода дистиллированная)	60								

Для определения время высыхания РЗ ЛКП использовался весовой метод [51], который заключался в следующем:

- измерялись масса и площадь образца древесной подложки;
- формировался рентгенозащитный слой толщиной $3 \pm 0,1$ мм ракельным способом с применением трафарета;
- производилось первое взвешивание образца и фиксировалось начало отсчета времени высыхания РЗ ЛКП;
- повторное и последующие взвешивания образцов проводились с интервалом 10 минут до фиксации трех одинаковых показателей значений массы

образца, что свидетельствовало об окончании процесса испарения разбавителя («физического» высыхания) и стабилизации покрытия. Время окончания процесса сушки фиксировалось в точке достижения первого из трех одинаковых значений массы образца [108].

По результаты экспериментальных исследований приведенных в Приложениях 1 и 2 построены зависимости скорости высыхания РЗ ЛКП от содержания в ней летучих веществ при естественной сушке (Рисунок 2.7) и при конвективной сушке (Рисунок 2.8).

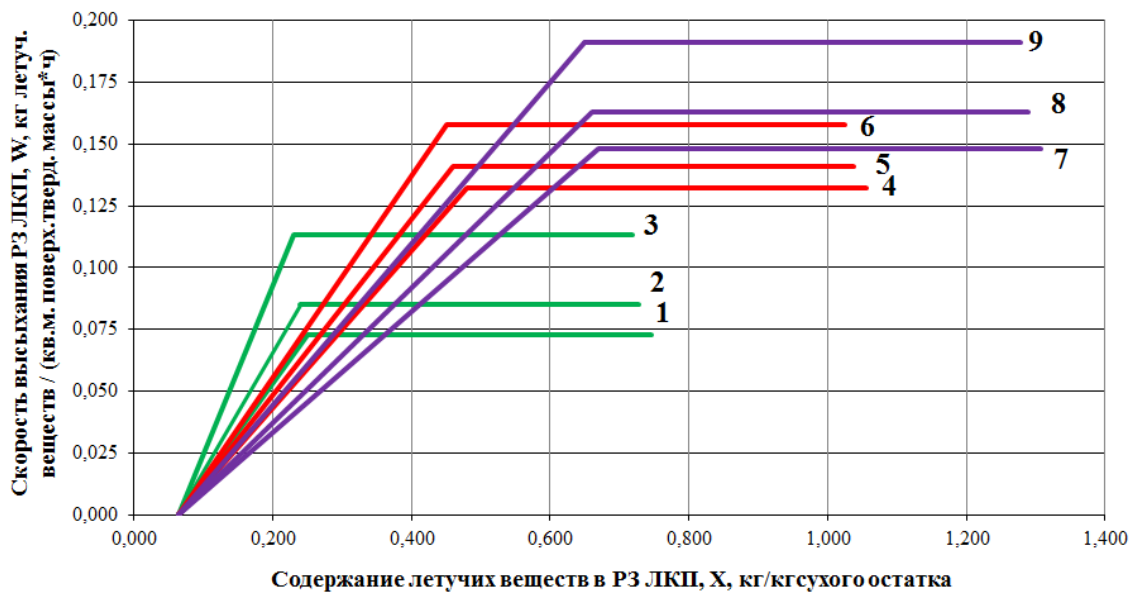


Рисунок 2.7. – Зависимость скорости высыхания РЗ ЛКП при естественной сушке от содержания в ней летучих веществ (цифрами обозначен номер состава)

Таким образом, в результате проведения экспериментальных исследований видно, что весь процесс высыхания РЗ ЛКП условно можно разделить на два периода (Рисунок 2.5): сушка с постоянной скоростью (участок ВС) и сушка с переменной скоростью (участок СЕ). Для определения времени высыхания при $W_{\text{пост.}}$ использовано уравнение (2.3), а для определения приближённого значения времени высыхания с переменной скоростью - уравнение (2.8). Общее время высыхания РЗ ЛКП определяется как сумма полученных значений.

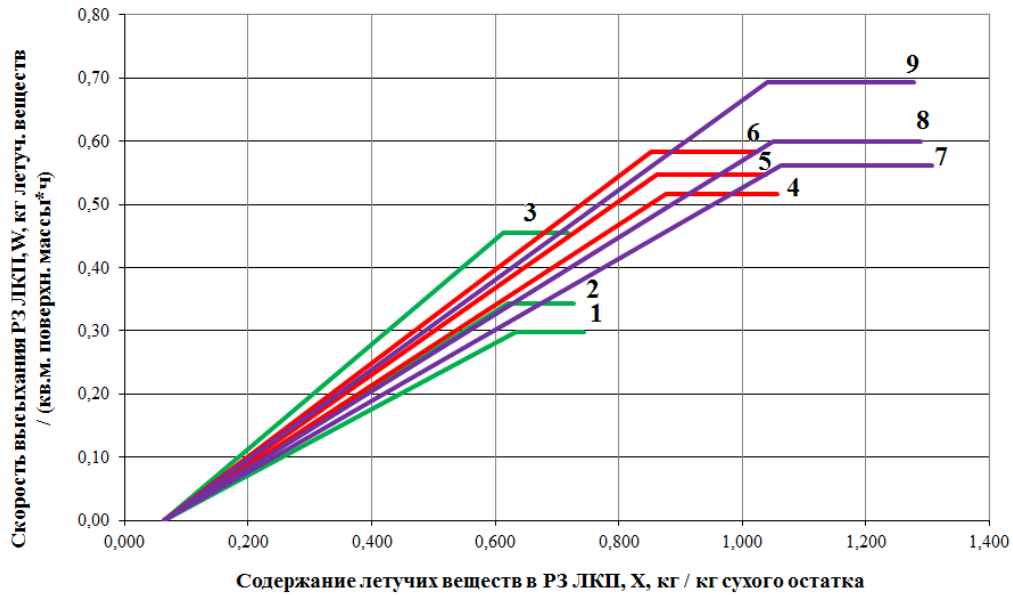


Рисунок 2.8. – Зависимость скорости высыхания РЗ ЛКП при конвективной сушке от содержания в ней летучих веществ (цифрами обозначен номер состава)

Используя расчетные значения продолжительности высыхания РЗ ЛКП построены графические зависимости времени высыхания от варианта состава РЗ ЛКК при естественной сушке (Рисунок 2.9) и при конвективной сушке (Рисунок 2.10).

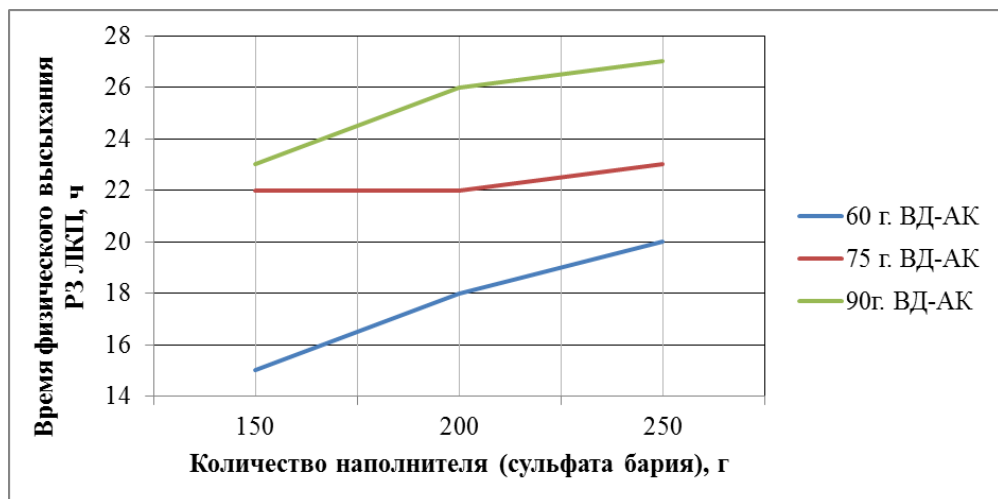


Рисунок 2.9. – Зависимость продолжительности высыхания РЗ ЛКП при естественной сушке от содержания наполнителя (сульфата бария) и связующего (вододисперсионной акриловой краски) в составе РЗ ЛКК

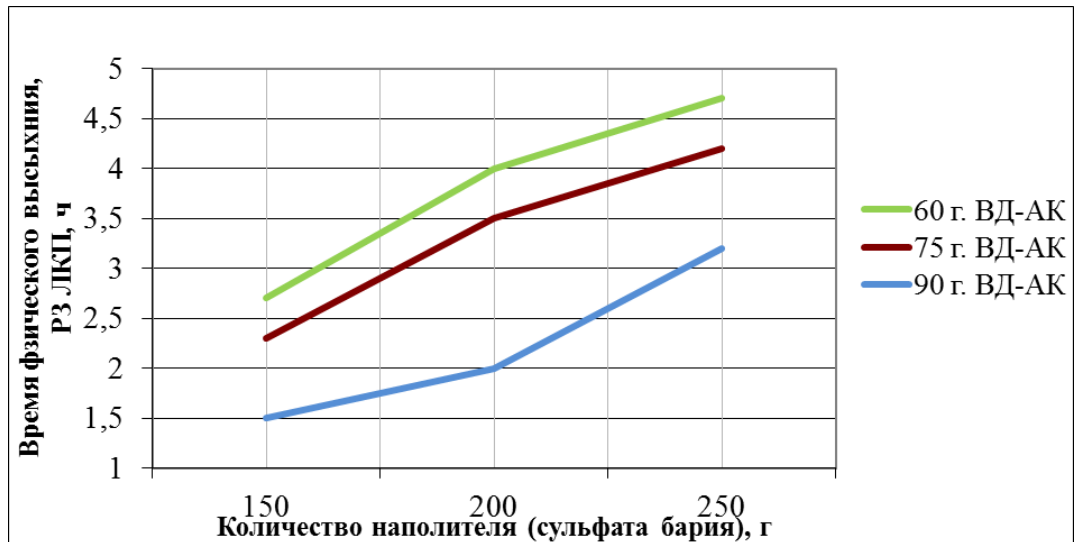


Рисунок 2.10. – Зависимость продолжительности высыхания РЗ ЛКП при конвективной сушке от содержания наполнителя (сульфата бария) и связующего (вододисперсионной акриловой краски) в составе РЗ ЛКК

2.4. Выводы по главе

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

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 минерального наполнителя (сульфата бария) в РЗ ЛКК снижается скорость высыхания рентгенозащитного покрытия предположительно потому, что наполнитель одновременно выступает в роли влагоудерживающего агента и, следовательно, увеличивается время «физического» высыхания технологического слоя.

3. С увеличением содержания связующего (ВД-АК) в композиции увеличивается содержание летучих веществ и уменьшается скорость ее 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 слой подложки, 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 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.

3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Общие положения

В данной главе представлены общие методические положения при проведении экспериментов и обработки их результатов, а также дается характеристика используемых материалов, применяемого оборудования [50].

На основании задач, представленных в главе 1, с учетом анализа рассматриваемых научных источников, установлена необходимость экспериментального изучения некоторых вопросов разработки рецептуры рентгенозащитной лакокрасочной композиции (РЗ ЛКК) и процесса формирования на ее основе рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) на древесной подложке.

Экспериментальные исследования [12] выполнялись исходя из поставленных задач [76-79] по следующим основным направлениям:

- исследование влияния компонентов, входящих в РЗ ЛКК на время высыхания покрытия на ее основе при естественной и конвективной сушке и рентгенозащитные свойства;
- определение оптимального и рационального (компромиссного) состава РЗ ЛКК;
- исследование свойств оптимального состава РЗ ЛКК;
- исследование физико-механических свойств РЗ ЛКП, сформированного на основе РЗ ЛКК.

3.2. Исходные материалы и их характеристики

3.2.1. Древесная подложка

В качестве древесной подложки использована березовая фанера марки ФК толщиной 5 мм, влажностью 8 ± 2 %, удовлетворяющая по качеству требованиям

ГОСТ 3916.1-2018 «Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Технические условия». Основные физико-механические свойства фанеры представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Физико-механические свойства фанеры марки ФК

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение
1.	Предел прочности при статическом изгибе вдоль волокон наружных слоев, не менее	МПа	25
2.	Предел прочности при растяжении вдоль волокон, не менее	МПа	30
3.	Модуль упругости при статическом изгибе вдоль волокон, не менее	МПа	7000
4.	Ударная вязкость при изгибе, не менее	кДж/м	34
5.	Твердость	МПа	20
6.	Коэффициент звукопоглощения, в диапазоне частот, Гц 250—500 1000—2000	дБ	0,1 0,3
7.	Звукоизоляция	дБ	23
8.	Биологическая стойкость: • класс опасности • естественная стойкость к воздействию: - дереворазрушающих грибов; - дереворазрушающих насекомых	-	2 3 5
9.	Класс горючести	по ГОСТ 30244	

3.2.2. Рентгенозащитная лакокрасочная композиция

Рентгенозащитная лакокрасочная композиция (РЗ ЛКК) включает в свой состав:

- связующее – водорастворимая акриловая краска Акрэм-Комфорт-20;
- наполнитель – барий серноокислый;
- разбавитель – вода дистиллированная.

Акриловая краска Акрэм-Комфорт-20 (полуматовая) (ВД-АК), ТУ 2316-014-0-31953544-00 «Водные лакокрасочные материалы для промышленной отделки деревянных окон и дверей» - представляет собой водно-дисперсионную композицию на акриловой основе, предназначенную для окрашивания деревянных окон, дверей, панелей, ДВП, МДФ. Срок службы покрытия на основе краски в условиях умеренного климата составляет не менее 5 лет. Техническая характеристика акриловой краски Акрэм-Комфорт-20 представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Техническая характеристика ВД-АК Акрэм-Комфорт-20

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение
1.	Содержание сухих веществ	%	49-54
2.	Вязкость по ВЗ-246, не менее	с	60
3.	Разбавитель (если потребуется)	-	вода
4.	Расход на один слой (в зависимости от метода нанесения)	г/м ²	100 – 130
5.	Время высыхания на отлип при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 65 %	ч	20
6.	Плотность	г/см ³	1,2
7.	Степень перетира, не более	мкм	20

Барий сернокислый аккумуляторный (BaSO₄) ГОСТ 11380-74 «Барий сернокислый аккумуляторный. Технические условия» применяется в электротехнической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической и других отраслях промышленности, не ядовит, пожаро- и взрывобезопасен, по степени воздействия на организм человека относится к веществам 4-го класса опасности. Его необходимо хранить в закрытых складских помещениях, предохраняя от попадания влаги. Гарантийный срок хранения составляет 1,5 года с даты изготовления. Основные физико-химические показатели бария сернокислого представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Основные физико- химические показатели бария сернокислого

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение
1.	Внешний вид		порошок белого цвета
2.	*Массовая доля сернокислого бария ($BaSO_4$), не менее	%	98,5
3.	*Массовая доля сернокислого кальция ($CaSO_4$), не более	%	0,4
4.	*Массовая доля железа (Fe), не более	%	0,01
5.	*Массовая доля хлоридов в пересчете на хлорид-ион (Cl^-), не более	%	0,04
6.	*Массовая доля влаги, не более	%	0,1
7.	Массовая доля потерь при прокаливании, не более	%	1,0
8.	Фракционный состав: - массовая доля частиц крупной фракции диаметром 5 мкм и более, не более - массовая доля частиц мелкой фракции диаметром 1 мкм и менее	%	10 10-40
9.	Массовая доля остатка при просеве на сите с сеткой № 016 К по ГОСТ 6613-86, не более	%	1
10.	Насыпная плотность, не более	г/см ³	0,7
* Нормы даны в пересчете на прокаленный продукт			

Вода дистиллированная (ГОСТ6709-72) «Вода дистиллированная. Технические условия» в РЗ ЛКК выступает в роли разбавителя. Она представляет собой прозрачную, бесцветную жидкость, не имеющую запаха, получается путем перегонки в дистилляторах. Основные физико-химические показатели дистиллированной воды приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Физико-химические показатели дистиллированной воды

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение
1.	Массовая концентрация, не более: - остатка после выпаривания; - аммиака и аммонийных солей (NH_4) - нитратов (KO_3) - сульфатов (SO_4)	мг/дм ³	5 0,02 0,2 0,5

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение
	- хлоридов (Cl) - алюминия (Al) - железа (Fe) - кальция (Ca) - меди (Cu), - свинца (Pb) - цинка (Zn) - веществ, восстанавливающих $\text{KMnO}_4(\text{O})$		0,02 0,05 0,05 0,8 0,02 0,05 0,2 0,08
2.	рН воды	-	5,4 - 6,6
3.	Удельная электропроводимость при 20 °С, не более	см/м	$5 \cdot 10^{-4}$

3.3. Характеристики оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры

Перечень лабораторного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры для проведения экспериментальных исследований приведен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Перечень применяемого оборудования и установок

№ п/п	Наименование	Марка	Нормативный документ	Назначение
1.	цифровая рентгенографическая система	«ПУЛЬМОСКА Н-760У» («УНИС КАН»)	-	получение цифрового изображения
2.	электронно-вычислительная машина	ASUS	Процессор Intel(R) Core(TM) i3-2365M CPU @ 1.40GHz 1.40 GHz Оперативная память 4,00 ГБ Тип системы 64-разрядная операционная система, процессор x64	цифровая обработка растрового изображения

№ п/п	Наименование	Марка	Нормативный документ	Назначение
	программное обеспечение		Photoshop 2022 - 24.7.2.	
3.	весы аналитические	ВЛТ-510-П	ГОСТ 24104-01	определение: массы компонентов РЗ ЛКК, сухого остатка и времени высыхания РЗ ЛКК, влагопоглощение РЗ ЛКП
4.	трафарет, шпатель	-	-	формирование толщины РЗ ЛКП
5.	штангенциркуль	-	ГОСТ 166-89	измерение толщины РЗ ЛКП
6.	роторная мешалка смеситель	DLH	-	перемешивание компонентов РЗ ЛКК
7.	прибор для определения степени перетира	«Клин»	-	определение степени перетира РЗ ЛКК
8.	адгезиометр	РН «Градиент – Техно»	ГОСТ 15140, ИСО 2409	определение адгезионных свойств РЗ ЛКП, прочности при изгибе и ударе РЗ ЛКП
9.	липкая лента - скотч (адгезия к стали составляет 2,45 Н/см ²)	«309 Т» фирмы ЗМ	-	
10.	кисть волосяная	-	-	
11.	лупа с 2,5 -4 кратным увеличением	-	-	
12.	шкаф сушильный лабораторный	ШС 80-01	-	высушивание образцов с нанесенной РЗ ЛКК
13.	решетки металлические	-	-	высушивание образцов с нанесенной РЗ ЛКК

№ п/п	Наименование	Марка	Нормативный документ	Назначение
14.	посуда лабораторная стеклянная:	-	ГОСТ 29251, ГОСТ 25336-82	определение влагопоглощения РЗ ЛКП
	- бюкс	-	ГОСТ 23932-90	
	- стакан граненый	-	ГОСТ 785	определение теплостойкости РЗ ЛКП
	- стекло химико-лабораторное	-	ГОСТ 21400-75	определение: сухого остатка, времени высухания и расхода РЗ ЛКК
15.	маятниковый прибор	М-3	ГОСТ 25336-2021	определение твердости РЗ ЛКП
16.	шкала гибкости	ШГ-3	ГОСТ 25336-2021	определение прочности при изгибе РЗ ЛКП
17.	прибор для определения прочности ЛКП при ударе	У-1а	по ГОСТ 25336-2021	определение прочности при ударе РЗ ЛКП
18.	термометр лабораторный	ТЛ-4	ТУ 25-2021.003-88	измерение температуры в сушильном шкафу и агента сушки
19.	психрометр аспирационный		ГОСТ 6353-52	измерение влажности и температуры воздуха
20.	прибор для определения времени высухания ЛКМ	ВИ-4	-	время высухания РЗ ЛКК
21.	микрометр гладкий	МК 75 - 100 (ц.д. 0,01мм)	ГОСТ 6507-90	определение толщины слоя РЗ ЛКК на подложке

№ п/п	Наименование	Марка	Нормативный документ	Назначение
22.	секундомер механический	СОСпр-2б-2-000	свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.3 3.059.A №42780	определение весовых параметров образцов в процессе высыхания РЗ ЛКК, определение твердости, прочности при изгибе, влагопоглощения теплостойкости РЗ ЛКП
23.	фотоэлектрический блескомер	ФБ-2	-	определение блеска РЗ ЛКП
24.	пикнометр металлический	П-1ЛТ	-	определение плотности РЗ ЛКК
25.	прибор для определения прочности на истирание	НПП-1	-	определение прочности на истирание РЗ ЛКП
26.	микроскоп окулярный	МИР II	-	определение краевого угла смачивания РЗ ЛКК
27.	климатическая камера	Feutron 3001	-	определение стойкости к воздействию действия УФ-излучения РЗ ЛКП

3.4. Методика изготовления опытных образцов

Образцы древесной подложки размерами 45×90×5 мм изготавливались из березовой фанеры и шлифовались под отделку до шероховатости поверхности $R_{m_{max}} \leq 16$ мкм. Далее на них предварительно наносился слой грунтовки на основе ПВА-дисперсии с последующей сушкой при температуре 20 ± 2 °С в течение 24 часов.

РЗ ЛКК, состоящая из минерального наполнителя (бария сернокислого), связующего (ВД-АК Акрэм-Комфорт-20) и разбавителя (дистиллированной воды) наносилась на древесную подложку шпателем вручную для получения требуемой

толщины защитного слоя $3 \pm 0,1$ мм. Для этих целей использовался трафарет в размер образца древесной подложки. Количество компонентов РЗ ЛКК в каждом опыте задавалось методической сеткой эксперимента (таблица 3.6). Древесная подложка с нанесенной РЗ ЛКК высушивались на металлических решетках:

- для атмосферной сушки при температуре 20 ± 2 °С
- для конвективной сушки при температуре 60 ± 2 °С.

Продолжительность высыхания каждого состава была разная и замерялась через каждые 10 минут при помощи секундомера. Качество полученного РЗ ЛКП образцов оценивалось по внешнему виду.

3.5. Методики проведения экспериментальных исследований

При выборе методов и средств контроля предпочтение отдавалось тем, которые обеспечивали требуемую точность измерений, надежность и достоверность экспериментальных данных.

Объектами измерения и контроля являлись:

1. Постоянные факторы:

- свойства березовой фанеры – как древесной подложки для нанесения на нее РЗ ЛКК;
- свойства водорастворимой акриловой краски Акрэм-Комфорт-20 – как связующего;
- свойства сернокислого бария – как минерального наполнителя, придающего рентгенозащитные свойства композиции;
- свойства дистиллированной воды – как разбавителя;
- параметры технологических режимов нанесения РЗ ЛКК.

2. Выходные параметры:

- свойства РЗ ЛКК (свинцовый эквивалент, время высыхания при естественной и конвективной сушке, расход, сухой остаток, степень перетира, плотность, величина краевого угла смачивания);

- физико-механические свойства РЗ ЛКП (твердость, прочность при изгибе, прочность при ударе, прочность при истирании, влагопоглощение, адгезионная прочность, блеск, теплостойкость, стойкость к воздействию УФ-излучения) [51].

Остановимся подробно на методиках определения перечисленных выходных параметров.

3.5.1. Исследования свойств рентгенозащитной лакокрасочной композиции

3.5.1.1. Определение рентгенозащитных свойств

Количественный анализ рентгенозащитных свойств РЗ ЛКК осуществлялся путем сравнения численных значений цветового оттенка области изображения, на которую был спроецирован объект и области прямого воздействия излучения на регистрирующие элементы дозиметра.

Цифровые растровые изображения представляют собой матрицу элементарных единиц – пикселей, каждый из которых обладает собственным цветом. Растровое изображение может состоять из нескольких миллионов пикселей, благодаря чему исчезает дискретное восприятие изображения. Цвет каждого пикселя определяется одним числом или набором чисел в зависимости от выбранного цветового режима палитры. Цветовые режимы характеризуются компонентными цветами (каналами) и глубиной цвета. При смешении компонентных цветов в различных пропорциях образуется множество всех оттенков цветов палитры. Глубина цветового режима определяет количество оттенков компонентного цвета и задается в битах. Например, цветовой режим RGB (24 бита) состоит из трех компонентных цветов (красный, зеленый, синий) с глубиной цвета каждого канала – 8 бит ($2^8=256$), т.е. каждый канал содержит по 256 оттенков цвета.

Ахроматические изображения с целью уменьшения размера файла формируются на основании одноканальных цветовых режимов с различной

глубиной цвета, которая в данном случае определяет светлоту серого цвета. Данный цветовой режим имеет название «оттенки серого» (grayscale). Определяя значение глубины цвета каждого конкретного пикселя, и оценивая светлоту различных областей изображения можно определять относительное изменение интенсивности (кратность ослабления) рентгеновских лучей при прохождении через объект [109].

Кратность ослабления рентгеновского излучения определяется по формуле:

$$K_i = \frac{(2^D - 1) - d_{\phi}}{(2^D - 1) - d_{o\phi}}, \quad (3.1)$$

где: K_i – кратность ослабления рентгеновского излучения, раз;

D – глубина канала изображения, бит;

d_{ϕ} – значение глубины цвета фона, т.е. участка прямого воздействия;

$d_{o\phi}$ – значение глубины цвета участка соответствующего объекту.

Количество оттенков серого меняется в зависимости от глубины канала, и может быть равно для канала глубиной 8 бит (1 байт) – 256; 12 бит – 4096; 14 бит – 16 386; 16 бит (2 байта) – 65536. Поскольку единицей измерения информации является 1 байт, то на практике используются каналы с глубиной 8 бит (1 байт) и 16 бит (2 байта).

От глубины канала в первую очередь зависит точность измерений, так погрешность измерения составит:

- для канала 8 бит (256 цветов):

$$\Delta = \frac{100}{265 \cdot 2} = 0,2 \%;$$

- для канала 16 бит (65536 цветов):

$$\Delta = \frac{100}{25536 \cdot 2} = 0,00076 \%.$$

Необходимо отметить, что на пути преобразования энергии фотонов излучения в конкретные значения глубины цвета пикселя изображения, происходит множество физических процессов, которые могут вызвать искажение результатов (ошибки аналого-цифрового преобразования, скрытые дефекты исследуемого объекта, дефекты матрицы дозиметра и т.д.). Поэтому для

уменьшения погрешности эксперимента в целом, необходимо измерять среднее арифметическое значение глубины цвета массива пикселей, которые принадлежат к определенной области изображения (Рисунок 3.1).



Рисунок 3.1. – Определение среднего арифметического глубины цвета массива пикселей

Опыт проведения подобного анализа показывает, что различные снимки, выполненные в одинаковых условиях, имеют отличие цветового оттенка одних и тех же участков в пределах 1-2 %, поэтому нежелательно сравнивать результаты измерений, полученные с разных снимков. Это особенно важно при определении эквивалентов по ослаблению относительно других материалов (чаще всего определяют свинцовый эквивалент). В этом случае эталонные образцы должны присутствовать на каждом снимке.

На практике определение значения глубины цвета может быть реализовано средствами любого языка программирования, однако существует ряд графических редакторов изображений, в которых уже реализована данная функция в виде инструмента «Пипетка» (eyedropper). Наиболее удобными для этих целей являются такие программные продукты, как Corel Photo-Paint, Adobe Photoshop, Corel Paint Shop Pro.

К достоинствам данного метода обработки цифровых изображений относится более высокая скорость обработки, возможность автоматизации

процесса программными средствами ЭВМ, а так же отсутствие необходимости использования специального оборудования для обработки пленочных снимков.

3.5.1.2. Определение времени высыхания

Высыханием лакокрасочной композиции (ЛКК) условно называют процесс затвердевания жидкой ЛКК, нанесенной тонким слоем на древесную подложку. Время высыхания ЛКК является важнейшим фактором, от которого зависит режим процесса отделки, а в некоторых случаях и возможность применения ЛКК в данном производстве [104]. Время высыхания зависит от температуры и влажности воздуха, от толщины покрытия и других факторов.

Различают четыре основные степени высыхания:

- высыхание «от пыли»;
- высыхание «на отлип»;
- высыхание практическое;
- высыхание полное.

Высыханием «от пыли» называется момент, когда образуется тончайшая поверхностная пленка.

Практическим высыханием называется момент, когда образуется достаточно твердое, противостоящее механическим воздействиям покрытие, допускающее нанесение последующих слоев материала, а также проведение операций шлифования и полирования пастами.

Под *полным высыханием* понимают полное окончание процесса пленкообразования, возможность проведения операции шлифования.

Высыхание от пыли. Стеклянную пластинку со слоем нанесенного лакокрасочного материала сразу после нанесения помещают в термостат и выдерживают. Затем периодически вынимают из шкафа и дышат на нее в течение 1 с, держа пластинку на расстоянии 10 см ото рта.

Появление матового пятна указывает на образование поверхностной пленочки, характеризующей высыхание «от пыли». Время, прошедшее от

нанесения слоя лакокрасочного материала до появления матового пятна от дыхания, является временем высыхания «от пыли».

Высыхание «на отлип». На край отделанной пластинки насыпают небольшое количество песка и стряхивают. Испытания повторяют до тех пор, пока на пластинке не будет оставаться следов от насыпанного песка. Время, которое прошло от нанесения ЛКК до момента, когда от насыпаемого песка не будет оставаться отпечатка, будет являться временем высыхания «на отлип».

Время высыхания определяется согласно ГОСТ 19007-73 «Материалы лакокрасочные. Метод определения времени и степени высыхания» [26]. Для определения времени *практического высыхания* применяется специальный прибором ВИ-4 (Рисунок 3.2), представляющим собой металлический цилиндр с нижней канонической частью и плоским основанием, в котором укреплен опорный резиновый кружок площадью в 1 см^2 . Масса прибора составляет $200 \pm 1 \text{ г}$. На пластинку с высохшей ЛКК, накладывают кусочек марли, а поверх нее на 30 секунд устанавливают прибор. Затем прибор и марлю снимают и по характеру отпечатка судят о степени высыхания пленки.

Время с начала нанесения до момента, после которого на пленке не остается прилипших волокон или отпечатка от марли, является временем практического высыхания пленки.

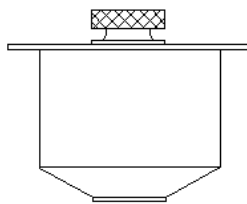


Рисунок 3.2. – Внешний вид прибора ВИ-4

3.5.1.3. Определение расхода и сухого остатка

Расход ЛКК является важным показателем, характеризующим эффективность его применения.

Удельный расход определялся по методу взвешивания подложки до и после нанесения покрытия согласно ГОСТ 8832-76 «Материалы лакокрасочные. Методы получения лакокрасочного покрытия для испытания» [37].

В качестве подложки использовалась дюралюминиевая пластина заданного размера. Взвешивание проводилась с помощью аналитических весов ВЛТ-510-П. Расход определяется согласно:

$$\theta = \frac{M_2 - M_1}{S}, \quad (3.2)$$

где: θ – расход РЗК, г/м²;

M_1 – масса пластины перед нанесением РЗК, г;

M_2 – масса пластины после нанесения РЗК, г;

S – площадь пластины, м².

Содержание сухого остатка в жидкой ЛКК является одним из важнейших показателей. Чем выше его содержание в ЛКК при рабочей вязкости, тем экономичнее материал, так как уменьшаются непроизводительные затраты растворителей, меньше слоев наносится на изделие для получения покрытия необходимой толщины.

Содержание сухого остатка определялось методом испарения разбавителя, входящего в состав РЗ ЛКК согласно ГОСТ 31939-2012 «Материалы лакокрасочные. Определение массовой доли нелетучих веществ» [27]. Испарение разбавителя происходило под действием тепла, излучаемого на поверхность РЗ ЛКК инфракрасной лампой.

Разработанная РЗ ЛКК равномерным слоем наносилась на поверхность предварительно взвешенных с точностью до 0,01 г. стеклянных пластин размером 75×25 мм. Пластинки с РЗ ЛКК взвешивались, а затем помещались в сушильный шкаф (Рисунок 3.3) и высушивались до практического высыхания.

Содержание разбавителя в РЗ ЛКК определялось согласно формуле:

$$X_1 = \frac{(G_1 - G_2) \cdot 100}{G_1 - G}, \quad (3.3)$$

где: X_1 – содержание разбавителя в РЗ ЛКК, %;

G - вес пластины без покрытия, г;

G_1 - вес пластины с нанесенной РЗ ЛКК до сушки, г;

G_2 - вес пластины с нанесенной РЗ ЛКК после сушки, г;

Содержание сухого остатка в РЗ ЛКК определялось согласно:

$$X_2 = 100 - X_1, \quad (3.4)$$

где X_2 – содержание сухого остатка в РЗ ЛКК, %.

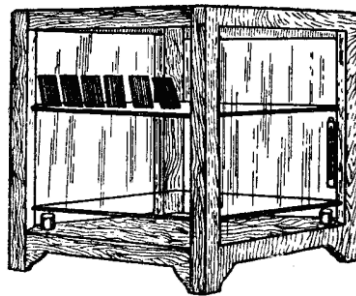


Рисунок 3.3. – Шкаф для сушки РЗ ЛКК

3.5.1.4. Определение степени перетира

Степень перетира ЛКК оказывает большое влияние на антикоррозийные и декоративные свойства лакокрасочного покрытия (ЛКП). Покрытие, полученное из груботертой ЛКК, более водопроницаемо и менее стойко к механическим воздействиям, чем покрытие, образованное тонкорастертым материалом.

Степень перетира РЗК измерялась микрометром и прибором «Клин» согласно ГОСТ 31973-2013 «Материалы лакокрасочные. Метод определения степени перетира» (Рисунок 3.4) [28].

Прибор «Клин» пригоден к работе, если при перпендикулярном наложении лезвия скребка на измерительную поверхность плиты щель между ними отсутствует.

При определении степени перетира РЗ ЛКК прибор ставился на плоскую поверхность, в который помещалось некоторое количество испытываемой РЗ ЛКК в наиболее глубокую часть канавки. Держа скребок перпендикулярно плоскости плиты, сдвигался излишек РЗ ЛКК вдоль прибора. По мере

уменьшения глубины канавки наступал момент, когда зазор между скребком и углом канавки становился меньше зерен РЗ ЛКК, которые при этом начинали захватываться и двигаться вместе со скребком, оставляя на РЗ ЛКК ясно видимые следы (риски). Начало появления рисок, совпадающее с той или иной цифрой шкалы, показывало размеры зерен РЗ ЛКК.

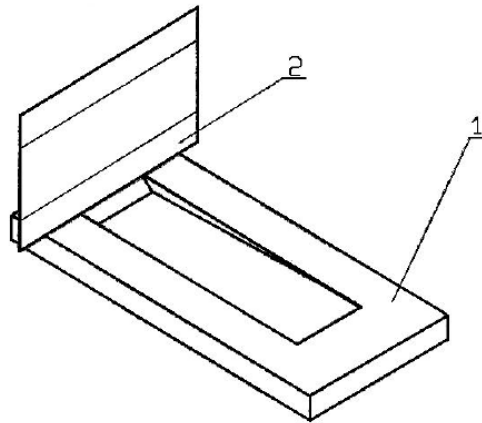


Рисунок 3.4. – Внешний вид прибора «Клин»: 1 - канавка, 2 - скребок

Исследования повторялись три раза. За результат испытаний в микрометрах принималось среднее арифметическое значение трех определений по шкале прибора. После каждого определения измерительная поверхность и скребок тщательно протирались тканью, смоченной в растворителе.

3.5.1.5. Определение плотности

Плотность вязких и полужидких сред - это масса жидкого материала, отнесенная к единице объема, выраженная в граммах на кубический сантиметр. Плотность определяется согласно ГОСТ 31992.1-2012 «Материалы лакокрасочные. Метод определения плотности» [31]. Для ее определения используется пикнометры (Рисунок 3.5).



Рисунок 3.5. – Внешний вид пикнометра металлического П-1ЛТ

Испытания проводятся при стандартной ($23,0 \pm 0,5$) °С или согласованной температуре, например ($20,0 \pm 0,5$) °С. Испытуемый материал и пикнометр должны быть выдержаны до достижения стандартной или согласованной температуры, при этом колебания температуры в процессе испытаний не должны превышать 0,5 °С.

Металлический пикнометр аккуратно очищают снаружи, промывают внутри растворителем, не оставляющим следов после испарения, и тщательно высушивают.

Пикнометр выдерживают при стандартной или согласованной температуре в течение 30 минут, затем пикнометр взвешивают с точностью 0,0001 г для пикнометров объемом менее 50 см, а для других пикнометров - не более 0,001 г.

Пикнометр заполняют кипяченой дистиллированной водой (ГОСТ 6709-72 «Вода дистиллированная. Технические условия») температурой не более, чем на 1 °С ниже температуры испытания, не допуская образования пузырьков. Закрывают пикнометр пробкой или крышкой, оставляя переливное отверстие открытым.

Пикнометр с водой помещают в термостат или водяную баню на 30 минут до достижения постоянной температуры испытания. Затем пикнометр вынимают из термостата или бани. Воду, вытекшую из отверстия в пробке или крышке, удаляют фильтровальной бумагой или тканью и тщательно осушают его снаружи тем же материалом.

Пикнометр с водой без промедления взвешивают с той же точностью, что и пустой, при этом воду, вытекающую из отверстия в пробке или крышке во время взвешивания, не удаляют.

Плотность материала при температуре испытания t_T вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V_t}, \quad (3.5)$$

где ρ — материала, г/см³,

m_2 — масса пикнометра, заполненного материалом, при температуре t_T , г;

m_1 m_l — масса пустого пикнометра, г;

V_t — объем пикнометра при температуре испытания t_T , см³.

За результат испытания принимают среднеарифметическое значение результатов трех определений.

3.5.1.6. Определение величины краевого угла смачивания

Адгезия и смачивание являются неотъемлемыми принципами технологии создания новых композитных материалов. Адгезия зависит от природы контактирующих фаз, свойств их поверхностей и площади контакта. Следствием адгезии является смачивание – поверхностное явление, наблюдаемое при контакте жидкости с твердым телом. Кинетически смачивание представляется как самопроизвольный процесс растекания жидкости по твердой поверхности. От того, насколько хорошо происходит процесс смачивания подложки, во многом зависят внешний вид, сплошность, адгезионная прочность и защитная способность материала.

Адгезионные характеристики РЗ ЛКК оценивалось величиной «краевого угла смачивания» [114], согласно формуле:

$$tg\theta = \frac{4dh}{d^2 - 4h^2}, \quad (3.6)$$

где $tg\theta$ - тангенс краевого угла смачивания, °;

d и h – соответственно диаметр и высота капли, мм.

Растекаемость материала на поверхности подложки обеспечивает важные технологические параметры – расход количества материала на единицу площади отделяемой поверхности, количество нанесений материала для получения требуемой толщины покрытия, способ нанесения.

Для взаимодействия разнородных материалов необходимо обеспечить между ними контакт. Закономерности образования и разрушения адгезионных соединений можно рассматривать как зависимость когезионных свойств адгезивов и субстратов (прочность и обуславливающие ее параметры, вязкость адгезива η , Пуаз) от условий их контакта (температура T , °С; давление P , МПа; продолжительность контакта τ , ч.). Легко достигается контакт твердых поверхностей с газами, однако и при использовании в качестве адгезивов жидкостей имеются благоприятные условия для контактирования.

Для определения адгезионных характеристик необходимо выделить такой параметр, как краевой угол смачивания. Лабораторная методика определения данного показателя приведена в [50]. Положение капли жидкости (РЗ ЛКК, связующее) и ее форма на твердой горизонтальной поверхности в воздушной среде будет определяться совокупностью действующих сил в виде поверхностных натяжений на границе раздела фаз: твердое тело – газ, твердое тело – жидкость, жидкость – газ (Рисунок 3.6).

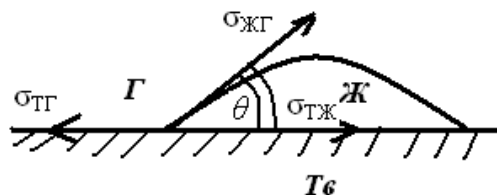


Рисунок 3.6. – Неподвижная капля жидкости на твердой поверхности в состоянии равновесия.

В равновесных условиях (т.е. в отсутствие гравитации, капиллярного эффекта, химического взаимодействия, диффузии) связь между краевым углом смачивания и поверхностными энергиями контактирующих фаз устанавливается уравнением Юнга:

$$W_{\text{т.ж.}} = \delta_{\text{т.ж.}}(1 + \cos\theta), \quad (3.7)$$

где $\delta_{\text{т.ж.}}$ - поверхностное натяжение на разделе сред между жидкостью и твердым телом, МДж/м²;

θ – краевой угол смачивания, град.

Положение капли и ее форма на твердой горизонтальной поверхности в воздушной среде будет зависеть от совокупности действующих сил. Различают три случая контактного взаимодействия жидкости с поверхностью твердого тела:

1) полное смачивание, когда угол θ стремится к нулю, жидкость свободно растекается по поверхности твердого тела;

2) неполное (ограниченное) смачивание, $0 < \theta < 90^{\circ}$, капля жидкости имеет форму шарового сегмента;

3) несмачивание, угол θ превышает 90° , жидкость стремится «уйти» с поверхности или собраться в сферическую каплю.

Измеряемые на практике краевые углы смачивания часто отличаются от термодинамически равновесных. Эти отклонения в основном связаны с дефектами поверхности твердого тела: шероховатостью, гетерогенной неоднородностью и др. Эти факторы практически исключают возможность полного смачивания или полного его отсутствия [53].

3.5.2. Исследования свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия

Показатели оценки качества покрытий, под которым понимают совокупность свойств рентгенозащитной пленки, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с

назначением, в целом рассматриваются в двух аспектах: функциональном и эстетическом.

Под функциональной стороной качества отделки подразумевается степень соответствия свойств покрытия требованиям условий эксплуатации. Испытания лакокрасочных покрытий проводятся для выявления соответствия свойств полученных пленок требованиям, которые устанавливаются действующими стандартами и техническим условиям. Основными показателями, отражающими функциональную сторону качества рентгенозащитного покрытия, являются толщина, твердость, прочность на изгиб и удар, адгезия к подложке, водостойкость, теплостойкость, стойкость к механическому истиранию, стойкость к УФ-излучению, степень блеска. Эстетические свойства будут определяться как совокупность перечисленных свойств, сохраняющих свои показатели и внешний вид защитной пленки в процессе эксплуатации РЗ ЛКП.

3.5.2.1. Определение твердости

Высокая твердость покрытия – необходимое условие его долговечности. Этот показатель характеризует не только эксплуатационные свойства пленки, но и влияет на технологические процессы облагораживания покрытий. Твердость характеризует степень отверждения покрытия.

Определение условной твердости покрытий производится в соответствии с ГОСТ 5233-2021 «Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытия по маятниковому прибору» [36] при температуре от 20 до 200 °С осуществлялось на маятниковом приборе типа М-3 (Рисунок 3.7).



Рисунок 3.7. – Маятниковый прибор типа М-3:

1 – основание; 2 – шкала; 3 – груз; 4 – двухстрелочный маятник; 5 – соединительная планка; 6 – рамка; 7 – столик; 8 – стальные шарики; 9 – отвес; 11 – установочные винты; 10 – штатив; 12 – пусковой механизм

Сущность метода заключается в определении времени (числа колебаний), в течение которого амплитуда затухающих колебаний маятника, помещенного на РЗ ЛКП, уменьшается на заданную величину.

Маятник прибора М-3 имеет две точки опоры в виде стальных шариков. Маятник устанавливался в нулевое положение с помощью рамки, к которой плотно приставлялась соединительная планка в местах вырезов. С помощью грузиков регулировалось время затухания маятника.

Маятниковый прибор посредством винтов устанавливали по отвесу в горизонтальное положение. Шкала разделена на градусы. В центре шкалы находится нуль, в обе стороны от которого нанесены деления. Для исключения влияния движения воздуха маятниковый аппарат помещен в застекленный футляр.

Перед началом работы производили проверку работы маятникового прибора по «стеклянному числу» – времени затухания колебаний маятника от 5 до 2°, точки опоры которого лежат на пластинке из фотостекла. Определяли «стеклянное число» так же, как и твердость покрытия. «Стекло число» прибора должно быть равно 440 ± 6 с. Если оно не укладывалось в указанные пределы, то движением грузиков вверх или вниз по длине маятника его доводили

до нормы. Стеклянные пластинки, применяемые для проверки «стеклянного числа» и определения твердости пленки, перед испытанием тщательно промывали этиловым эфиром и высушивали.

Шарики маятника периодически осматривали. При изнашивании поверхности шариков в точке соприкосновения их незначительно поворачивали. Перед каждым испытанием шарик тщательно протирали ватным спонжем, смоченным этиловым эфиром, а затем сухой чистой марлей.

На стеклянную пластинку наносили испытуемую РЗ ЛКК. Метод нанесения, способ и время сушки, количество слоев, толщину пленки, срок выдержки покрытия до испытания выбирали опытным путем.

После высыхания РЗ ЛКП, окрашенную стеклянную пластинку клали на плиту прибора пленкой вверх под стальные шарики. Шарик устанавливали на поверхности пленки так, чтобы маятник находился вблизи нуля шкалы. Затем поднимали рамку, прижимали к ней соединительную планку и устанавливали маятник на нуль. Придерживая соединительную планку, маятник с помощью пускового приспособления осторожно отводили влево до деления шкалы 5° . При этом следили, чтобы шарики не сдвинулись с места. Затем рамку отпускали, маятник освобождали, заставляя его свободно качаться, и одновременно с этим опускали секундомер. Когда амплитуда колебаний маятника достигнет 2° , секундомер останавливали.

Величина твердости РЗ ЛКП вычисляли согласно:

$$H = \frac{t}{t_1}, \quad (3.8)$$

где: H - твердость РЗ ЛКП, условных единиц;

t – время затухания колебаний маятника (от 5° до 2°), точки опоры которого лежат на испытуемом РЗ ЛКП, с;

t_1 - время затухания колебаний маятника (от 5° до 2°), точки опоры которого лежат на пластинке из фотостекла, «стеклянное число», с.

За результат испытания принималось среднее арифметическое из двух определений, расхождение между результатами которых не превышало 3 %.

3.5.2.2. Определение прочности при изгибе

Прочность РЗ ЛКП при изгибе является косвенной характеристикой эластичности покрытия.

Прочность при изгибе определяется согласно ГОСТ 31974-2012 «Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности покрытия при изгибе вокруг цилиндрического стержня» [29]. Метод основан на определении минимального диаметра стержня, изгибание на котором окрашенной металлической пластинки не вызывает механического разрушения РЗ ЛКП.

Прочность пленки при изгибе определяли на приборе - шкала гибкости «ШГ» (Рисунок 3.8), который представляет собой набор шести стальных стержней различного диаметра укрепленных на станине. Стержни имеют диаметры: 20, 15, 10, 5, 3, 1 мм.

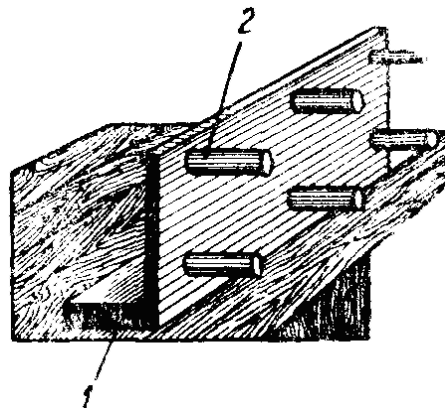


Рисунок 3.8. – Шкала гибкости ШГ:

1 – станина (угольник), 2 – стержень

На пластинку наносили испытуемую РЗ ЛКК. После высыхания пленки на РЗ ЛКК, пластинку, плотно прижимая к стержню, изгибали пленкой вверх на 180° вокруг стержня диаметром 20 мм. Изгибание проводили плавно в течение 2 – 3 с.

Если после изгибания на пленке при рассматривании в лупу с четырехкратным увеличением были незаметны трещины и пленка не отслаивалась, то пластинку изгибали в другом месте вокруг стержня 15 мм, затем

в новом месте вокруг стержня 10 мм и т.д. до тех пор, пока на пленке не были обнаружены указанные выше изменения.

Эластичность пленки при изгибе на металлическом стержне оценивали после испытания трех пластинок на одном и том же стержне. Результат испытания должен совпадать не менее чем для двух испытываемых пластинок. Если совпадение не было достигнуто, испытание повторяли. При оценке результатов не принимали во внимание состояние поверхности на расстоянии до 5 мм от края пластинки.

Прочность пленки при изгибе выражалась минимальным диаметром стержня, на котором РЗ ЛКП осталось неизменным. В том случае, если пленка давала трещины или отслаивалась при изгибании вокруг стержня диаметром 20 мм, то она оценивалась как «негибкая».

«Прочность при изгибе 10 мм» означала, что пленка не изменяется при изгибании вокруг стержней 20, 15 и 10 мм, но разрушается (покрывается трещинами или отслаивается) на стержне 5 мм.

Для стержней 5, 3 и 1 мм под диаметром понимался удвоенный радиус кривизны верхней части.

«Прочность при изгибе 1 мм» означала, что пленка остается неповрежденной при изгибе вокруг всех стержней. Определение прочности пленок на изгиб проводят при температуре окружающего воздуха 18 – 20 °С и относительной влажностью не более 70 %.

3.5.2.3. Определение прочности при ударе

Прочностью на удар называют свойство покрытия не разрушаться при воздействии ударных нагрузок.

Прочность при ударе определяется в соответствии с ГОСТ 4765-73 «Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности при ударе» [35]. Метод основан на определении максимальной высоты, при падении с которой

груз не вызывает видимых механических повреждений на поверхности пластинки с РЗ ЛКП.

Для испытания прочности пленки на удар применялся прибор У-1а (Рисунок 3.9).

РЗ ЛКК в соответствии с ГОСТ 8832–76 наносилась на металлическую пластинку из декапированной или углеродистой конструкционной тонколистовой стали толщиной 0,5 – 0,8 мм размером 100×100 и 70×150 мм и высушивалось. После высыхания покрытия пластинку помещали пленкой вверх на наковальню под боек.

Пластинка плотно прилегала к поверхности наковальни. Участок пластинки, подвергающийся удару, находился на расстоянии не менее 40 мм от центров других участков, ранее подвергавшихся удару.

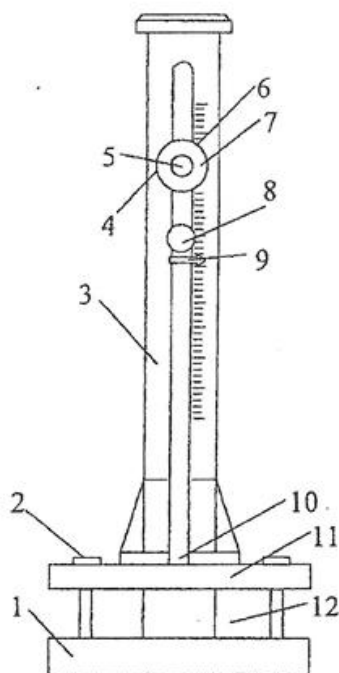


Рисунок 3.9. – Внешний вид прибора У-1а: 1 - станина, 2 - стойка, 3- направляющая труба, 4 - стопорный винт, 5 - кнопка, 6 - стопор, 7 - корпус, 8 - свободно падающий груз, 9 - указательная стрелка, 10 - боек с шариком, 11- траверса, 12 - наковальня

Груз устанавливали на высоте 10 см. Нажимом на кнопку освобождали груз, который при этом свободно падал на боек. Боек передавал удар пластинке, лежащей на наковальне. Затем груз поднимали, вынимали пластинку и рассматривали состояние пленки в месте удара в лупу с 4-кратным увеличением.

При отсутствии трещин, смятия и отслаивания пленки высоту сбрасывания груза увеличивали вплоть до 50 см, и определение прочности пленки при ударе проводили каждый раз на новом месте пластинки до тех пор, пока не обнаруживалось разрушение пленки.

При каждом поворотном испытании высоту сбрасывания груза увеличивали на 5 – 10 см. Повторные испытания проводили каждый раз на новом участке пластинки.

Прочность пленки при ударе выражали числом, обозначающим максимальную высоту (в см), с которой падает груз весом 1 кг, не вызывая механических разрушений пленки. Результат записывают в Па·м. Испытания проводят при температуре окружающего воздуха (20 ± 2) °С.

3.5.2.4. Определение влагопоглощения

Метод определения влагопоглощения, в соответствии с ГОСТ 33352-2015 «Материалы лакокрасочные. Метод определения водопоглощения» [34], основан на способности пленки сорбировать воду.

Влагопоглощение оценивается количеством воды, сорбированной пленкой при заданной температуре (выражается в процентах), или массой сорбированной воды, отнесенной к массе пленки.

Образец полностью погружали в дистиллированную воду температурой 20 ± 2 °С. Затем через заданные промежутки времени образец вынимали из воды, просушивали фильтровальной бумагой и тотчас помещали в бюкс с герметически закрывающейся крышкой, предварительно взвешенный на весах. Бюкс с образцом взвешивают с точностью до 0,01г.

Операцию извлечения образца из воды и взвешивания его вместе с бюксом повторяли до тех пор, пока при двух последних взвешиваниях не был достигнут одинаковый привес пленки.

Влагопоглощение РЗ ЛКП рассчитывали согласно:

$$X = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{(b - a)}, \quad (3.9)$$

где: X – влагопоглощение, %;

m_1 – масса бюкса с образцом после выдержки в воде, г;

m_2 – масса бюкса с образцом до испытания, г;

b – масса образца, г;

a – масса пластинки без покрытия, г.

3.5.2.5. Определение блеска

Блеск является фактором, обеспечивающим эстетические свойства покрытия. Для его определения, в соответствии с ГОСТ 31975-2017 «Материалы лакокрасочные. Метод определения блеска лакокрасочных покрытий под углом 20°, 60° и 85°» [30], использовался фотоэлектрический блескомер ФБ-2 (Рисунок 3.10).

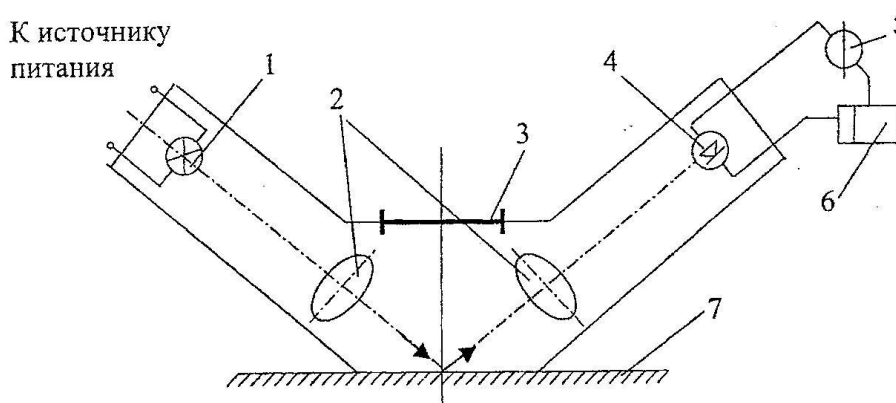


Рисунок 3.10. – Схема фотоэлектрического блескомера ФБ-2:

1 – осветитель; 2 – оптическая система; 3 – отверстие для замера белизны;

4 – фотоэлемент; 5 – измерительное устройство; 6 – усилитель;

7 – контролируемая поверхность

Перед испытанием поверхность РЗ ЛКП протирают сухой фланелью. При замере зеркального отражения головка прибора ставится на пластину ультрафиолетового стекла УФС-1, а указатель устанавливается на делении 65. При замере диффузного отражения (белизны) фотоэлемент прибора помещается в середине отверстия, его головка ставится на пластину из молочного стекла белого цвета марки МС-20, а указатель на деление 96.

Измерения проводятся на расстоянии 10-15 мм от края образца. Количество изменений диффузного отражения - не менее 15, а зеркального - не менее 5. Результаты изменений заносятся в журнал. Правильность показаний прибора периодически проверяли по проверочной пластинке.

Блеск РЗ ЛКП определялся согласно:

$$R = R_m - 0,15D, \quad (3.10)$$

где R - блеск РЗ ЛКП, ед.;

R_m - среднее значение показателей микроамперметра при замере зеркального отражения, ед.;

D - среднее значение показателей микроамперметра при замере диффузного отражения, ед.

$$R_{m_i} = \frac{\sum_{i=1}^5 R_{m_i}}{5}, \quad (3.11)$$

$$D_j = \frac{\sum_{j=1}^{15} R_{m_i}}{15}. \quad (3.12)$$

3.5.2.6. Определение адгезионной прочности

Адгезионная прочность изготовленных образцов РЗ ЛКП проверялась согласно методике, приведенной в ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013, MOD) «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатых надрезов» [32].

В лабораторных условиях испытания проводились при температуре (23 ± 2) °С и относительной влажности (50 ± 5) %. Перед испытанием отделанные

образцы выдерживались при температуре (23 ± 2) °С и относительной влажности (50 ± 5) % не менее 16 часов. На РЗ ЛКП на расстоянии от края образца не менее 10 мм с помощью адгезиометра (Рисунок 3.11) [51] делалось 6 решетчатых надрезов на расстоянии 2 мм друг от друга. Для отрыва РЗ ЛКП от древесной подложки использовался скотч марки «309 Т» фирмы 3М.

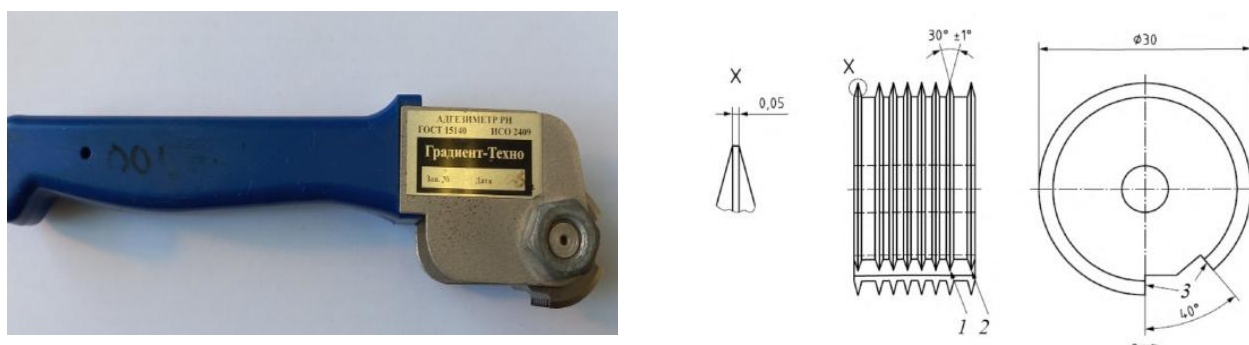

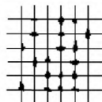
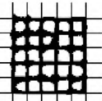


Рисунок 3.11. – Адгезиметр РН «Градиент – Техно»

Адгезия оценивалась по внешнему виду поверхности надрезов исследуемого РЗ ЛКП с использованием сделанных фотографий с 2,5-кратным увеличением по трехбальной шкале (таблице 3.6.). Поверхность испытуемого покрытия классифицировали в соответствии с данными таблице 3.6, путем сравнения с рисунком.

Таблица 3.6 - Оценочная шкала

Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений намного превышает 5 % площади решетки	
Облицовка отслоилось вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

3.5.2.7. Определение прочности на истирание

Сущность метода заключается в определении массы кварцевого песка, необходимого для разрушения лакокрасочного покрытия до подложки при падении на него струи песка. Прочность покрытия к истиранию определяется в соответствии с ГОСТ 20811-75 «Материалы лакокрасочные. Методы испытания покрытий на истирание» количеством песка в килограммах, отнесенного к единице толщины покрытия в микрометрах. Метод применяется для покрытий толщиной не более 60 мкм.

Используют устройство типа НПП-1 для определения прочности покрытия к истиранию падающим песком (Рисунок 3.12) по ТУ 6-10-1950-84; песок кварцевый природный по ГОСТ 6139-78 и 6139-91; стеклянную пластинку размером 9×12 см по ТУ 6-43-0205133-03-91; весы лабораторные с наибольшим пределом взвешивания 5 кг и пределами допускаемой погрешности $\pm 0,03$ г.

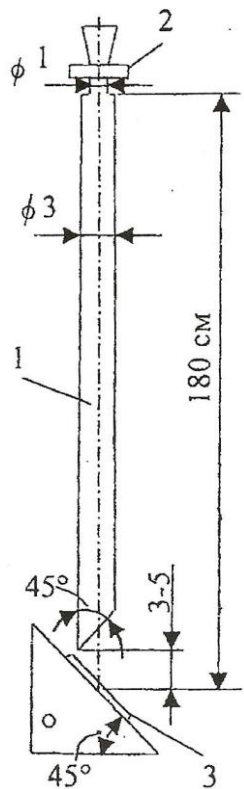


Рисунок 3.12. – Прибор для определения прочности лакокрасочных покрытий на истирание:

1 – направляющая трубка; 2 – воронка; 3 – крепление для образца

Стеклопластиковую пластинку с нанесенным испытуемым лакокрасочным материалом помещают на площадку с креплением для образца. В воронку насыпают песок, предварительно его взвесив.

Из воронки песок высыпается в направляющую трубку и струей падает на образец. С образца песок ссыпается в резервуар. Если истирание покрытия до подложки не произошло, испытание продолжают. При этом песок, собранный в резервуар, возвращают в воронку. Истирание прекращают, как только обнаружится повреждение покрытия до подложки. Песок, собранный в резервуаре, взвешивают и записывают суммарное количество песка, израсходованное на истирание от начала испытания.

Прочность покрытия к истиранию (X , кг) вычисляют по формуле:

$$X = \frac{m}{h}, \quad (3.13)$$

где m – масса песка, израсходованного на истирание, кг;

h – толщина покрытия, мкм.

Результат округляют до второго десятичного знака.

3.5.2.8. Определение теплостойкости

Теплостойкостью лакокрасочных покрытий называют их способность не разрушаться и не менять внешний вид под действием повышенных температур. Для покрытий, формируемых на древесной подложке наибольший интерес представляет теплостойкость при контакте с нагретым телом.

Определение теплостойкости РЗ ЛКП производилось согласно ГОСТ Р 53651-2009 «Материалы лакокрасочные. Метод определения теплового воздействия» [39]. На испытуемый образец с РЗ ЛКП накладывали тонкий ватный тампон диаметром 7 – 8 см и ставили на него стакан с водой, температура которой 60 °С, на 15 мин. Если после снятия стакана на покрытии не останется прилипших ватных волокон, то теплостойкость покрытия считалась удовлетворительной.

3.5.2.9. Определение стойкости к воздействию ультрафиолетового излучения

Метод испытания устойчивости лакокрасочных покрытий под воздействием ртутно-кварцевых ламп путем облучения ультрафиолетовым светом при повышенной температуре служит для оценки защитных свойств лакокрасочных покрытий в условиях умеренно-континентального климата. Испытания проводились согласно ГОСТ 9.401-91 «Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов» [38].

Лакокрасочное покрытие толщиной $3\pm 0,1$ мм формировалось при естественной и конвективной сушке на образцах подложки из фанеры размером $250\times 70\times 3$ мм в количестве 4-х штук для каждого способа отверждения: три из которых использовались для испытаний, один – в качестве эталона. Эталон хранится в комнатных условиях в темноте при температуре $18\text{—}23^\circ\text{C}$ [106].

В соответствии с методикой, испытания проводились в аппарате искусственной погоды – климатической камере Feutron 3001 в условиях для умеренно континентального климата в течение 30 суток (720 часов) при мощности облучения ультрафиолетом 375 Ватт и температуре воздуха в резервуаре 23°C . Орошение водой не применялось, т.к. рентгенозащитное лакокрасочное покрытие предполагается использовать в закрытых отапливаемых помещениях [106].

Подготовку поверхности пластин и нанесение лакокрасочных покрытий необходимой толщины, а также высушивание каждого слоя покрытия производят по режиму, предусмотренному в соответствующих технических условиях на лакокрасочные материалы или в нормативах на покрытия. При отсутствии данных по режиму получения покрытий применяют технологию нанесения, предусмотренную производителем.

После практического высыхания последнего слоя РЗ ЛКП образцов производят выдержку окрашенных пластин в сухом и светлом помещении при

температуре 18—23°C: покрытий естественной сушки — в течение пяти суток, покрытий конвективной сушки — в течение одних суток.

При испытании применяется следующая аппаратура и материалы:

- 1) аппарат искусственной погоды марки Feutron 3001 с вытяжной вентиляцией;
- 2) микрометр гладкий и приборы для измерения толщины покрытий, указанные в таблице 3.5;
- 3) образцы с покрытиями, эталон.

Испытания проводят круглосуточно до появления характерных изменений на покрытии (изменения глянца и цвета, появления пятен, меления, растрескивания и др.), но не более 30 суток (720 час.).

После окончания ускоренного цикла УФ-облучения определяются показатели адгезии к древесной подложке методом решетчатых надрезов, согласно методике, приведенной в ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013, MOD) «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатых надрезов» [32].

3.6. Методика статистической обработки полученных экспериментальных данных

Создание качественного рентгенозащитного покрытия на древесной подложке, обладающего достаточными защитными свойствами, представляет собой сложный процесс. Его эффективность определяется многими факторами и их взаимодействиями.

На стадии проведения предварительных опытов, с целью установления характера зависимости выходной величины от отдельных варьируемых факторов, проводился классический эксперимент. Полученные опытные данные оценивались методами математической статистики. Такая обработка результатов опытов позволяет гарантировать их точность, надежность определения истинного значения и объективность на заданном уровне значимости [2].

По результатам полученных экспериментальных данных вычислялись статистические характеристики полученных выборок [118]:

а) среднее арифметическое

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (3.14)$$

где y_i – значение i -ого элемента в полученной выборке;

n – объем выборки;

б) среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}; \quad (3.15)$$

в) коэффициент вариации

$$v = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100 \% ; \quad (3.16)$$

г) средняя квадратическая ошибка среднего значения

$$S_{\bar{y}} = \frac{S}{\sqrt{n}}; \quad (3.17)$$

д) показатель точности среднего значения

$$\xi = \frac{S_{\bar{y}}}{\bar{y}} \cdot 100 \% = \frac{v}{\sqrt{n}}; \quad (3.18)$$

е) ошибка среднего квадратического отклонения

$$S_s = \frac{S}{\sqrt{2n}}; \quad (3.19)$$

ж) доверительный интервал математического ожидания:

$$\bar{y} - \frac{tS}{\sqrt{n}} \leq M_y \leq \bar{y} + \frac{tS}{\sqrt{n}}, \quad (3.20)$$

где M_y – математическое ожидание;

t – табличное значение t - критерия Стьюдента (находится по выбранному уровню значимости и числу степеней свободы);

з) необходимый объем выборки:

$$n = \frac{t^2 S^2}{\Delta}, \quad (3.21)$$

где $\Delta \leq M_y - \bar{y}$;

и) отбрасывание промахов:

$$t_{\text{расч.}} = \frac{|y_i - \bar{y}|}{S}. \quad (3.22)$$

Если выполняется неравенство $t_{\text{расч.}} > t_{\text{таблице}}$, то рассматриваемый результат считается грубым наблюдением и исключается из выборки [4,5].

Проверка нормальности распределения осуществляется с помощью χ^2 – критерия Пирсона. Диапазон изменения выходной величины в этой выборке разбивается на l интервалов (эти интервалы должны перекрывать ось на отрезке от $-\infty$ до $+\infty$ и в каждый интервал должно попасть не меньше пяти значений выходной величины). Теоретическую вероятность попадания случайной величины в i -й интервал определялось согласно:

$$P_i = \Phi(Z_2) - \Phi(Z_1), \quad (3.23)$$

где: $Z_1 = \frac{(y_i^H - \bar{y})}{S}$, $Z_2 = \frac{(y_i^B - \bar{y})}{S}$;

y_i^H – нижняя граница i -го интервала;

y_i^B – верхняя граница i -го интервала;

$\Phi(Z)$ – нормированная функция Лапласа:

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^Z e^{-x^2/2} dx. \quad (3.24)$$

Значения ее для $Z = Z_1$ и $Z = Z_2$ определяют согласно таблице [118].

Далее определялась величина $\chi_{\text{расч.}}^2$:

$$\chi_{\text{расч.}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^l (m_i - p_i n)^2}{p_i n}. \quad (3.25)$$

По выбранном уровне значимости q и числу степеней свободы $k = l - 3$ согласно таблице [118] определялось значение $\chi_{\text{таблице}}^2$. Гипотеза о нормальности распределения принималась при условии, если $\chi_{\text{расч.}}^2 < \chi_{\text{таблице}}^2$.

Впоследствии, когда требовалось изучить влияние нескольких переменных факторов на величину выходного параметра, проводился многофакторный

эксперимент. Планирование эксперимента осуществлялось по плану Бокса В₃ и определялись [76 – 79]:

а) средние значения по строчкам варьируемых параметров

$$\bar{y} = \frac{1}{\gamma} \cdot y_{ul}, \quad (3.26)$$

где γ – число повторений опыта;

б) значения дисперсий по строчкам:

$$S_u^2 = \frac{1}{\gamma - 1} \sum_{l=1}^{\gamma} (y_{ul} - \bar{y}_u)^2. \quad (3.27)$$

в) однородность дисперсии опытов проверялась с использованием критерия Кохрена:

$$G_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (3.28)$$

где: S_{max}^2 – наибольшая из дисперсии опытов;

S_i^2 – дисперсия i -ого опыта;

N – количество поставленных опытов.

При условии, что $G_{\text{расч.}} \leq G_{\text{таблице}}$ гипотеза об однородности дисперсии опытов принимается:

$$S^2\{\bar{y}\} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}. \quad (3.29)$$

г) коэффициенты регрессионной модели:

$$b_0 = -\frac{1}{16} \cdot \sum_{u=1}^8 y_u + \frac{1}{4} \cdot \sum_{u=9}^{14} y_u, \quad (3.30)$$

$$b_i = \frac{1}{10} \cdot \sum_{u=1}^{14} x_{iu} \cdot y_u, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.31)$$

$$b_{ii} = \frac{1}{16} \cdot \sum_{u=1}^8 y_u - \frac{1}{4} \cdot \sum_{u=9}^{14} y_u + \frac{1}{2} \cdot \sum_{u=9}^{14} x_{iu}^2 \cdot y_u, \quad (3.32)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{u=1}^8 x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u. \quad (3.33)$$

д) функция отклика (регрессионная модель) имеет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (3.34)$$

е) оценка дисперсии коэффициентов регрессионной модели:

$$S^2\{b_0\} = \frac{13}{32} \cdot S^2\{y\}, \quad (3.35)$$

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{10} \cdot S^2\{y\}, \quad (3.36)$$

$$S^2\{b_{ii}\} = \frac{13}{32} \cdot S^2\{y\}, \quad (3.37)$$

$$S^2\{b_{ij}\} = \frac{1}{8} \cdot S^2\{y\}. \quad (3.38)$$

ж) статистическая значимость коэффициентов регрессионной модели:

$$\begin{aligned} |b_i| &\geq t_{\text{таблице}} \cdot S\{b_i\} \\ |b_{ij}| &\geq t_{\text{таблице}} \cdot S\{b_{ij}\}, \end{aligned} \quad (3.39)$$

где: $t_{\text{таблице}}$ – табличное значение t -распределения Стьюдента с уровнем значимости 0,05 и числе степеней свободы $f_1 = N(n - 1)$;

$S\{b_i\}$ – дисперсия i -ого коэффициента уравнения регрессии.

Коэффициенты, удовлетворяющие условию (3.31) считаются равными нулю, т.е. отбрасываются из уравнения регрессии.

з) проверка адекватности регрессионной модели:

$$S_{\text{ад.}}^2 = \frac{S_{\text{ад.}}}{f_{\text{ад.}}} = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{(N - k)}, \quad (3.40)$$

где: \bar{y}_i – значение отклика в i -ом опыте экспериментальных исследований;

\hat{y}_i – значение отклика в i -ом опыте рассчитанное по уравнению регрессии;

k – число коэффициентов уравнения регрессии модели.

Расчетные значения критерия Фишера, определяющего адекватность модели:

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ад.}}^2}{S^2\{y\}}. \quad (3.41)$$

Полученное значение сравнивалось с $F_{\text{таблице}}$, найденными из таблиц для чисел степеней свободы:

$$f_{\text{ад.}} = N - k, \quad (3.42)$$

$$f_{\text{н}} = N \cdot (n - 1). \quad (3.43)$$

При выполнении условия $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл}}$ гипотеза об адекватности модели принимается. Уровень значимости для проводимого статистического анализа задается равным 0,05.

Значительным этапом экспериментальных исследований является интерпретация регрессионной модели с ее последующим анализом.

з) оценка эффективности регрессионной модели:

$$\bar{\bar{y}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N \bar{y}_u. \quad (3.44)$$

Критерий эффективности регрессионной модели:

$$F_{\text{эф.}} = \frac{\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \bar{\bar{y}})^2}{(N - 1) \cdot S_{\text{ад.}}^2}. \quad (3.45)$$

Регрессионная модель статистически эффективна, если $F_{\text{ад.}} \geq F_{\alpha}(f_3, f_2)$, при $f_3 = N - 1$, $f_2 = N - k$ и $q = 0,05$.

и) переход от натуральных значений факторов к нормальным производился следующим образом [86]:

$$x_i = \frac{X_i - X_i^{(0)}}{\Delta_i}, \quad (3.46)$$

где: x_i – нормализованное значение i -ого фактора;

X_i – натуральное значение i -ого фактора;

$X_i^{(0)}$ – натуральное значение i -ого фактора на основном уровне;

Δ_i – шаг варьирования i -ого фактора.

Значительным этапом экспериментальных исследований является интерпретация регрессионной модели с ее последующим анализом.

Для достоверности полученных результатов исследований оценку адгезионных свойств образцов проводили с применением метода экспертной оценки [118]. Степень согласованности мнений экспертов оценивалась с помощью коэффициента конкордации Кендалла, который рассчитывается согласно:

$$W = \frac{12s}{m^2(n^3 - n) - b}, \quad (3.47)$$

где: W – коэффициент конкордации Кендалла;

m – количество экспертов;

n – количество исследуемых образцов;

s и b вычисляются следующим образом:

$$s = \sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^m u_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right\}^2; \quad (3.48)$$

$$b = m \sum_{i=1}^m T_i, \quad (3.49)$$

где величина T_i рассчитываются по формуле:

$$T_i = \sum (t_j^3 - t_j), \quad (3.50)$$

где t_j – число повторений j -го рангового числа в i -й строке.

3.7. Определение рациональных значений исследуемых параметров

Определение рациональных значений параметров режима по комплексу управляемых параметров осуществлялся методом условного центра масс [76-79].

Экстремальные значения всех критериев эффективности обозначаются:

$$Y^* = [\tau = 1(1)n] \quad (3.51)$$

и их координат

$$\{X_{1(i)}^*, X_{2(i)}^*, X_{3(i)}^*, \dots, X_{n(i)}^*\}. \quad (3.52)$$

Полагая, что каждая точка обладает условной массой, значение которой определяют по формуле:

$$m_i = \sum_{j=1}^N Y_i(X_{1(j)}^*, X_{2(j)}^*, X_{3(j)}^*, \dots, X_{n(j)}^*), \quad (3.53)$$

или

$$m_i = 1 + \frac{\sum_{\varphi=1}^{n-1} Y_i(X_{1(\varphi)}^*, X_{2(\varphi)}^*, X_{3(\varphi)}^*, \dots, X_{n(\varphi)}^*)}{Y_i^*}, \quad (3.54)$$

где $[\varphi = 1(1)(n - 1)]$.

Координаты условного центра масс находят по следующей формуле:

$$X_j^{**} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot X_{j(i)}^*}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (3.55)$$

Таким образом, находились значения параметров управления, обеспечивающих оптимальные значения показателей эффективности [6].

4. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ РЕЦЕПТУРЫ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОЙ ЛАКОКРАСОЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЕЕ СВОЙСТВ

4.1. Разработка рецептуры рентгенозащитной лакокрасочной композиции

4.1.1. Постановка задачи

Для того, чтобы разработанная РЗ ЛКК отвечала своим требованиям при нанесении ее на древесную подложку (ослабление потока рентгеновского излучения), были проведены исследования по разработке ее оптимальной (рациональной) рецептуры. В качестве переменных факторов были выбраны:

- количество минерального наполнителя в РЗ ЛКК (сульфата бария), г;
- количество связующего в РЗ ЛКК (водорастворимой акриловой краски), г;
- количество разбавителя в РЗ ЛКК (дистиллированной воды), г.

4.1.2. Планирование эксперимента

Схема проведения эксперимента представлена на Рисунке 4.1. Для его проведения выбран трехфакторный план Бокса В₃, включающий 14 опытов. Данный план обладает приемлемыми статистическими характеристиками при небольшом числе опытов и прост в реализации [76-79]. Значения постоянных, диапазоны изменения варьируемых факторов и наименование выходных величин при проведении экспериментов приведены соответственно в таблицах 4.1 - 4.3. Диапазоны изменения варьируемых факторов выбраны с учетом проведенных пробных экспериментов.

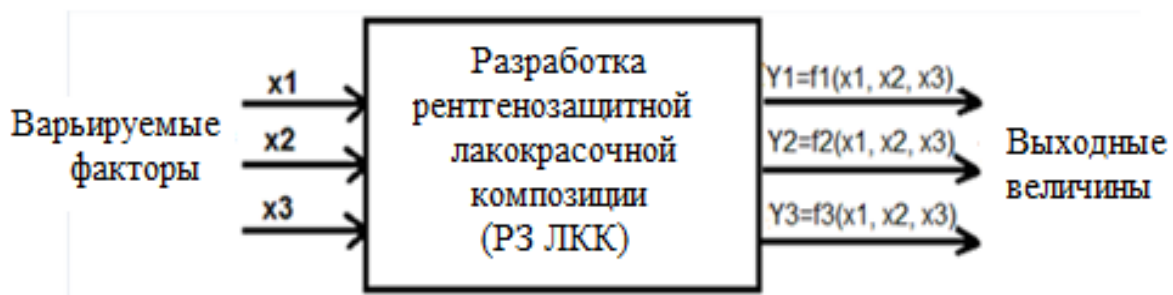


Рисунок 4.1. – Схема проведения эксперимента по разработке рецептуры РЗ ЛКК

Таблица 4.1 – Постоянные факторы при проведении экспериментов

№ п/п	Постоянный фактор	Показатель
1.	Относительная влажность воздуха, %	65 ± 5
2.	Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$	20 ± 2
3.	Время перемешивания компонентов, входящих в рентгенозащитную композицию, мин	5 ± 1
4.	Толщина покрытия, мм	$3 \pm 0,1$
5.	Температура агента сушки, $^{\circ}\text{C}$	60 ± 2

По итогам проведения эксперимента должна будет получена рецептура РЗ ЛКК, которая позволит получить РЗ ЛКП на древесной подложке с минимальным временем высыхания при естественной и конвективной сушке и максимальными рентгенозащитными свойствами.

Таблица 4.2 – Диапазоны изменения варьируемых факторов в эксперименте

№ п/п	Наименование фактора	обозначение	Значения на уровнях варьирования					
			нижний		основной		верхний	
			натуральное	нормализованное	натуральное	нормализованное	натуральное	нормализованное
1.	Количество минерального 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 4.3 – Наименование выходных величин в эксперименте

№ п/п	Выходная величина	Обозначение	
		натуральное	нормализованное
1.	Свинцовый эквивалент, мм Рв		
	<i>при анодном напряжении 50 кВ:</i>		
	- при толщине покрытия 1 мм	k_1^{50}	$y_1^{50,1}$
	- при толщине покрытия 2 мм	k_2^{50}	$y_1^{50,2}$
	- при толщине покрытия 3 мм	k_3^{50}	$y_1^{50,3}$
	<i>при анодном напряжении 75 кВ</i>		
	- при толщине покрытия 1 мм	k_1^{75}	$y_1^{75,1}$
	- при толщине покрытия 2 мм	k_2^{75}	$y_1^{75,2}$
	- при толщине покрытия 3 мм	k_3^{75}	$y_1^{75,3}$
	<i>при анодном напряжении 100 кВ</i>		
	- при толщине покрытия 1 мм	k_1^{100}	$y_1^{100,1}$
	- при толщине покрытия 2 мм	k_2^{100}	$y_1^{100,2}$
	- при толщине покрытия 3 мм	k_3^{100}	$y_1^{100,3}$

№ п/п	Выходная величина	Обозначение	
		натуральное	нормализованное
2.	Время высыхания РЗ ЛКК при естественной сушке, мин		
	- при толщине покрытия 1 мм	$\tau_1^{\text{еств.}}$	y_2^1
	- при толщине покрытия 2 мм	$\tau_2^{\text{еств.}}$	y_2^2
	- при толщине покрытия 3 мм	$\tau_3^{\text{еств.}}$	y_2^3
3.	Время высыхания РЗ ЛКК при конвективной сушке, мин		
	- при толщине покрытия 1 мм	$\tau_1^{\text{конв.}}$	y_3^1
	- при толщине покрытия 2 мм	$\tau_2^{\text{конв.}}$	y_3^2
	- при толщине покрытия 3 мм	$\tau_3^{\text{конв.}}$	y_3^3

4.1.3. Результаты эксперимента и его обработка

Результаты проведения экспериментальных исследований и их статистическая обработка согласно [276, 277, 279 – 285] осуществлялись средствами *Microsoft Excel 2010* и представлены в приложениях 2 – 16.

В результате были получены зависимости выходных величин от варьируемых факторов в виде полиномов (уравнений регрессии) второго порядка. Каждый из полученных уравнений регрессии представляет собой регрессионную модель рецептуры РЗ ЛКК, обладающей рентгенозащитными свойствами по конкретной выходной величине. Полученные регрессионные модели использовались для оптимизации рецептуры разработанной РЗ ЛКК.

В таблицах 4.4 и 4.5 приведены средние значения результатов реализации эксперимента по плану В₃ для выходных величин y_1 , y_2 , и y_3 .

Таблица 4.4– Результаты реализации экспериментов по определению свинцового эквивалента РЗ ЛКП по плану Бокса для трех независимых переменных

№ п/п	Нормализованные выражения управляющих факторов			Средние значения выходных величин								
				при анодном напряжении 50 кВ			при анодном напряжении 75 кВ			при анодном напряжении 100 кВ		
	x_1	x_2	x_3	\bar{y}_1^1	\bar{y}_1^2	\bar{y}_1^3	\bar{y}_2^1	\bar{y}_2^2	\bar{y}_2^3	\bar{y}_3^1	\bar{y}_3^2	\bar{y}_3^3
1	1	1	1	0,0165	0,0153	0,0158	0,0145	0,0333	0,0578	0,0227	0,0483	0,1179
2	-1	1	1	0,0151	0,0178	0,0120	0,0133	0,0240	0,0488	0,0215	0,0379	0,1095
3	1	-1	1	0,0118	0,0148	0,0134	0,0238	0,0390	0,0534	0,0320	0,0527	0,1116
4	-1	-1	1	0,0185	0,0111	0,0115	0,0140	0,0310	0,0446	0,0214	0,0456	0,1037
5	1	1	-1	0,0162	0,0171	0,0167	0,0220	0,0314	0,0675	0,0266	0,0449	0,1254
6	-1	1	-1	0,0167	0,0184	0,0159	0,0201	0,0245	0,0482	0,0206	0,0379	0,1070
7	1	-1	-1	0,0137	0,0179	0,0272	0,0171	0,0516	0,0693	0,0260	0,0652	0,1310
8	-1	-1	-1	0,0159	0,0152	0,0180	0,0170	0,0229	0,0378	0,0151	0,0377	0,0969
9	1	0	0	0,0144	0,0152	0,0183	0,0122	0,0260	0,0523	0,0205	0,0398	0,1114
10	-1	0	0	0,0171	0,0141	0,0203	0,0259	0,0447	0,0799	0,0362	0,0637	0,1395
11	0	1	0	0,0154	0,0173	0,0244	0,0284	0,0382	0,0726	0,0359	0,0513	0,1294
12	0	-1	0	0,0143	0,0169	0,0183	0,0191	0,0371	0,0547	0,0259	0,0494	0,1124
13	0	0	1	0,0124	0,0133	0,0219	0,0244	0,0350	0,0578	0,0401	0,0471	0,1158
14	0	0	-1	0,0170	0,0170	0,0236	0,0154	0,0343	0,0611	0,0371	0,0472	0,1185

Таблица 4.5 – Результаты реализации экспериментов по определению времени высыхания РЗ ЛКК по плану Бокса для трех независимых переменных

№ п/п	Нормализованные выражения управляющих факторов			Средние значения выходных величин					
				при естественной сушке			при конвективной сушке		
	x_1	x_2	x_3	\bar{y}_2^1	\bar{y}_2^2	\bar{y}_2^3	\bar{y}_3^1	\bar{y}_3^2	\bar{y}_3^3
1	1	1	1	1123,33	1123,33	1563,33	226,67	280,00	323,33
2	-1	1	1	996,67	996,67	1050,00	183,33	230,00	263,33
3	1	-1	1	1163,33	1163,33	1590,00	213,33	270,00	306,67
4	-1	-1	1	946,67	946,67	1060,00	210,00	270,00	303,33
5	1	1	-1	1236,67	1236,67	1453,33	240,00	283,33	330,00
6	-1	1	-1	950,00	950,00	1143,33	243,33	300,00	343,33
7	1	-1	-1	1023,33	1023,33	1423,33	280,00	410,00	423,33
8	-1	-1	-1	920,00	920,00	973,33	253,33	353,33	403,33
9	1	0	0	1130,00	1130,00	1610,00	253,33	316,67	376,67
10	-1	0	0	960,00	960,00	1063,33	240,00	260,00	303,33
11	0	1	0	1036,67	1036,67	1260,00	276,67	400,00	410,00
12	0	-1	0	950,00	950,00	1153,33	190,00	263,33	303,33
13	0	0	1	1033,33	1033,33	1510,00	246,67	350,00	403,33
14	0	0	-1	976,67	976,67	1373,33	243,33	340,00	400,00

4.1.4. Построение регрессионных моделей

Построение регрессионных моделей в виде функций отклика для выходных величин проводилось по методике, описанной в главе 3.

Статистический анализ полученных результатов подтвердил однородность дисперсии и значимость коэффициентов уравнений регрессии [7]. Полученные уравнения регрессии в нормализованном выражении имеют вид:

а) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 50 кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\hat{y}_1^{50,1} = 0,01496 + 0,00207x_1 + 0,00273x_2 - 0,00067x_3 + 0,00624x_1^2 - 0,00908x_2^2 + 0,00411x_3^2 + 0,00272x_1x_2 - 0,00053x_1x_3 - 0,00211x_2x_3; \quad (4.1)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\hat{y}_1^{50,2} = 0,01546 + 0,0363x_1 + 0,00566x_2 - 0,00065x_3 + 0,0076x_1^2 - 0,00751x_2^2$$

$$+0,00515x_3^2 - 0,0076x_1x_2 - 0,00037x_1x_3 + 0,00031x_2x_3; \quad (4.2)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\hat{y}_1^{50,3} = 0,02352 + 0,00457x_1 + 0,00064x_2 - 0,0063x_3 + 0,00825x_1^2 - 0,0068x_2^2 - 0,00621x_3^2 - 0,00064x_1x_2 - 0,00115x_1x_3 - 0,00057x_2x_3; \quad (4.3)$$

б) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 75 кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\hat{y}_1^{75,1} = 0,0216 + 0,00013x_1 + 0,00073x_2 - 0,00117x_3 + 0,0097x_1^2 - 0,005x_2^2 + 0,0012x_3^2 - 0,0017x_2 - 0,0005x_1x_3 - 0,00224x_2x_3; \quad (4.4)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\hat{y}_1^{75,2} = 0,0377 + 0,00301x_1 + 0,00301x_2 - 0,00025x_3 + 0,00183x_1^2 - 0,0041x_2^2 + 0,00409x_3^2 - 0,00257x_1x_2 - 0,00229x_1x_3 - 0,00736x_2x_3; \quad (4.5)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\hat{y}_1^{75,3} = 0,0679 + 0,0043x_1 + 0,00351x_2 - 0,00216x_3 + 0,00183x_1^2 - 0,00406x_2^2 + 0,00845x_3^2 - 0,015x_1x_2 - 0,00411x_1x_3 + 0,000024x_2x_3 \quad (4.6)$$

в) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 100 кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\hat{y}_1^{100,1} = 0,0373 + 0,0013x_1 + 0,00169x_2 - 0,00122x_3 + 0,00894x_1^2 - 0,0064x_2^2 + 0,00127x_3^2 - 0,00179x_1x_2 - 0,00064x_1x_3 - 0,00191x_2x_3; \quad (4.7)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\hat{y}_1^{100,2} = 0,0515 + 0,00281x_1 + 0,00302x_2 - 0,0013x_3 + 0,0124x_1^2 - 0,00114x_2^2 + 0,00431x_3^2 - 0,00216x_1x_2 - 0,0213x_1x_3 + 0,001x_2x_3; \quad (4.8)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\hat{y}_1^{100,3} = 0,1253 + 0,0041 + 0,00336x_2 - 0,00203x_3 + 0,00115x_1^2 - 0,00442x_2^2 - 0,00816x_3^2 - 0,00189x_1x_2 - 0,045x_1x_3 + 0,00096x_2x_3. \quad (4.9)$$

г) время высыхания РЗ ЛКК при естественной сушке:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\hat{y}_2^1 = 999,17 + 90,33x_1 + 34x_2 + 15,67x_3 - 45,83x_1^2 - 51,83x_2^2 - 32,17x_3^2 - 11,67x_1x_2 + 5,83x_1x_3 - 29,17x_2x_3; \quad (4.10)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\hat{y}_2^2 = 1117,5 + 73x_1 + 15x_2 + 35x_3 - 40,83x_1^2 - 52,5x_2^2 - 53,83x_3^2 - 32,5x_1x_2 + 7,5x_1x_3 - 23,33x_2x_3; \quad (4.11)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\hat{y}_2^3 = 1351,46 + 105x_1 + 27x_2 + 40,67x_3 - 64,72x_1^2 - 54,72x_2^2 - 90,21x_3^2 - 19,582x_1x_2 + 35,42x_1x_3 - 29,58x_2x_3; \quad (4.12)$$

д) время высыхания РЗ ЛКК при конвективной сушке:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\hat{y}_3^1 = 244,68 + 68,33x_1 + 2,33x_2 - 18x_3 - 30,21x_1^2 - 23,54x_2^2 - 1,88x_3^2 + 1,25x_1x_2 + 2,92x_1x_3 + 4,59x_2x_3; \quad (4.13)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\hat{y}_3^2 = 333,58 + 75x_1 + 6,67x_2 - 28x_3 - 41,25x_1^2 - 20,42x_2^2 - 10,42x_3^2 - 3,33x_1x_2 + 0,83x_1x_3 + 18,33x_2x_3; \quad (4.14)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\hat{y}_3^3 = 382,3 + 74x_1 + 7,33x_2 - 29,67x_3 - 40,83x_1^2 - 24,17x_2^2 - 20,83x_3^2 + 2,5x_1x_2 + 7,5x_1x_3 + 16,67x_2x_3. \quad (4.15)$$

Уравнения регрессии в натуральном выражении имеют вид:

а) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 50кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$k_1^{50} = 0,329 - 0,0023m_1 - 0,0002m_2 - 0,0011m_3 + 0,00001m_1^2 - 0,00003m_2^2 + 0,00004m_3^2 + 0,000007m_1m_2 - 0,000002m_1m_3 - 0,000014m_2m_3; \quad (4.16)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$k_2^{50} = -0,092 + 0,0005m_1 + 0,0045m_2 - 0,0036m_3 + 0,00001m_1^2 - 0,00003m_2^2 + 0,00005m_3^2 - 0,00002m_1m_2 + 0,000001m_1m_3 + 0,000002m_2m_3; \quad (4.17)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$k_3^{50} = -0,339 + 0,0018m_1 - 0,0005m_2 - 0,0003m_3 - 0,00001m_1^2 - 0,00001m_2^2 - 0,00001m_3^2 - 0,000002m_1m_2 + 0,000002m_1m_3 + 0,00001m_2m_3; \quad (4.18)$$

б) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 75кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$k_1^{75} = 0,403 - 0,0026m_1 + 0,002m_2 + 0,0007m_3 + 0,00002m_1^2 - 0,00002m_2^2 + 0,00001m_3^2 - 0,000005m_1m_2 - 0,000002m_1m_3 - 0,0000145m_2m_3; \quad (4.19)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$k_2^{75} = -0,2709 + 0,0006m_1 + 0,005m_2 + 0,003m_3 + 0,000003m_1^2 - 0,00002m_2^2 - 0,00002m_3^2 + 0,00004m_1m_2 - 0,000007m_1m_3 - 0,00001m_2m_3; \quad (4.20)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$k_3^{75} = 0,092 + 0,0009m_1 + 0,0011m_2 - 0,0022m_3 + 0,000003m_1^2 - 0,00002m_2^2 + 0,0001m_3^2 - 0,000004m_1m_2 - 0,000002m_1m_3 - 0,000001m_2m_3; \quad (4.21)$$

в) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 100кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$k_1^{100} = 0,342 - 0,0023m_1 + 0,002m_2 + 0,0006m_3 + 0,00001m_1^2 - 0,00003m_2^2 + 0,00001m_3^2 - 0,000005m_1m_2 - 0,000003m_1m_3 - 0,00045m_2m_3; \quad (4.22)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$k_2^{100} = 0,784 - 0,0029m_1 + 0,001m_2 - 0,0015m_3 + 0,00002m_1^2 - 0,000005m_2^2 + 0,00004m_3^2 - 0,00006m_1m_2 - 0,00001m_1m_3 + 0,000071m_2m_3 \quad (4.23)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$k_3^{100} = -0,57 + 0,0016m_1 + 0,001m_2 + 0,0078m_3 + 0,000023m_1^2 - 0,00002m_2^2 - 0,00008m_3^2 - 0,000054m_1m_2 - 0,000002m_1m_3 + -0,00007m_3; \quad (4.24)$$

г) время высыхания РЗ ЛКП при естественной сушке:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\tau_1^{\text{еств.}} = -6436,33 + 19,21m_1 + 21,42m_2 + 30,78m_3 - 0,073m_1^2 - 2,33m_2^2 - 0,32m_3^2 - 0,032m_1m_2 + 0,023m_1m_3 - 0,195m_2m_3; \quad (4.25)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\tau_2^{\text{еств.}} = -7975,33 + 24,287m_1 + 28,98m_2 + 53,47m_3 - 0,653m_1^2 - 0,236m_2^2 - 0,538m_3^2 - 0,878m_1m_2 - 0,03m_1m_3 - 1,563m_2m_3; \quad (4.26)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\tau_3^{\text{еств.}} = -8602,33 + 20,35m_1 + 25,43m_2 + 44,65 - 1,037m_1^2 - 0,247m_2^2 - 0,902m_3^2 - 0,53m_1m_2 + 0,14m_1m_3 - 0,198m_2m_3; \quad (4.27)$$

д) время высыхания РЗ ЛКП при конвективной сушке:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\tau_1^{\text{конв.}} = -2467,53 + 11,45m_1 - 1,83m_2 - 5,3m_3 - 0,048m_1^2 - 0,106m_2^2 - 0,019m_3^2 + 0,034m_1m_2 + 0,012m_1m_3 + 0,031m_2m_3; \quad (4.28)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\tau_2^{\text{конв.}} = -3452,05 + 16,67m_1 - 4,86m_2 - 6,38m_3 - 0,066m_1^2 - 0,092m_2^2 - 0,104m_3^2 - 0,009m_1m_2 + 0,003m_1m_3 + 0,123m_2m_3; \quad (4.29)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\tau_3^{\text{конв.}} = -3079,66 + 13,74m_1 - 7,01m_2 - 4,8m_3 - 0,065m_1^2 - 0,109m_2^2 - 0,208m_3^2 - 0,007m_1m_2 + 0,03m_1m_3 + 0,112m_2m_3. \quad (4.30)$$

По результатам полученных экспериментальных данных были построены графические интерпретации зависимостей изменения выходных величин от варьируемых факторов (Рисунки 4.2 – 4.6).

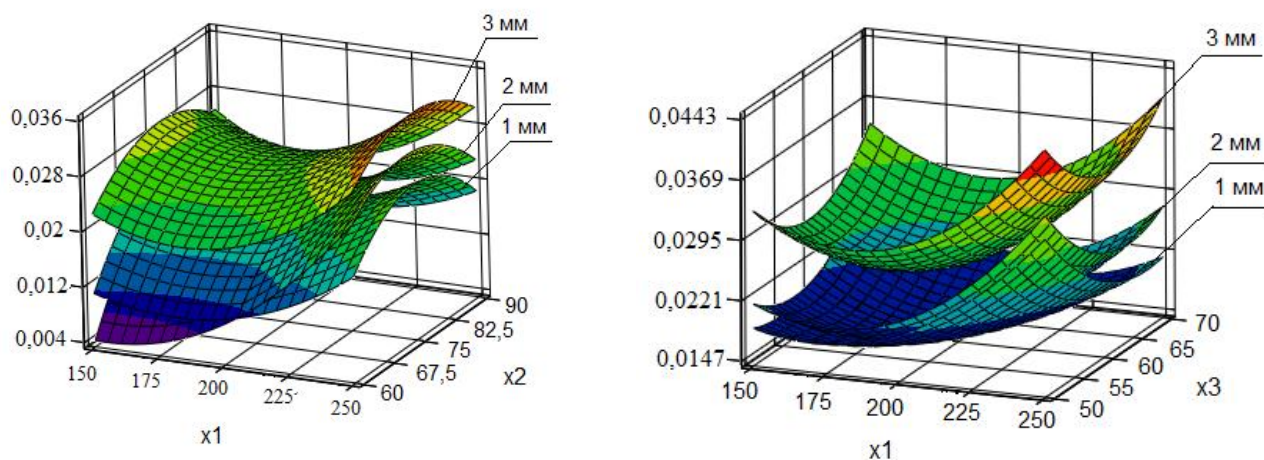


Рисунок 4.2. – Графическая интерпретация (выходная величина – свинцовый эквивалент РЗ ЛКП при анодном напряжении 50 кВ, ммРб):

x_1 – количество минерального наполнителя, г; x_2 – количество связующего, г;

x_3 – количество разбавителя, г

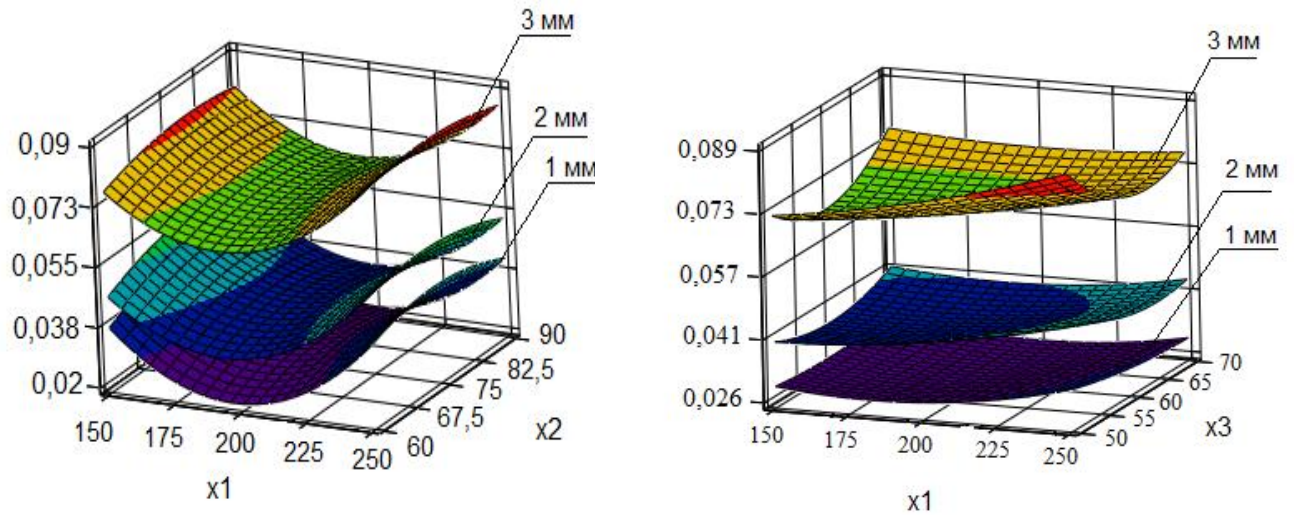


Рисунок 4.3. – Графическая интерпретация (выходная величина – свинцовый эквивалент РЗ ЛКП при анодном напряжении 75 кВ, ммРb):

x_1 – количество минерального наполнителя, г; x_2 – количество связующего, г;

x_3 – количество разбавителя, г

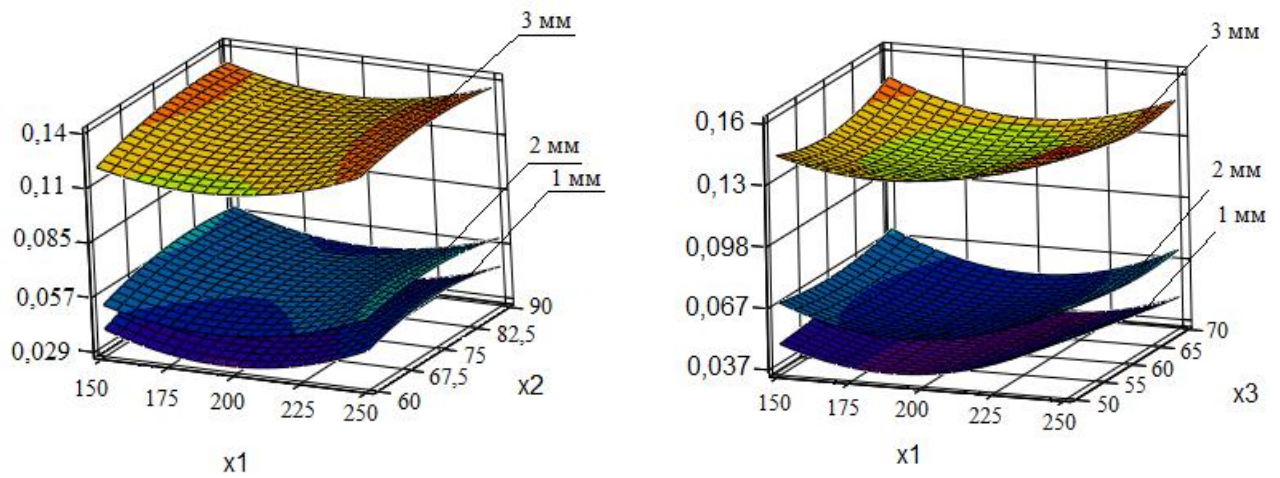


Рисунок 4.4. – Графическая интерпретация (выходная величина – свинцовый эквивалент РЗ ЛКП при анодном напряжении 100 кВ, ммРb):

x_1 – количество минерального наполнителя, г; x_2 – количество связующего, г;

x_3 – количество разбавителя, г

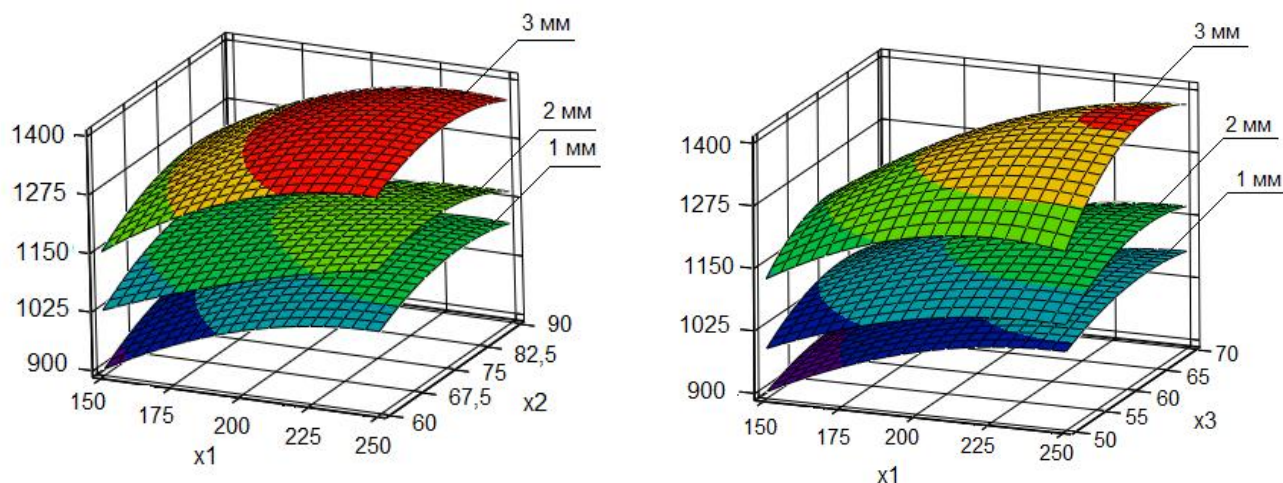


Рисунок 4.5. – Графическая интерпретация (выходная величина – время высыхания РЗ ЛКП при естественной сушке, мин): x_1 – количество минерального наполнителя, г; x_2 – количество связующего, г; x_3 – количество разбавителя, г

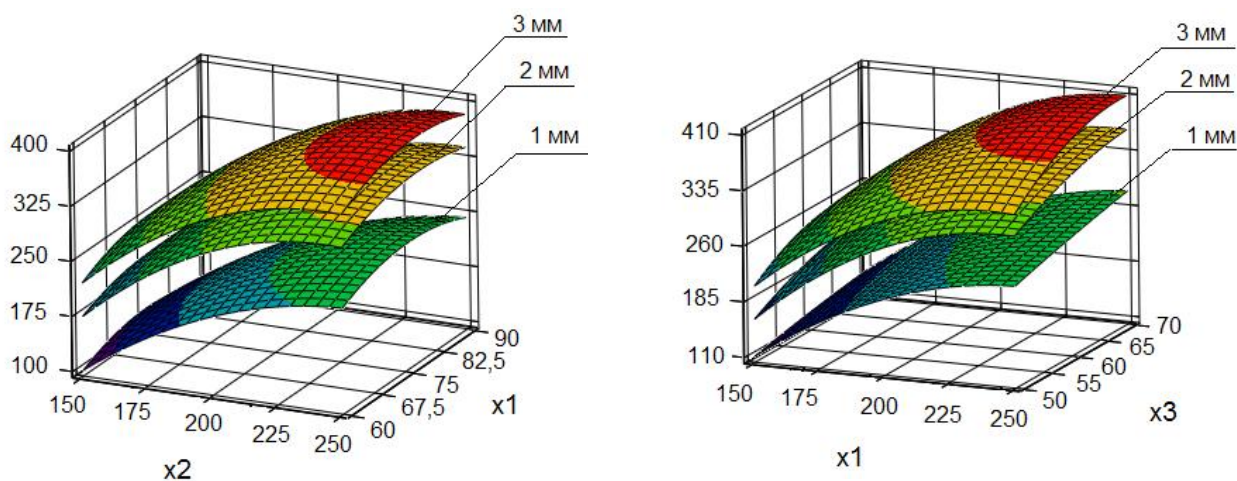


Рисунок 4.6. – Графическая интерпретация (выходная величина – время высыхания РЗ ЛКП при конвективной сушке, мин): x_1 – количество минерального наполнителя, г; x_2 – количество связующего, г; x_3 – количество разбавителя, г

Зависимость толщины рентгенозащитного слоя эквивалентная 1 ммРв от величины анодного напряжения на рентгеновской трубке представлены на Рисунке 4.7.

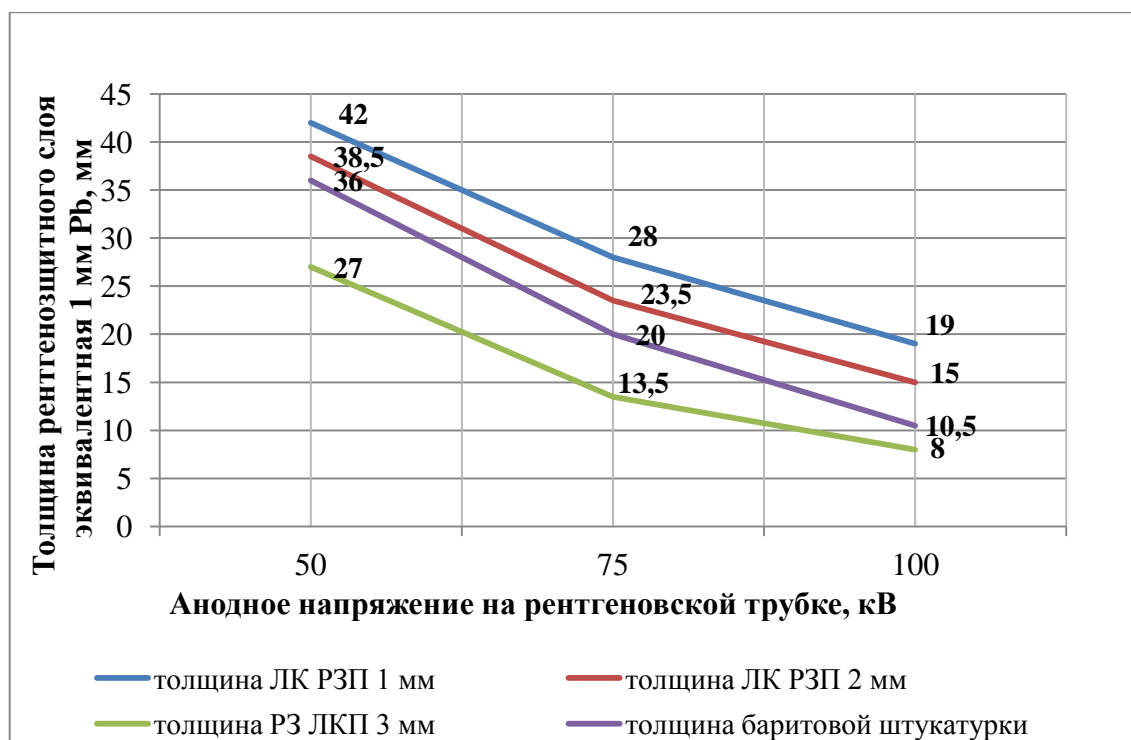


Рисунок – 4.7. Зависимость толщины рентгенозащитного слоя эквивалентная 1 ммРb от анодного напряжения на рентгеновской трубке

4.1.5. Решение оптимизационной задачи

Согласно соображениям, приведенным в п. 4.1.4 оптимизационную модель сформируем в следующем виде:

1. *Целевая функция:*

а) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 50 кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\widehat{W}_1^{50,1} = 0,01496 + 0,0021x_1 + 0,0027x_2 - 0,0007x_3 + 0,0062x_1^2 - 0,009x_2^2 + 0,0041x_3^2 + 0,00272x_1x_2 - 0,0005x_1x_3 - 0,0021x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (4.31)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\widehat{W}_1^{50,2} = 0,0155 + 0,036x_1 + 0,0057x_2 - 0,0007x_3 + 0,008x_1^2 - 0,0075x_2^2 + 0,0052x_3^2 - 0,0076x_1x_2 - 0,00037x_1x_3 + 0,0003x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (4.32)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\widehat{W}_1^{50,3} = 0,0235 + 0,0046x_1 + 0,0006x_2 - 0,0063x_3 + 0,0083x_1^2 - 0,0069x_2^2 - 0,0062x_3^2 - 0,00064x_1x_2 - 0,0012x_1x_3 - 0,0006x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (4.33)$$

б) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 75 кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\widehat{W}_1^{75,1} = 0,022 + 0,00013x_1 + 0,0007x_2 - 0,0012x_3 + 0,0097x_1^2 - 0,005x_2^2 + 0,0012x_3^2 - 0,0017x_1x_2 - 0,00053x_1x_3 - 0,0022x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (4.34)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\widehat{W}_1^{75,2} = 0,038 + 0,0003x_1 + 0,0003x_2 - 0,0002x_3 + 0,0018x_1^2 - 0,004x_2^2 + 0,004x_3^2 - 0,0026x_1x_2 - 0,0023x_1x_3 - 0,0074x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (4.35)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\widehat{W}_1^{75,3} = 0,068 + 0,0043x_1 + 0,0035x_2 - 0,0022x_3 + 0,00183x_1^2 - 0,0041x_2^2 + 0,0085x_3^2 - 0,015x_1x_2 - 0,00411x_1x_3 + 0,00002x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (4.36)$$

в) свинцовый эквивалент при анодном напряжении 100 кВ:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\widehat{W}_1^{100,1} = 0,037 + 0,0013x_1 + 0,0017x_2 - 0,0012x_3 + 0,0089x_1^2 - 0,0064x_2^2 + 0,0013x_3^2 - 0,0018x_1x_2 - 0,00064x_1x_3 - 0,0019x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (4.37)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\widehat{y}_1^{100,2} = 0,0515 + 0,0028x_1 + 0,003x_2 - 0,0013x_3 + 0,0124x_1^2 - 0,0012x_2^2 + 0,0043x_3^2 - 0,0022x_1x_2 - 0,0213x_1x_3 + 0,001x_2x_3 \rightarrow \max \quad (4.38)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\widehat{y}_1^{100,3} = 0,125 + 0,0041x_1 + 0,0034x_2 - 0,002x_3 + 0,0012x_1^2 - 0,0044x_2^2 - 0,0082x_3^2 - 0,0019x_1x_2 - 0,045x_1x_3 + 0,001x_2x_3 \rightarrow \max. \quad (4.39)$$

г) время высыхания РЗ ЛКП при естественной сушке:

- при толщине покрытия 1 мм

$$\widehat{W}_2^1 = 999,17 + 90,33x_1 + 34x_2 + 15,67x_3 - 45,83x_1^2 - 51,83x_2^2 - 32,17x_3^2 - 11,67x_1x_2 + 5,83x_1x_3 - 29,17x_2x_3 \rightarrow \min; \quad (4.40)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\widehat{W}_2^2 = 1117,5 + 73x_1 + 15x_2 + 35x_3 - 40,83x_1^2 - 52,5x_2^2 - 53,83x_3^2 - 32,5x_1x_2 + 7,5x_1x_3 - 23,33x_2x_3 \rightarrow \min; \quad (4.41)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\widehat{W}_2^3 = 1351,46 + 105x_1 + 27x_2 + 40,67x_3 - 64,72x_1^2 - 54,72x_2^2 -$$

$$-90,21x_3^2 - 19,582x_1x_2 + 35,42x_1x_3 - 29,58x_2x_3 \rightarrow \min; \quad (4.42)$$

д) время высыхания РЗ ЛКП при конвективной сушке:

- при толщине покрытия 1 мм:

$$\begin{aligned} \widehat{W}_3^1 = 244,68 + 68,33x_1 + 2,33x_2 - 18x_3 - 30,21x_1^2 - 23,54x_2^2 - \\ - 1,88x_3^2 + 1,25x_1x_2 + 2,92x_1x_3 + 4,59x_2x_3 \rightarrow \min; \end{aligned} \quad (4.43)$$

- при толщине покрытия 2 мм:

$$\begin{aligned} \widehat{W}_3^2 = 333,58 + 75x_1 + 6,67x_2 - 28x_3 - 41,25x_1^2 - 20,42x_2^2 - \\ - 10,42x_3^2 - 3,33x_1x_2 + 0,83x_1x_3 + 18,33x_2x_3 \rightarrow \min; \end{aligned} \quad (4.44)$$

- при толщине покрытия 3 мм:

$$\begin{aligned} \widehat{W}_3^3 = 333,58 + 74x_1 + 7,33x_2 - 29,67x_3 - 40,83x_1^2 - 24,17x_2^2 - \\ - 20,83x_3^2 + 2,5x_1x_2 + 7,5x_1x_3 + 16,67x_2x_3 \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4.45)$$

2. Система ограничений для целевых функций (4.30-4.43) имеет вид:

$$-1 \leq x_1 \leq 1; \quad (4.46)$$

$$-1 \leq x_2 \leq 1; \quad (4.47)$$

$$-1 \leq x_3 \leq 1; \quad (4.48)$$

Для решения вышеприведенной оптимизационной модели использовалась технология оптимизации *Microsoft Excel 2010* встроенной надстройки «Поиск решения» [298, 299]. Оптимизация осуществлялась с применением метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ) [115]. Результаты решения задачи оптимизации приведены в приложениях 17-21.

Оптимальные значения для целевых функций (4.31 - 4.38) достигаются в точке:

$$X^{\text{опт.1}} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix},$$

и составляют в разработанной РЗ ЛКК:

- количество минерального наполнителя (сульфата бария) - 250 г (65%);
- количество вододисперсионной акриловой краски (ВД-АК) – 75 г (19 %);
- количество дистиллированной воды - 60 г (16 %).

Оптимальные значения для целевых функций (4.39 - 4.44) достигаются в точке:

$$X^{\text{опт.2,3}} = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix},$$

и составляют в разработанной РЗ ЛКК:

- количество минерального наполнителя (сульфата бария) - 150 г (53%);
- количество вододисперсионной акриловой краски (ВД-АК) - 60 г (26 %);
- количество дистиллированной воды - 50 г (21 %).

Таблица 4.6. – Ожидаемые значения выходных величин

№ п/п	Выходная величина при толщине РЗ ЛКП		
	1 мм	2 мм	3 мм
1.	Свинцовый эквивалент, мм Рb		
	при анодном напряжении 50 кВ:		
	0,024	0,0267	0,0363
	при анодном напряжении 75 кВ:		
	0,036	0,0426	0,074
2	при анодном напряжении 100 кВ:		
	0,0526	0,0667	0,1305
	Время высыхания покрытия при естественной сушке		
3	11 ч. 35 мин.	13 ч. 20 мин.	16 ч. 05 мин.
	Время высыхания покрытия при конвективной сушке		
	1 ч. 30 мин.	2 ч. 30 мин.	3 ч. 40 мин.

4.1.6. Нахождение компромиссного решения оптимизационной задачи

Для нахождения компромиссного решения задачи оптимизации, поставленной в п. 4.1.5. использовался метод условного центра масс [116], подробно описанный в главе 3.

Рациональные значения варьируемых факторов достигаются в точке:

$$X^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix},$$

и составляют:

- количество минерального наполнителя (сульфата бария) - 200 г (62 %);
- количество вододисперсионной акриловой краски (ВД-АК) - 60 г (15 %);
- количество дистиллированной воды - 50 г (23 %).

Рациональные значения выходных параметров приведены в таблицах 4.7, 4.8.

Таблица 4.7 – 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, мм Рb		
	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 4.8 – 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, мм Рb		
	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 [86]. Наиболее важную роль в данном случае играет достижение максимальных рентгенозащитных свойств. Поэтому для дальнейших исследований свойств использовался оптимальный состав, на основе которого получалось покрытие с максимальными рентгенозащитными свойствами.

4.2. Исследования по определению свойств рентгенозащитной лакокрасочной композиции

4.2.1. Постановка эксперимента

Подробные методики проведения экспериментальных исследований по определению свойств разработанной РЗ ЛКК описаны в п. 3.5.1.2 - 3.5.1.6. Значения постоянных факторов при проведении экспериментов приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – 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

4.2.2. Определение расхода и сухого остатка

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Полученные результаты экспериментов по определению расхода и сухого остатка РЗ ЛКК приведены в приложении 22. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась согласно методике,

представленной в главе 3. Результаты статистической обработки [87] представлены в таблицах 4.10 и 4.11.

Таблица 4.10 – Статистическая обработка экспериментальных данных по определению расхода РЗ ЛКК

№ п/п	Показатель	Значение
1.	Среднее арифметическое, \bar{N} , г/м ²	1134,63
2.	Среднее квадратическое отклонение, S , г/м ²	488,92
3.	Коэффициент вариации, ν	43,09
4.	Средняя ошибка среднего значения, $S_{\bar{N}}$, г/м ²	89,26
5.	Показатель точности среднего значения, ζ , %	7,87
6.	Ошибка среднего квадратического отклонения, S_s , г/м ²	63,12
7.	t -критерий Стьюдента (30; 0,05)	2,0423
8.	Доверительный интервал	$952,33 \leq M_y \leq 1316,94$

Таблица 4.11 – Статистическая обработка экспериментальных данных по определению сухого остатка РЗ ЛКК

№ п/п	Показатель	Значение
1.	Среднее арифметическое, \bar{N} , г/м ²	59,22
2.	Среднее квадратическое отклонение, S , г/м ²	9,00
3.	Коэффициент вариации, ν	15,20
4.	Средняя ошибка среднего значения, $S_{\bar{N}}$, г/м ²	1,64
5.	Показатель точности среднего значения, ζ , %	2,78
6.	Ошибка среднего квадратического отклонения, S_s , г/м ²	1,16
7.	t -критерий Стьюдента (30; 0,05)	2,0423
8.	Доверительный интервал	$55,87 \leq M_y \leq 62,58$

4.2.3. Определение степени перетира

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Полученные результаты экспериментов по определению степени перетира

РЗ ЛКК приведены в приложении 23. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась согласно методике, представленной в главе 3. Результаты статистической обработки представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Статистическая обработка экспериментальных данных по определению степени перетира РЗ ЛКК

№ п/п	Показатель	Значение
1.	Количество повторений опыта, n , шт.	30
2.	Среднее арифметическое, \bar{H} , мкм	0,00193
2.	Среднее квадратическое отклонение, S , мкм	0,00011
3.	Коэффициент вариации, ν	5,58776
4.	Средняя ошибка среднего значения, $S_{\bar{H}}$, мкм	0,00002
5.	Показатель точности среднего значения, ζ , %	1,02018
6.	Ошибка среднего квадратического отклонения, S_s , г/м ²	0,00001
7.	t -критерий Стьюдента (30; 0,05)	2, 0423
8.	Доверительный интервал	$0,00189 \leq M_y \leq 0,00197$

4.2.4. Определение плотности

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Полученные результаты эксперимента и статистическая обработка данных по определению плотности РЗ ЛКК приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Результаты эксперимента и статистическая обработка данных по определению плотности РЗ ЛКК

Номер опыта	m_2 , г	m_1 , г	V_t , см ³	ρ , г/см ³
1.	412	170	100	2,42
2.	418			2,48
3.	414			2,44
Среднее арифметическое, $\bar{\rho}$, г/см ³				2,45
Среднее квадратическое отклонение, S , г/см ³				0,03

Номер опыта	m_2 , г	m_1 , г	V_t , см ³	ρ , г/см ³
Коэффициент вариации, ν				1,25
Средняя квадратическая ошибка среднего арифметического, $S_{\bar{\rho}}$, г/см ³				0,018
Показатель точности среднего значения, ζ , %				0,721
Ошибка среднего квадратического отклонения, S_{ρ} , г/см ³				0,012
t-критерий Стьюдента (3; 0,05)				3,18
Доверительный интервал				$2,391 \leq M_y \leq 2,503$

На основании полученных данных можно сделать вывод, что по своим показателям плотности РЗ ЛКК приближена к технологической вязкости баритовой штукатурки ($\rho_{min}=2,7$ г/см³). Такая плотность позволяет отнести разработанную рентгенозащитную композицию к высоковязким составам.

4.2.5. Определение величины краевого угла смачивания

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Полученные результаты экспериментов по определению величины краевого угла смачивания РЗ ЛКК [114] приведены в приложении 24. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась согласно методике, представленной в главе 3. Результаты статистической обработки представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Статистическая обработка экспериментальных данных по определению величины краевого угла смачивания РЗ ЛКК

№ п/п	Показатель	Значение
1.	Количество повторений опыта, n , шт.	10
2.	Среднее арифметическое, $\overline{tg\theta}$, °	85,9
3.	Среднее квадратическое отклонение, S , мкм	1,287
4.	Коэффициент вариации, ν	1,498
5.	Средняя ошибка среднего	0,407

№ п/п	Показатель	Значение
	значения, $S_{tg\theta}$, мкм	
6.	Показатель точности среднего значения, ζ , %	0,474
7.	Ошибка среднего квадратического отклонения, S_s , г/м ²	0,288
8.	t -критерий Стьюдента (10; 0,05)	2,262
9.	Доверительный интервал	$84,98 \leq M_y \leq 86,82$

Технологическим параметром, обеспечивающим смачивание и растекание, является вязкость адгезива [43]. Зависимость краевого угла смачивания на древесной подложке от вязкости адгезива представлена на Рисунок 4.8.

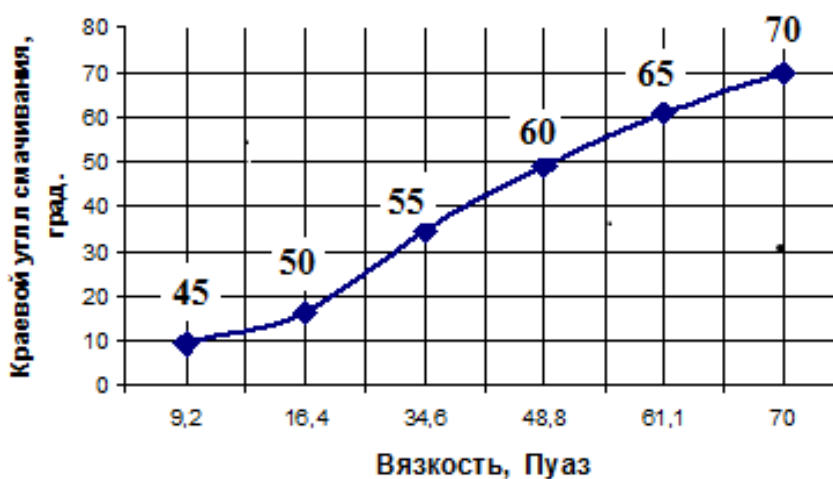


Рисунок 4.8. – Зависимость краевого угла смачивания от вязкости адгезива (цифрами обозначено содержание минерального наполнителя, %)

Для обеспечения контактного взаимодействия между разнородными поверхностями важное значение имеет их рельеф [13]. С этой целью определялась величина краевого угла смачивания.

Краевой угол смачивания был определен для следующих видов подложки: стекло лабораторное, фанера березовая, нетканое полотно. Зависимость краевого угла смачивания на различных видах подложек от содержания наполнителя в адгезиве представлена на Рисунок 4.9.

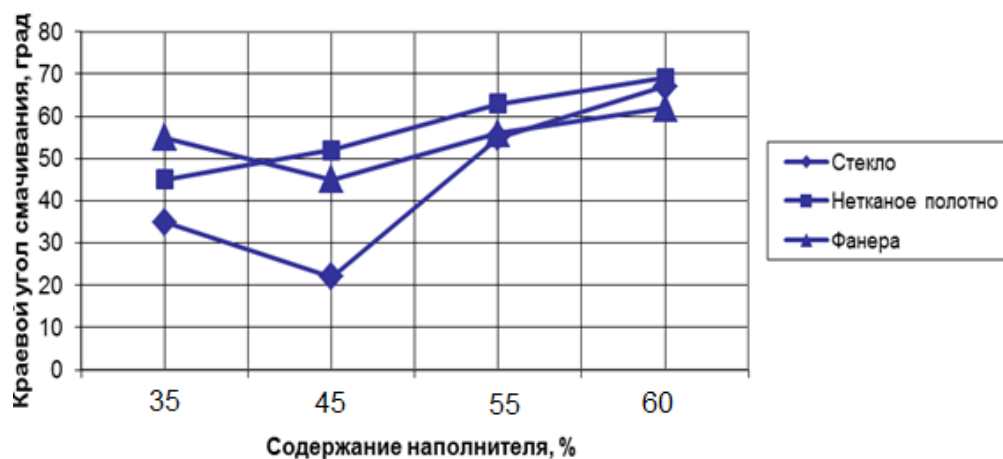


Рисунок 4.9. – Зависимость краевого угла смачивания от содержания наполнителя в адгезиве на различных видах подложки

Шероховатую поверхность древесной подложки можно рассматривать как поликапиллярную систему [1]. Глубина затекания и скорость заполнения жидкой РЗ ЛКК пор такой подложки будет зависеть от многих параметров, но наиболее существенным, из которых будет являться вязкость материала, обеспечивающая удовлетворительный технологический розлив [43]. Важно отметить, что с уменьшением диаметра капилляров и полостей скорость впитывания адгезива уменьшается. Однако потенциально с увеличением времени контакта с жидкой фазой возможна, что глубина проникновения возрастает [11]. Влияние шероховатости поверхности древесной подложки (в данном случае фанеры) на величину краевого угла смачивания и представлена на Рисунке 4.10.

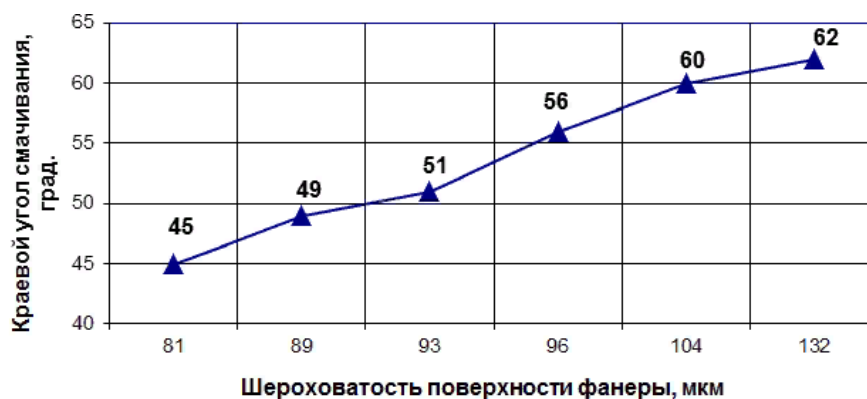


Рисунок 4.10. – Зависимость величины краевого угла смачивания от величины шероховатости поверхности фанеры (цифрами обозначено содержание минерального наполнителя в адгезиве, %)

4.3. Выводы по главе

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Основное влияние на рентгенозащитные свойства в разработанной РЗ ЛКК оказывает содержание минерального наполнителя (сульфата бария). Увеличение его количества ведет к повышению рентгенозащитных свойств покрытия, создаваемого на ее основе. В процессе исследований выяснилось, что наибольшие рентгенозащитные свойства были выявлены у покрытия толщиной $3 \pm 0,1$ мм.

2. Увеличение количества сульфата бария в разработанной композиции способствует увеличению времени высыхания покрытия, сформированного на ее основе, как при естественной, так и при конвективной сушке.

3. Оптимальный состав (с максимальными рентгенозащитными свойствами) разработанной РЗ ЛКК: содержание сульфата бария - 65 %, вододисперсионной акриловой краски - 19 %, дистиллированной воды - 16 %. 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.

4. Оптимальный состав РЗ ЛКК имеет следующие свойства:

- расход - 1135 г/м^2 ;
- содержание сухого остатка – 72%;
- степень перетира $0,002 \text{ мкм}$ (т.е. груботертая);
- плотность 2450 кг/м^3 (т.е. приближена к плотности баритовой штукатурки - не менее 2700 кг/м^3);

- величина краевого угла смачивания 86° (т.е. не превышают 90° , поэтому способна смачивать поверхность древесной подложки). Для обеспечения лучшей сплошности адгезионного слоя и более глубокого проникновения

адгезива в слои древесного субстрата необходимо увеличить время контактного взаимодействия (обеспечить формирование защитного слоя нужной толщины давлением на РЗ ЛКК и древесную подложку, например, вальцовым или вальцово-рагельным способами нанесения).

5. Рациональный (компромиссный) состав разработанной РЗ ЛКК: количество сульфата бария - 200 г (62 %), вододисперсионной акриловой краски - 75 г (15 %), дистиллированной воды - 50 г (23 %). Ожидаемые свойства покрытия, формируемого на основе этого состава при естественной и конвективной сушке представлены в таблицах 4.7- 4.8.

6. Полученные результаты можно считать определяющими при выборе технологического процесса изготовления композиционных материалов со специфическими свойствами.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОГО ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

5.1. Постановка задачи

В современном производстве защитно-декоративных покрытий для отделки древесины применяются разнообразные лакокрасочные и пленочные материалы, а также используются новейшие способы создания, высушивания и облагораживания покрытий.

Изделия, прошедшие отделку, могут эксплуатироваться в различных условиях: в закрытых отапливаемых помещениях (мебель), в условиях открытой атмосферы (окна, двери, садовая мебель, спортивный инвентарь), в среде, насыщенной парами растворителей и других реагентов (лабораторная мебель) и т. д. В соответствии с этим, к изделиям предъявляется комплекс специфических требований, в частности по атмосферо-, водо-, термостойкости, стойкости к химическим реагентам, твердости, прочности, эластичности, адгезии, цвету, блеску и т. п. Отсюда вытекают и соответствующие требования к лакокрасочным материалам, которые должны обеспечить получение покрытий с заданными свойствами.

Разработанную РЗ ЛКК планируется применять при отделке помещений с повышенным радиационным фоном (воздействием) в виде панелей в элементах мебели, защитных экранов, ширм и тому подобное. Для практического применения разработанной композиции требуется знать физико-механические и эстетические свойства покрытия, сформированного на ее основе на древесной подложке [69]. С этой целью в данной главе проведены исследования по определению свойств РЗ ЛКП, сформированного на древесной подложке на основе оптимальной рецептуры разработанной РЗ ЛКК при высыхании при естественной и конвективной сушке и сделан их сравнительный анализ.

Наименование и значения постоянных факторов при проведении экспериментов приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – 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 - связующие, г - разбавитель, г	250±1 75±1 60±1
4.	Время перемешивания компонентов, входящих в РЗ ЛКК, мин	5±1
5.	Толщина формируемого слоя РЗ ЛКП, мм	3±0,1
6.	Температура агента сушки, °С	60±2
7.	Время высыхания образцов, мин: - при естественной сушке - при конвективной сушке	220±10 1400±10

5.2. Исследования по определению свойств покрытия

5.2.1. Определение твердости

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Полученные результаты экспериментов по определению твердости РЗ ЛКП при высыхании при естественной и конвективной сушке приведены в приложении 25. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась согласно методике, представленной в главе 3. Результаты статистической обработки представлены в таблице 5.2 и на Рисунке 5.1.

Таблица 5.2 – Статистическая обработка экспериментальных данных по определению твердости РЗ ЛКП

№ п/п	Показатель	Значение	
		при естественной сушке	при конвективной сушке
1.	Количество повторений опыта, n , шт.	30	30
2.	Среднее арифметическое, H , усл. ед.	0,119	0,1366
3.	Среднее квадратическое отклонение, S , усл. ед.	0,029	0,0306
4.	Коэффициент вариации, ν	24,30	22,41
5.	Средняя ошибка среднего значения, S_H , усл. ед.	0,0053	0,0056
6.	Показатель точности среднего значения, ζ , %	4,44	4,09
7.	Ошибка среднего квадратического отклонения, S_S , усл. ед.	0,0037	0,0040
8.	t -критерий Стьюдента (30; 0,05)	2, 0423	
9.	Доверительный интервал, усл. ед.	$0,108 \leq M_y \leq 0,13$	$0,125 \leq M_y \leq 0,148$

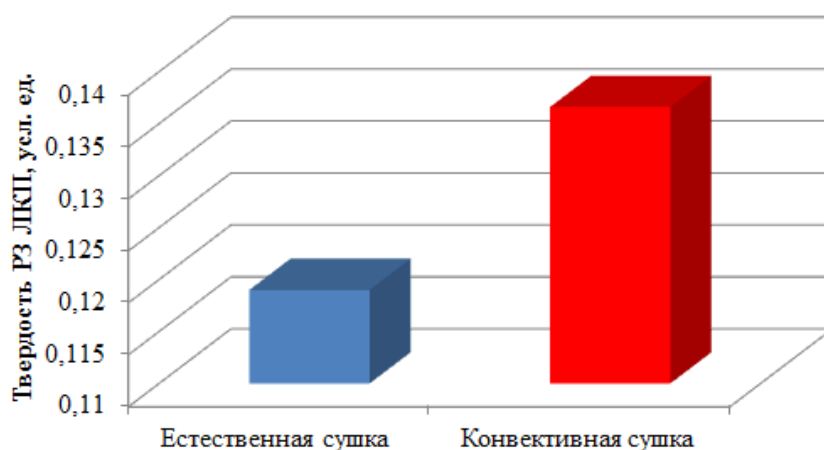


Рисунок 5.1. – Твердость РЗ ЛКП при высыхании при естественной и конвективной сушке

5.2.2. Определение прочности при изгибе

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Образцы покрытия толщиной 3 мм изгибались вокруг стержней последовательно от большего диаметра к меньшему, на каждом диаметре проверялись три пластины. Результат оценивался визуально с применением лупы с 4х-кратным увеличением.

Для всех образцов получен показатель «Прочность при изгибе 1 мм». Это означает, что пленка остается неповрежденной при изгибе вокруг всех стержней и сформированное покрытие является эластичным.

5.2.3. Определение прочности при ударе

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Полученные результаты экспериментов по определению прочности при ударе РЗ ЛКП при высыхании при естественной и конвективной сушке приведены в приложении 25. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась согласно методике, представленной в главе 3. Результаты статистической обработки представлены в таблице 5.3 и на Рисунке 5.2.

Таблица 5.3 – Статистическая обработка экспериментальных данных по определению прочности при ударе РЗ ЛКП

№ п/п	Показатель	Значение	
		при естественной сушке	при конвективной сушке
1.	Количество повторений опыта, n , шт.	30	30
2.	Среднее арифметическое, σ , усл. ед.	0,5583	0,5683
3.	Среднее квадратическое отклонение, S , усл. ед.	0,0684	0,0556
4.	Коэффициент вариации, ν	12,25	9,78
5.	Средняя ошибка среднего значения, S_{σ} , усл. ед.	0,0125	0,0101

№ п/п	Показатель	Значение	
		при естественной сушке	при конвективной сушке
6.	Показатель точности среднего значения, ζ , %	2,24	1,79
7.	Ошибка среднего квадратического отклонения, S_s , усл. ед.	0,0088	0,0072
8.	t -критерий Стьюдента (30; 0,05)	2, 0423	
9.	Доверительный интервал, усл. ед.	$0,53 \leq M_y \leq 0,58$	$0,58 \leq M_y \leq 0,59$

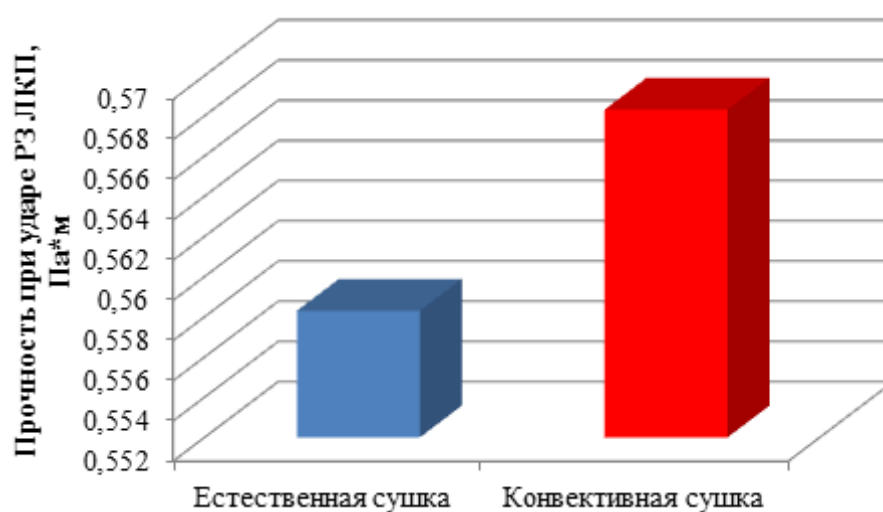


Рисунок 5.2. – Прочность при ударе РЗ ЛКП при высыхании при естественной и конвективной сушке

5.2.4. Определение влагопоглощения

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Полученные результаты экспериментов по определению прочности при ударе РЗ ЛКП при высыхании при естественной и конвективной сушке приведены в приложении 25. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась согласно методике, представленной в главе 3. Результаты статистической обработки представлены в таблице 5.4 и на Рисунке 5.3.

Таблица 5.4 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных по определению прочности при ударе РЗ ЛКП

№ п/п	Показатель	Значение	
		при естественной сушке	при конвективной сушке
1.	Количество повторений опыта, n , шт.	30	30
2.	Среднее арифметическое, σ , %	55,83	50,47
3.	Среднее квадратическое отклонение, S , %	6,84	5,06
4.	Коэффициент вариации, ν	12,25	10,03
5.	Средняя ошибка среднего значения, S_{σ} , %	1,25	0,92
6.	Показатель точности среднего значения, ζ , %	2,24	1,83
7.	Ошибка среднего квадратического отклонения, S_s , усл. ед.	0,8828	0,6537
8.	t -критерий Стьюдента (30; 0,05)	2, 0423	
9.	Доверительный интервал, усл. ед.	$53,28 \leq M_y \leq 58,38$	$48,58 \leq M_y \leq 52,35$

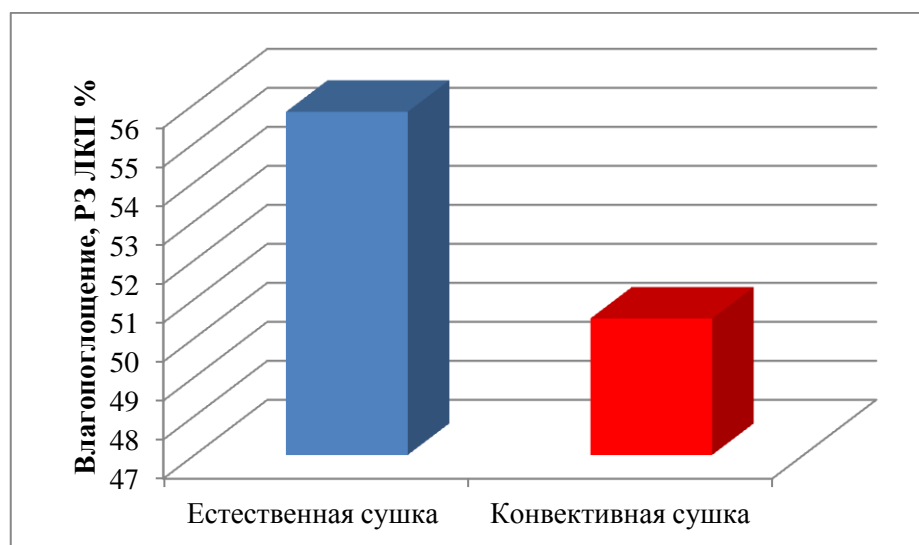


Рисунок 5.3. – Влагопоглощение РЗ ЛКП при высыхании при естественной и конвективной сушке

5.2.5. Определение блеска

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Полученные результаты экспериментов по определению блеска РЗ ЛКП при высушивании при естественной и конвективной сушке приведены в приложении 25. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась согласно методике, представленной в главе 3. Результаты статистической обработки представлены в таблице 5.5 и на Рисунок 5.4.

Таблица 5.5 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных по определению степени блеска РЗ ЛКП

№ п/п	Показатель	Значение	
		при естественной сушке	при конвективной сушке
1.	Количество повторений опыта, n , шт.	30	30
2.	Среднее арифметическое, \bar{D} , усл. ед.	37,9667	46,8667
3.	Среднее квадратическое отклонение, S , усл. ед.	5,2093	2,0965
4.	Коэффициент вариации, ν	13,72	4,47
5.	Средняя ошибка среднего значения, S_D , усл. ед.	0,9511	0,3828
6.	Показатель точности среднего значения, ζ , %	2,51	0,82
7.	Ошибка среднего квадратического отклонения, S_s , усл. ед.	0,6725	0,2707
8.	t -критерий Стьюдента (30; 0,05)	2, 0423	
9.	Доверительный интервал, усл. ед.	$36,02 \leq M_y \leq 39,91$	$46,09 \leq M_y \leq 47,65$

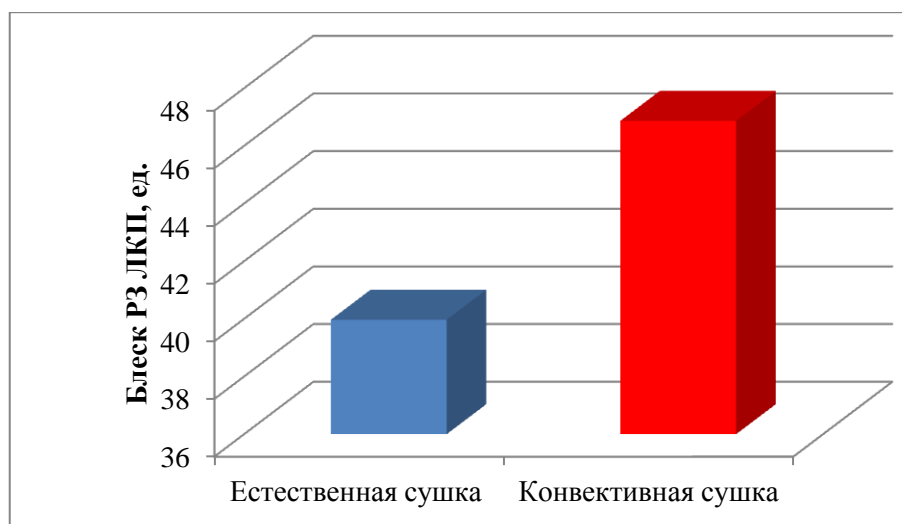


Рисунок 5.4. – Блеск РЗ ЛКП при высыхании при естественной и конвективной сушке

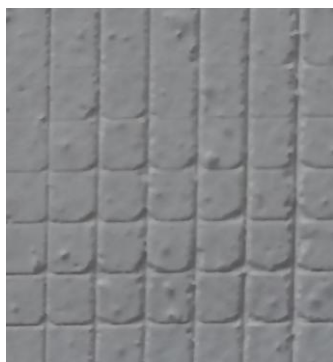
5.2.6. Определение адгезионной прочности

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Результаты исследований адгезионной прочности РЗ ЛКП толщиной $3 \pm 0,1$ мм, сформированного на древесной подложке (фанере) методом решетчатых надрезов для 6 образцов представлены на Рисунке 5.5.

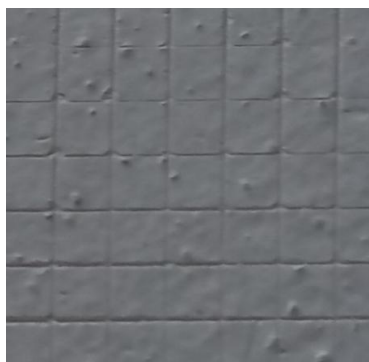
Результаты опроса мнений 9 экспертов и балльная оценка полученных результатов приведены в таблице 5.6. Анкеты 9 респондентов представлены в приложении 27.

Таблица 5.6 – Результаты экспертного опроса

Эксперт	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
1	1	0	1	1	1	2
2	1	1	2	2	0	2
3	1	1	2	2	0	2
4	1	1	0	2	0	2
5	2	1	1	2	0	2
6	2	1	2	1	0	1
7	1	1	2	2	1	2
8	1	1	2	2	0	2
9	2	1	1	2	1	2



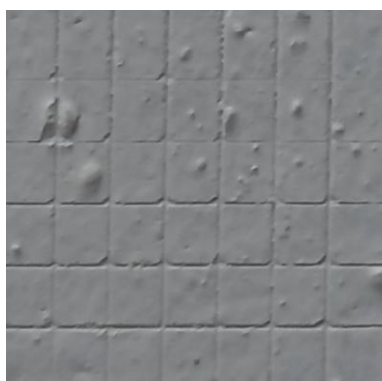
образец 1



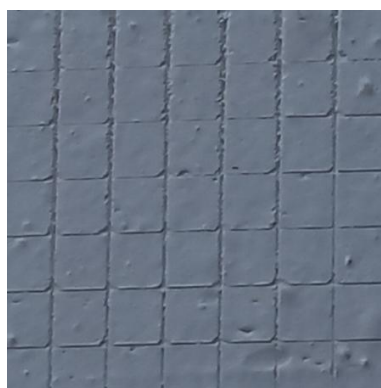
образец 2



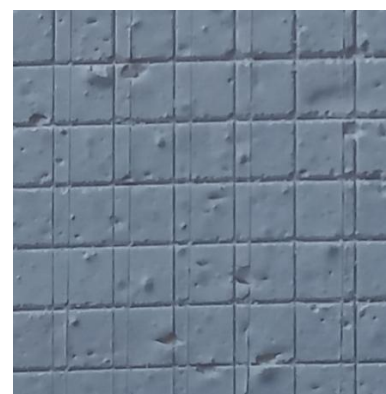
образец 3



образец 4



образец 5



образец 6

Рисунок 5.5. – Результаты исследований адгезионной прочности РЗ ЛКП толщиной 3 мм сформированного на древесной подложке (увеличение в 2,5 раза)

Для каждого из исследуемых образцов были присвоены ранговые числа (Рисунок 5.6) и определены нормированные ранги (Рисунок 5.7). Результаты по определению степени согласованности мнения экспертов представлено на Рисунке 5.8.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Номер образца						
2	Эксперт	1	2	3	4	5	6	
3	1	2	1	5	3	4	6	
4		1	0	2	1	1	2	
5	2	2	3	4	5	1	6	
6		1	1	2	2	0	2	
7	3	2	3	4	5	1	6	
8		1	1	2	2	0	2	
9	4	3	4	1	5	2	6	
10		1	1	0	2	0	2	
11	5	4	2	3	5	1	6	
12		2	1	1	2	0	2	
13	6	5	2	6	3	1	4	
14		2	1	2	1	0	1	
15	7	1	2	4	5	3	6	
16		1	1	2	2	1	2	
17	8	2	3	4	5	1	6	
18		1	1	2	2	0	2	
19	9	4	1	2	5	3	6	
20		2	1	1	2	1	2	
21								

Рисунок 5.6. – Присвоение ранговых чисел (оценки)

	A	B	C	D	E	F	G	H
		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 5.7. – Определение нормированных рангов

Определение коэффициента конкордации Кендалла	
$m=$	9
$n=$	6
$s=$	610,5
$b=$	2646
$W=$	0,51

Рисунок 5.8. – Определение степени согласованности мнения экспертов

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

5.2.7. Определение степени истирания

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Песок непрерывно попадал из резервуара установки на поверхность образца с толщиной покрытия 3 мм в течение 4 часов, общая масса песка за это время составила 600 кг. При визуальном осмотре повреждений покрытия [53] (в том числе, разрушений до подложки) на поверхности образца выявлено не было, было принято решение - проведение испытания остановить. На основании полученного результата сделан вывод о высокой степени стойкости сформированного покрытия к истиранию.

5.2.8. Определение теплостойкости

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3. На испытуемый образец с РЗ ЛКП накладывался тонкий ватный тампон диаметром 7 – 8 см и на него ставили стакан с водой, температура которого составляла около 60 °С, на 15 мин. Затем производился визуальный осмотр

образцов покрытия. Все образцы не изменили свой внешний вид, пленка не деформировалась, следов прилипания и волокон ваты на поверхности не обнаружено. На основании этого был сделан вывод об удовлетворительной теплостойкости РЗ ЛКП.

5.2.10. Определение стойкости к воздействию ультрафиолетового излучения

Испытание проводилось в соответствии с методикой, описанной в главе 3 в аппарате искусственной погоды – климатической камере Feutron 3001 в условиях для умеренно континентального климата в течение 30 суток (720 часов) при мощности облучения ультрафиолетом 375 Ватт и температуре воздуха в резервуаре 23°C. Орошение водой не применялось, т.к. рентгенозащитное лакокрасочное покрытие (РЗ ЛКП) предполагается использовать в закрытых отапливаемых помещениях.

После окончания ускоренного цикла УФ-облучения были определены показатели адгезии к древесной подложке методом решетчатых надрезов. Результаты были получены путем проведения опроса респондентов и обработкой их ответов методом экспертных оценок [96], который показал, что мнению экспертов можно доверять, т.к. степень согласованности ответов превысила 50% (Рисунок 5.9).

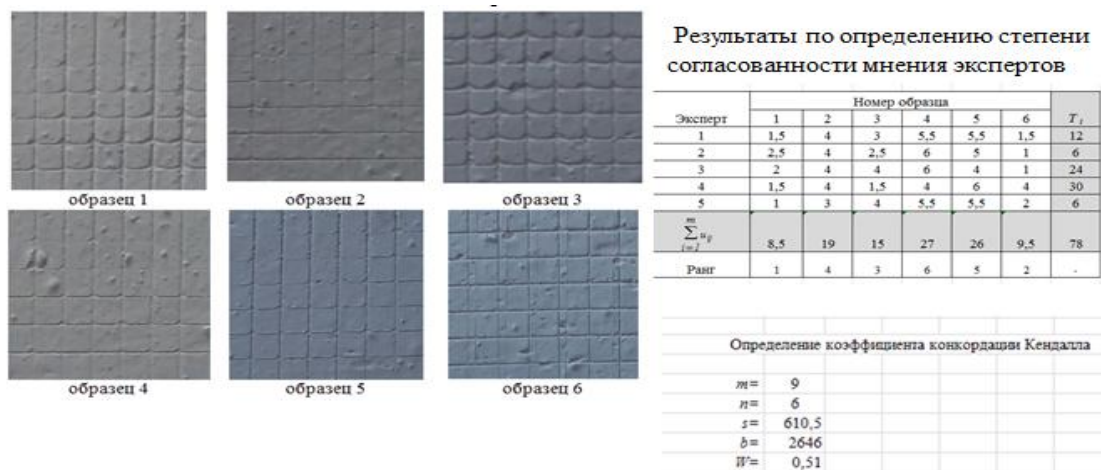


Рисунок 5.9. – Оценка адгезионной прочности РЗ ЛКП методом экспертных оценок

Изменения физико-механических показателей РЗ ЛКП в процессе УФ-облучения: прочность лакокрасочной пленки на изгиб, прочность при ударе, блеск покрытия, твердость пленки по маятниковому прибору представлены в виде диаграмм на Рисунок 5.10. На основании проведенных исследований был сделан вывод, что под воздействие УФ-излучения наблюдается снижение всех показателей.

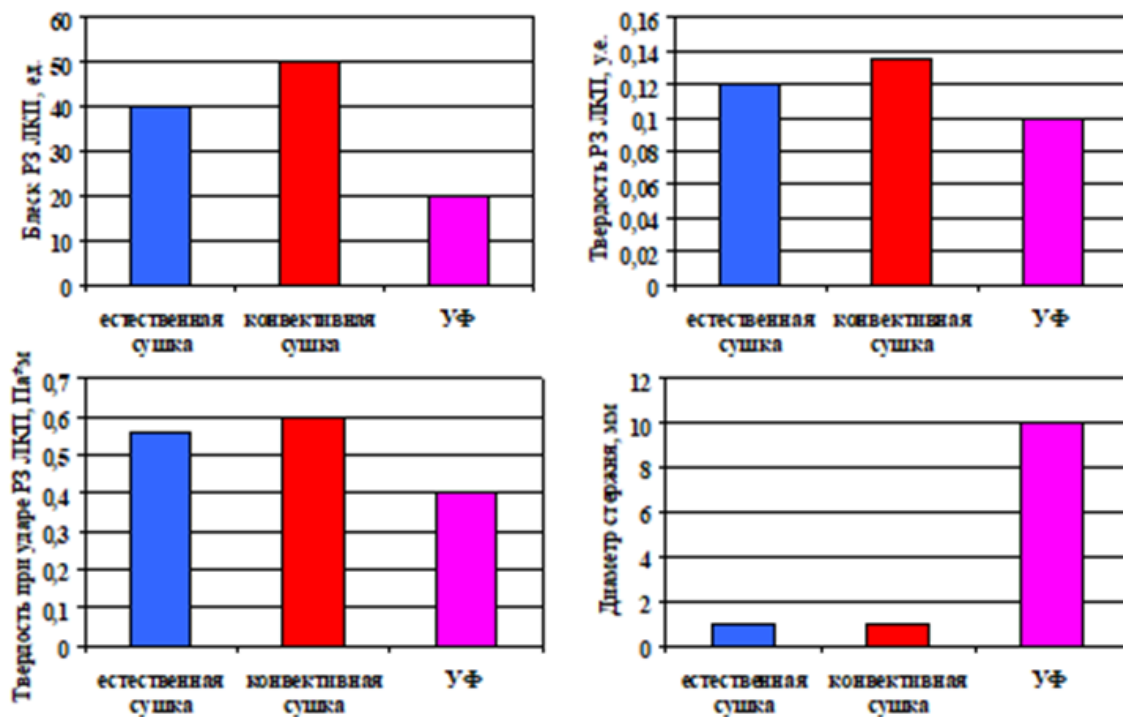


Рисунок 5.10. – Изменения физико-механических показателей РЗ ЛКП в процессе УФ-облучения

5.3. Выводы по главе

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Конвективная сушка улучшает технико-эксплуатационные характеристики РЗ ЛКП.
2. По своим свойствам РЗ ЛКП максимально приближено к баритовой штукатурке, но имеет более высокие показатели эстетических свойств.

3. Исследование адгезионной прочности сформированного покрытия показали, что у образцов наблюдается частичные сколы. Разрушение происходит не на границе раздела сред (покрытие - древесная подложка), а внутри технологического слоя.

4. Под воздействием УФ-облучения снижение показателей адгезионной прочности РЗ ЛКП не наблюдается.

5. У всех эстетических свойств наблюдается снижение показателей под воздействием УФ-облучения, т.к. под воздействием ультрафиолета покрытие теряет эластичность.

6. На основании полученных результатов испытаний сформированное покрытие РЗ ЛКП в соответствии с ГОСТ 54208 – 2014 «Покрытия защитно-декоративные на мебели из древесины и древесных материалов. Классификация и обозначение» обозначим следующим образом: покрытие рентгенозащитное на основе ВДАК – II. Н. ЗП. М. 6 С.

6. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

6.1. Особенности технологии нанесения высоковязких лакокрасочных материалов

Использование лакокрасочных материалов высокой вязкости снижает расход растворителей, позволяет формировать более толстое покрытие за одно нанесение, сокращает время высыхания. Однако нанесение высоковязких составов может осуществляться ограниченным количеством способов. Наиболее перспективным из них является вальцовое нанесение [89,90].

Сущность метода нанесения вальцами заключается в подаче определенного количества лакокрасочного материала, распределении его между вальцами и переносе некоторой его части на движущуюся подложку. Исходя из этого определения, весь процесс формирования покрытия можно разделить на три основных стадии:

- заполнение в системе оборудования резервуара с соблюдением технологических параметров лакокрасочного материала;
- распределение лакокрасочного материала между вальцами;
- перенос лакокрасочного материала с наносящего вальца на подложку.

Вальцовый метод формирования покрытия получил широкое распространение в промышленности. Метод имеет следующие преимущества:

- высокая производительность формирования покрытия (скорость перемещения подложки, на которой формируется покрытие, достигает 200 м/мин при ширине изделия 1800 мм и более);
- минимальные потери лакокрасочных материалов (наносимой композиции);

- сокращение расхода растворителей, так как содержание сухого остатка применяемых материалов значительно ниже, чем содержание сухого остатка материалов, применяемых при формировании покрытия другими методами;
- возможность автоматизации процесса формирования покрытия;
- получение равномерных по толщине покрытий с одинаковыми декоративными и защитными свойствами по всей площади отделываемой поверхности;
- возможность получения утолщенных покрытий (до 500 мкм за один проход через вальцы).

Недостатком метода является возможность формирования покрытия только на поверхности плоских изделий: фанеры, щитовых деталей из древесностружечной плиты и др. [113].

Оборудование для формирования покрытия вальцовым методом.

Вальцовая машина может состоять из двух или трех, участвующих в нанесении материала, и опорного вальцов. У трехвальцовых машин имеется наносящий, регулирующий и питающий вальцы, у двухвальцовых машин функции питающего и регулирующего вальцов совмещены. Регулирующий, питающий и опорный вальцы изготавливают из стали с последующим хромированием поверхности. Питающий валец иногда выполняют с винтовой нарезкой для увеличения захвата лакокрасочного материала. Наносящий валец обтягивается резиной или другим эластичным материалом, стойким к действию растворителей и механическим повреждениям. Эластичное покрытие наносящего вальца способствует компенсации разнотолщинности покрываемой подложки [47].

Способы подачи высоковязкого состава в вальцовую машину могут быть различными:

- материал подается в пространство между двумя вальцами, проходит через зазор между регулирующим и наносящим вальцами, величина которого определяет толщину наносимого слоя (Рисунок 6.1, а);

- материал подается на регулирующий валец дозирующим устройством, выполненным в виде бункера, одна из кромок стенки которого образует с поверхностью вальца регулируемую по величине щель; для обеспечения стабильности подачи в бункер, может создаваться избыточное давление (Рисунок 6.1, б);

- материал захватывается питающим валцом из ванночки, при этом количество его зависит от глубины погружения и частоты вращения вальца, а также от вязкости, плотности и поверхностного натяжения используемого материала (Рисунок 6.1, в);

- аналогично схеме «в», но с одновременным нанесением материала другой наносящей головкой на обратную сторону изделия (Рисунок 6.1, г).

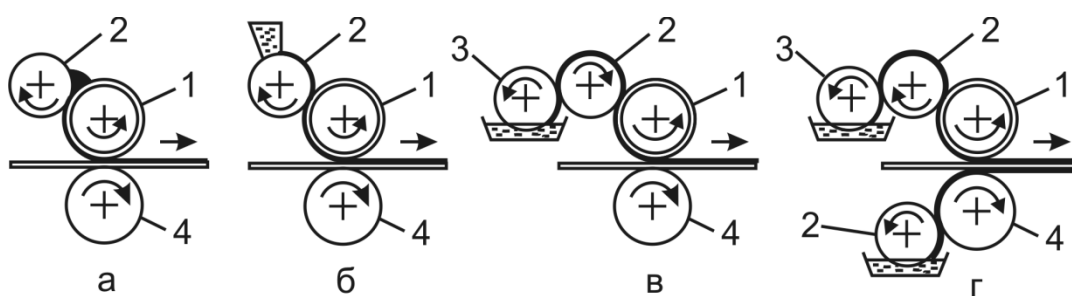


Рисунок 6.1. – Схемы расположения валцов при нанесении высоковязких ЛКМ методом прямой ротации: а, б, в, г - способы подачи лакокрасочного материала;
1 - наносящий валец; 2 - регулирующий валец; 3 - питающий валец; 4 - опорный валец

По способу нанесения все вальцовые машины делятся на два класса: машины прямой и обратной ротации (Рисунок 6.2). Принципиальное различие работы машин заключается в направлении вращения наносящего вальца относительно перемещения подложки. У машины прямой ротации направления вращения наносящего вальца и движения подложки совпадают. Эти машины применяют при нанесении печатных красок, грунтовании, лакировании и нанесении низковязких материалов для получения тонких покрытий [90].

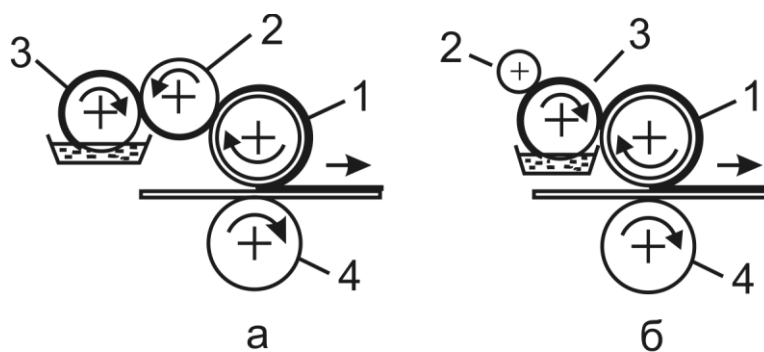


Рисунок 6.2. – Схемы расположения вальцов при нанесении лакокрасочных материалов методом обратной ротации, отличающиеся различным расположением регулирующего вальца: а, б - способы подачи лакокрасочного материала; 1 - наносящий валец; 2 - регулирующий валец; 3 - питающий валец; 4 - опорный валец.

В машинах обратной ротации направление вращения наносящего вальца противоположно направлению движения подложки. Эти машины предпочтительнее использовать для получения покрывных слоев толщиной от 15 до 300 мкм и выше. Лакокрасочный материал не проходит в зазорах между регулирующим и наносящим вальцами и между подложкой и наносящим вальцом, что позволяет получать гладкую, ровную поверхность покрытия.

Толщина покрытия на подложке зависит от величины зазора между питающим вальцом или дозирующим устройством и регулирующим вальцом, соотношения скоростей вальцов и ленты. Привод наносящего вальца в машинах обратной ротации должен иметь плавную регулировку скорости и более высокую мощность, чем в машинах прямой ротации, так как из-за различного направления скоростей и отсутствия зазоров возрастает сопротивление вращению вальца. Эластичное покрытие наносящего вальца должно обладать повышенной устойчивостью к истиранию, а окрашиваемая лента не должна иметь большой шероховатости и заусенцев, острых кромок и др.

Чтобы высоковязкая композиция заполнила отдельные впадины (структурные и анатомические неровности, трещины, вмятины), в конструкции станка необходим дополнительный втирающий валец, а в некоторых случаях и шпатлевочное устройство в виде тонкой металлической пластины (шпателя) с заостренным краем (Рисунок 6.3).

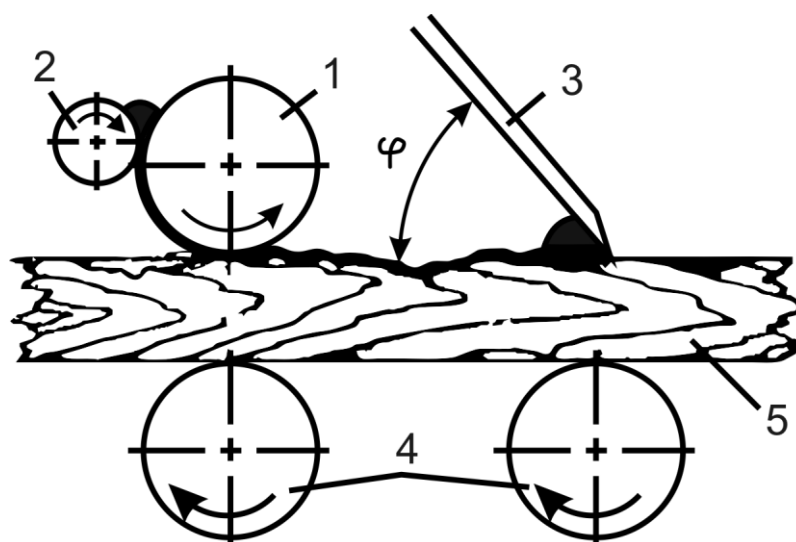


Рисунок 6.3. – Принципиальная технологическая схема вальцового станка с упругим шпателем: 1 — наносящий валец; 2 — дозирующий валец; 3 — шпатель; 4 — подающие вальцы; 5 — деталь

Шпатель, расположенный под углом к детали, вдавливают ЛКМ в углубления, счищает ее избыток с поверхности и выравнивает покрытие. Формирование защитного слоя осуществляется следующим образом. По роликовому конвейеру деталь перемещается в сторону наносящего и разравнивающего устройства. Далее деталь подается наносящим и нижними обрезиненными подающими вальцами, высоковязкий состав поступает в промежуток между наносящим и дозирующим хромированными вальцами. Вращение дозирующего вальца встречное, поэтому во избежание выброса массы материала он снабжен ракелем. После нанесения слой материала вдавливается в углубления поверхности древесины гладким хромированным вальцом, расположенным вслед за наносящим и вращающимся навстречу подачи детали. Его поверхность постоянно очищается от излишек состава ракелем (Рисунок 6.4)

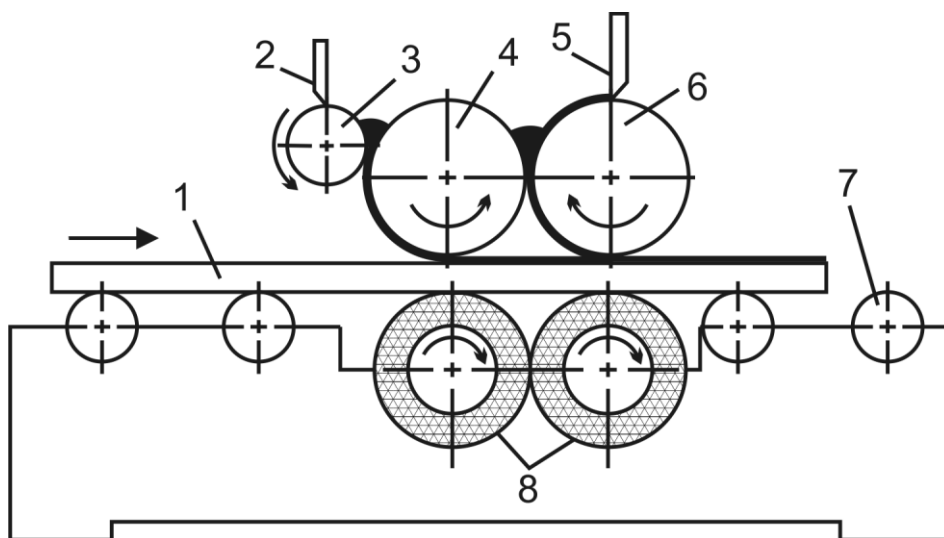


Рисунок 6.4. – Технологическая схема вальцово-рабельного станка для грунтования и штатлевания пластей щитовых деталей: 1 - деталь; 2, 5 - ракели; 3 - дозирующий валец; 4 - наносящий валец; 6 - втирающий валец; 7 - роликовый конвейер; 8 - подающие вальцы

6.2. Разработка технологии изготовления изделия с рентгенозащитными свойствами

Немаловажным условием применения новых композиционных лакокрасочных материалов для изготовления продукции специального назначения в деревообработке является возможность осуществить технологический процесс формирования защитных покрытий на их основе непосредственно на производстве и с минимальным количеством затрат на его организацию [73]. Т.к. специфические свойства разработанной РЗ ЛКК проявляются только при нанесении на подложку, необходимо подобрать технологические режимы для формирования РЗ ЛКП и представить на реализацию изделие со специфическими свойствами. В данной главе выполнен сравнительный анализ технологических процессов отделки рентгенозащитных стеновых панелей, с применением двух способов отверждения покрытия: естественной и конвективной сушкой. Анализ проводится с целью выбора оптимального технологического процесса по параметрам энергоемкости,

трудоемкости, величине капитальных и эксплуатационных затрат, определения потребностей в производственных площадях и других экономических показателей [23].

6.2.1. Выбор схемы технологического процесса

Формирование РЗ ЛКП состоит из следующих этапов: подготовка РЗ ЛКК, подготовка поверхности детали и формирование покрытия [74].

Подготовка РЗ ЛКК проводится в лакоприготовительном отделении и заключается в ее перемешивании, доведении до требуемой вязкости.

Подготовка поверхности заключается в механическом удалении с нее остатков шлифовальной пыли и других загрязнений.

На этапе формирования покрытия осуществляется нанесение защитного слоя за один технологический проход и его отверждение.

Перечень технологических операций при формировании РЗ ЛКП представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Структура технологического процесса

№ п/п	Технологическая операция	Применяемое оборудование	
		ТП с атмосферной сушкой	ТП с конвективной сушкой
1	Удаление пыли	Щеточный станок ХС620	
2	Нанесение РЗ ЛКК	линия WL-4000 «MasterPROFF»	
3	Отверждение покрытия	Вытяжной зонт, стеллажи	Конвективная камера проходного типа, стеллажи
4	Технологическая выдержка	-	Вытяжной зонт

6.2.2. Технические характеристики применяемого оборудования

Щеточный станок ХС620. Станки данного типа предназначены для чистки поверхности панелей, включая кромки и профиль, как после шлифования, так и по необработанной поверхности, а также окрашенных деталей, с помощью щеточных валов и системы обдува. К отличительным особенностям станка можно отнести следующее:

- чистка верхней поверхности и всех четырех кромок заготовки;
- прижимные ролики каждого щеточного узла гарантируют устойчивость заготовки во время чистки;
- регулировка высоты щеточных узлов и рабочего давления щеток на поверхность заготовки.

Техническая характеристика щеточного станка ХС620 представлена в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Техническая характеристика щеточного станка ХС620

№ п/п	Показатель	Значение
1	Максимальная ширина заготовок, мм	600
2	Максимальная толщина заготовок, мм	40
3	Скорость подачи, м/мин	0-19
4	Количество щеточных узлов (верхних), шт	2
5	Наличие обдува на выходе	имеется
6	Общая установленная мощность, кВт	2,0
7	Габариты, мм	3100×968×1345

Линия WL-4000 «Master PROFF». Данный тип вальцовых покрасочных станков предназначен для нанесения высоковязких материалов, наполнителей и шпатлевок на плоские заготовки с пористой структурой поверхности или неровностями древесного волокна. Станок оснащен одним специальным наносящим валом и стальным «разглаживающим» валом, установленным после

наносящего узла. Благодаря обратной ротации стального вала обеспечивается «вдавливание» вязких материалов в поверхность заготовки и заполнение пор, трещин, сучков и прочих неровностей. К отличительным особенностям станка можно отнести следующее:

- эффективно наносит лакокрасочное покрытие на плоские заготовки с неровной и крупнопористой структурой;
- точная регулировка скорости конвейера и наносящего (покрасочного) вала осуществляется с помощью инвертора;
- независимая регулировка скорости вращения наносящего и дозирующего валов;

Техническая характеристика линии WL-4000 «Master PROFF» представлена в таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Техническая характеристика линии WL-4000 «Master PROFF»

№ п/п	Показатель	Значение
1	Рабочая ширина, мм	600
2	Толщина окрашиваемых заготовок, мм	3-40
3	Количество наносимого лака, г/м ²	10-30
4	Максимальная скорость подачи, м/мин	19
5	Высота рабочего стола, мм	850±40
6	Длина ленточного полотна конвейера, мм	620×3160-2
7	Общая мощность, кВт	3,42
8	Мотор конвейера, кВт	0,75
9	Мотор наносящего вала, кВт	0,75
10	Мотор дозирующего вала, кВт	0,37
11	Мотор дозирующего стального вала, кВт	0,75
12	Габариты, мм	1580×1450×1600
13	Масса, кг	1000

Конвективная сушильная камера. Представляет собой сушильный туннель непрерывного действия с поперечным движением этажерок. Ограждения камеры выполнены из сборных панелей на основе вспененного полиуретана и листового алюминия с низкой теплопроводностью. Перемещение этажерок по камере осуществляется напольным двухрядным цепным транспортером. Характер движения транспортера – пульсирующий с неравномерной ритмичностью, управление осуществляется с пульта оператора загрузки. Тепловое и вентиляторное оборудование размещено на крыше. Циркуляция сушильного агента продольная встречная. Ширина рабочей камеры сушильной установки составляет 2,6 м, длина определяется расчетом в зависимости от времени сушки и требуемой производительности.

Вытяжной зонт представляет собой навес с пирамидальной крышей соединенной с вентиляционной системой. Применяется для эффективного удаления из цехового пространства паров растворителей при сушке и перегретого воздуха при охлаждении деталей с целью поддержания требуемых санитарных условий работы в цехе. Техническая характеристика передвижной этажерки представлена в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Техническая характеристика передвижной этажерки

№ п/п	Показатель	Значение
1	Количество этажей, шт	15
2	Ширина полки, мм	1000
3	Габаритные размеры, мм	2300×1100×1600

6.2.3. Режимы технологических операций

Режимы технологических операций представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5. – Режимы технологических операций

№ п/п	Операция	Показатель	Значение
1	Удаление пыли	Скорость подачи, м/мин	10
2	Нанесение РЗК	Скорость подачи, м/мин	10
		Расход РЗК, г/м ²	350
		Количество нанесений	1
		Толщина слоя, мм	3
5	Атмосферная сушка	Время сушки, мин	220
		Влажность воздуха, %	60-70
		Температура воздуха, °С	18-20
6	Конвективная сушка	Время сушки, мин	210 (60)
		Влажность воздуха, %	60-70
		Температура агента сушки, °С	60
7	Технологическая выдержка	Время выдержки, мин	60

6.2.4. Расчет производительности оборудования

Характеристика отделяваемой детали:

Длина, мм2400

Ширина, мм290

Толщина, мм12

Площадь, м².....0,69

Станок для удаления пыли и линию нанесения предполагается установить последовательно, что позволит сократить количество рабочих. Тогда производительность линии определяется по формуле:

$$P_{л} = \frac{T_{см} \cdot n \cdot K_u}{L + S_1}, \quad (6.1)$$

где $P_{л}$ – сменная производительность станка на одно нанесение РЗ ЛКК, шт/см;

u – средняя скорость подачи, обеспечивающая синхронность работы совмещенного в линию оборудования, м/мин;

L – длина покрываемой детали, м;

$T_{см}$ – продолжительность рабочей смены, мин;

K_u – коэффициент использования станка ($K_u = 0,5 - 0,9$);

n – количество деталей, уложенных по ширине конвейера, шт.;

S_1 – межоперационные разрывы, м ($S_1=0,3$).

$$P_{л} = \frac{480 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 0,5}{2,4 + 0,3} = 888 \text{ шт/см.}$$

Эффективный фонд времени при пятидневной рабочей неделе, определяемый как разность календарного фонда времени (365 дней) и суммы выходных, праздничных дней и времени на ремонтно-профилактические работы составляет:

$$365 - (104 + 15 + 20) = 226 \text{ дней.}$$

Таким образом, при односменном режиме работы производительность участка формирования РЗ ЛКП составит:

$$(226 \cdot 888) \cdot 0,69 = 138474 \text{ м}^2/\text{год.}$$

Расчет сушильного оборудования заключается в определении требуемой полезной площади вытяжного зонта при атмосферной сушке покрытия или требуемой длины сушильного туннеля при конвективной сушке.

Расчет длины туннеля опирается на данные производительности линии нанесения РЗ ЛКК и экспериментальные данные времени сушки.

Определенная по формуле производительность, за счет введения нормативных коэффициентов машинного и рабочего времени, является величиной усредненной для некоторого продолжительного промежутка времени. При этом производительность в конкретный, относительно короткий, момент времени может быть значительно выше нормативной, что может привести к нарушению ритмичности работы, загромождению рабочих мест заготовками, нарушению технологических режимов, снижению производительности и т.д.

Для расчета длины сушильного туннеля определим моментальную производительность линии нанесения РЗК по формуле:

$$П_{\text{м}} = \frac{nU_{\text{н}}}{l_{\text{н}}}, \quad (6.2)$$

где $П_{\text{м}}$ – моментальную производительность линии нанесения РЗ ЛКК, шт./мин.

$$П_{\text{м}} = \frac{1 \cdot 10}{2,5} = 4 \text{ шт./мин.}$$

Тогда минимальное время заполнения этажерки, вместимость которой составляет $V_{\text{э}} = 30$ деталей будет равно:

$$T_{\text{з}} = \frac{V_{\text{э}}}{П_{\text{м}}} = \frac{30}{4} = 7,5 \text{ мин.}$$

При минимальном шаге этажерок по длине камеры $t_{\text{э}} = 1,25$ метра и времени конвективной сушки $\tau_{\text{к}} = 210$ мин, длина сушильного туннеля составит:

$$L_{\text{к}} = \frac{t_{\text{э}}}{T_{\text{з}}} \cdot \tau_{\text{к}} = \frac{1,25}{7,5} \cdot 210 = 35 \text{ м.}$$

На Рисунке 6.5 представлена схема сушильной камеры с подвижными этажерками.

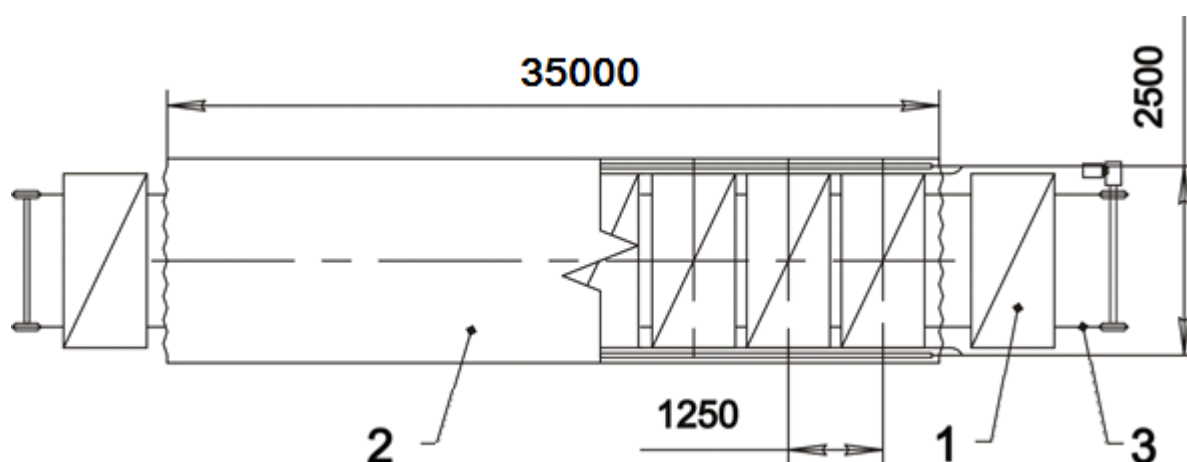


Рисунок 6.5. – Схема сушильной камеры с подвижными этажерками:

1- этажерка с деталями; 2 – ограждения камеры; 3 – цепной транспортер.

При атмосферной сушке покрытий количество этажерок N_3 которые одновременно используются для сушки можно определить по формуле, шт:

$$N_3 = \frac{\tau_a}{T_3}, \quad (6.4)$$

где N_3 – количество этажерок, которые одновременно используются для сушки, шт.;

τ_a – время естественной сушки, мин;

T_3 – время заполнения одной этажерки, мин.

$$N_3 = \frac{1605}{7,5} = 214 \text{ шт.}$$

На Рисунок 6.6 показана схема расстановки этажерок при естественной сушке.

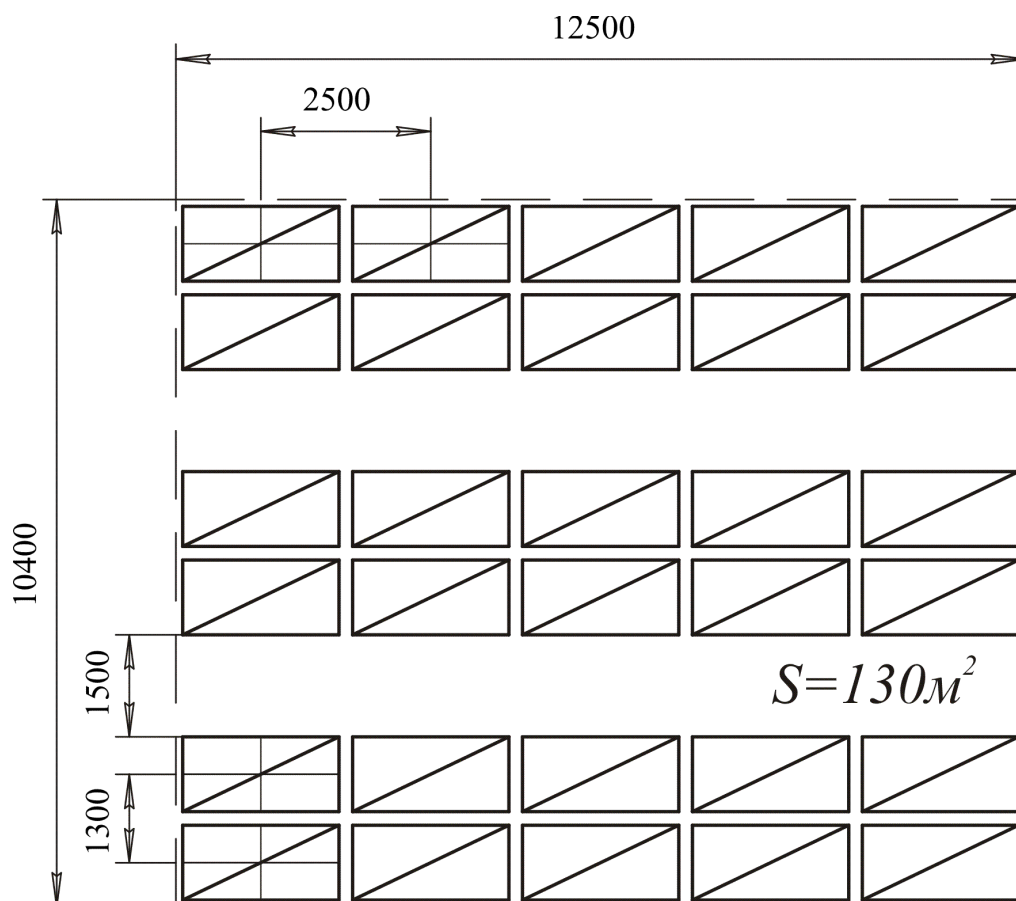


Рисунок 6.6. – Схема размещения этажерок под вытяжным зонтом

По формуле 6.4 также можно также определить количество этажерок, необходимых для выдержки деталей после сушки конвективным способом, для чего время естественной сушки τ_a заменяется на время технологической выдержки τ_b , равное 60 мин:

$$N_э = \frac{\tau_b}{T_3} = \frac{60}{7,5} = 8 \text{ шт.}$$

6.2.5. Описание технологического процесса отделки

Технологический процесс с использованием **конвективной сушки** представлен на Рисунке 6.7. Плотные пакеты заготовок (поз. 1) подаются с помощью гидравлической тележки к загрузочному концу линии отделки. Основной рабочий подает по одной заготовке в щеточный станок (поз. 2) в котором деталь очищается от пыли с помощью щеток и обдува воздуха. Выходя из щеточного станка деталь захватывается подающим устройством вальцового станка (поз. 3) и подается в станок для нанесения слоя РЗ ЛКК. На выходе из вальцового станка вспомогательный рабочий линии принимает детали и укладывает их на сушильные этажерки (поз. 4), после заполнения этажерки вспомогательный рабочий перемещает ее на приемный участок сушильной камеры (поз. 5) и с пульта управления камерой приводит в движение конвейер, который совершает перемещение равное шагу этажерок в камере, в результате чего, этажерка с не высушенными деталями заезжает в камеру, а на противоположном конце из камеры выгружается этажерка с высушенными деталями, которую второй вспомогательный рабочий перемещает под вытяжной зонт (поз. 6) для остывания. За время заполнения следующей этажерки этот же рабочий осуществляет разгрузку остывших деталей из этажерок в плотные пакеты (поз. 7) для отгрузки с участка отделки.

Размеры участка отделки: длина – 18 м; ширина – 12 м. Площадь участка составляет не менее 216 м², количество рабочих – 3 чел.

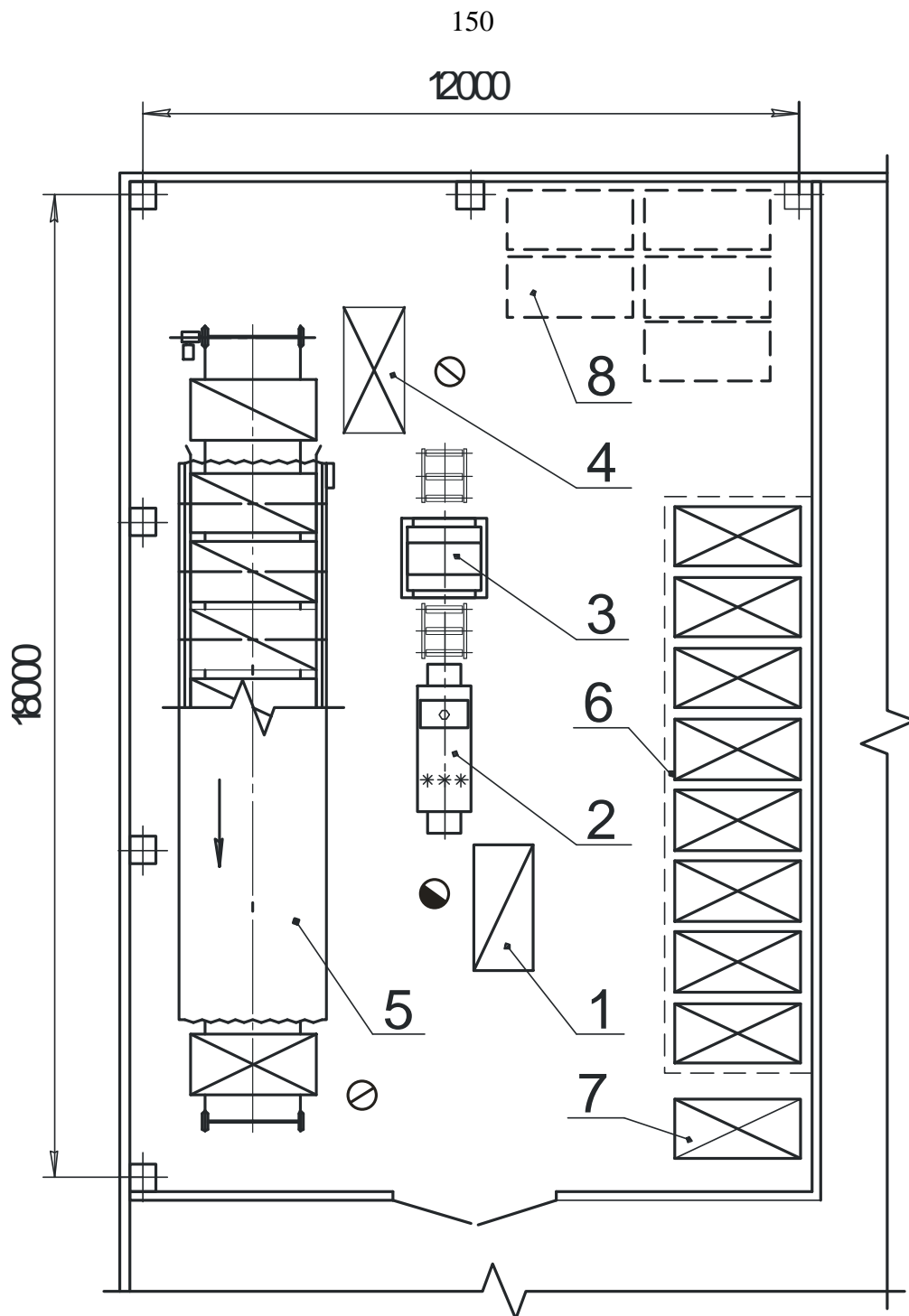


Рисунок 6.7. – Схема участка отделки при высыхании РЗ ЛКК с конвективной сушкой: 1 – плотный пакет заготовок; 2 – щеточный станок; 3 – вальцовый станок; 4 – этажерка с заготовками; 5 – сушильная камера; 6 – подступное место с вытяжным зонтом; 7 – плотный пакет готовых деталей для отгрузки; 8 – пустые этажерки

Технологический процесс с интенсификацией высыхания РЗ ЛКП при **естественной сушке** представлен на Рисунке 6.8.

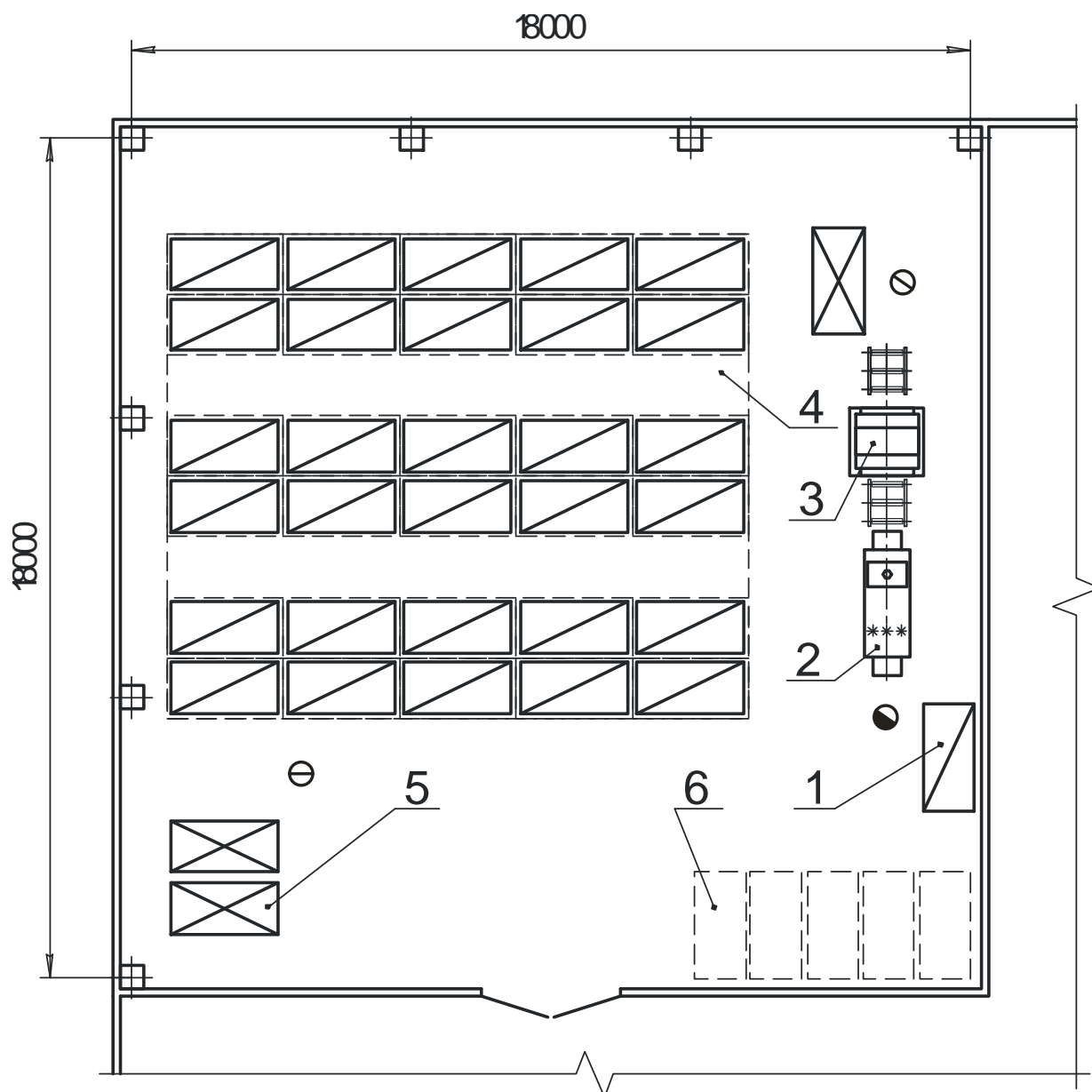


Рисунок 6.8. – Схема участка отделки при естественной сушке:

1 – плотный пакет заготовок; 2 – щеточный станок; 3 – вальцовый станок;
 4 – подступное место с вытяжным зонтом; 5 – плотный пакет готовых деталей для
 отгрузки; 6 – пустые этажерки.

Размеры участка отделки: длина – 18 м; ширина – 18 м; площадь – 324 м²;
 количество рабочих – 3 чел.

Плотные пакеты заготовок (поз. 1) подаются с помощью гидравлической тележки к загрузочному концу линии отделки. Основной рабочий подает по одной заготовке в щеточный станок (поз. 2) в котором деталь очищается от пыли с помощью щеток и обдува воздуха, выходя из щеточного станка деталь

захватывается подающим устройством вальцового станка (поз. 3) и подается в станок для нанесения слоя РЗ ЛКК. На выходе из вальцового станка вспомогательный рабочий линии принимает детали и укладывает их на сушильные этажерки. После заполнения этажерки рабочий перемещает ее под вытяжной зонт (поз. 4) для сушки. По мере высыхания деталей второй вспомогательный рабочий разгружает высохшие детали в плотные пакеты (поз. 5) и возвращает пустые этажерки (поз. 6) к начальному этапу технологического процесса.

6.2.6. Выводы по оценке технологических процессов

Анализируя два варианта технологического процесса отделки стеновых рентгенозащитных панелей, можно выявить следующие преимущества и недостатки каждой технологической цепочки.

Технологический процесс с использованием интенсификации сушки конвекцией имеет следующие достоинства:

- сокращение времени технологического процесса;
- меньшая занимаемая площадь участка отделки;
- сокращение объема транспортных операций в пределах участка;
- повышение эффективности использования головного оборудования за счет сокращения времени загрузки сушильной установки;
- более полная изоляция процесса сушки;
- высокая ритмичность процесса;
- более высокие показатели качества покрытия.

Недостатки:

- необходимость капитальных вложений;
- повышенный расход энергии.

Технологический процесс формирования покрытия при естественной сушкой, в противовес первому обладает достоинствами, которые являются

недостатками первого варианта, а также обладает недостатками, которые характеризуют положительные стороны первого варианта.

Выбор оптимального решения, основанный на выявлении приоритетных характеристик технологического процесса и поиска компромиссного решения, может проводиться только в условиях конкретного предприятия с учетом его технических и экономических возможностей.

6.3. Оценка экономической эффективности технологического процесса

6.3.1. Расчет стоимости основных средств

Для осуществления производственной деятельности организации подобрано оборудование в количестве, соответствующему технологическому процессу производства. Расчет стоимости основных средств (оборудование, здания) представлен в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Расчет стоимости основных средств (оборудование, здания)

Наименование	Марка	Кол-во, шт	Стоимость за единицу, тыс. руб	Стоимость всего, тыс. руб
Оборудование				
Щеточный станок	XC620	1	762	762
Рольганг	PH 1-300	2	15	30
Линия отделки	WL-4000 «MasterPROFF»	1	550	550
Этажерка	ЭТ-30	35	13	455
Зонт вытяжной	нестандартный	1	120	120
Тележка гидравлическая	PDT-2500	1	10	10
Аспирационная установка	УВП-3000	1	69	69
Диссольтвер-смеситель	ЮВС	1	110	110
Итого:				2101

Наименование	Марка	Кол-во, шт	Стоимость за единицу, тыс. руб	Стоимость всего, тыс. руб
Здания и сооружения				
Помещение теплового исполнения 18×18м ²			8	2592
Итого:				4693

6.3.2. Расчет стоимости материальных ресурсов

Материальные затраты включают затраты на сырье и основные материалы, полуфабрикаты, вспомогательные материалы, топливо и электроэнергию на технологические цели. Расчет необходимого количества сырья и материалов ведется по нормам расхода материальных ресурсов и планируемого объема производства в количестве 10000 шт. панелей и представлен в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Расчет стоимости сырья и материалов

Наименование материала	Ед.из мерен ия	Цена руб.	Количес тво на изделие	Количество на программу	Стоимо сть на изделие, руб.	Стоимость на программу, тыс. руб.
Сульфат бария	кг	100	0,44	4400	44	440
ВД-АК эмаль	кг	340	0,44	4400	149,6	1496
Вода дистиллирован ная	л	40	0,22	2200	8,8	88
Фанера	м ²	280	0,69	6900	193,2	1932
Итого:					395,6	3956

Количество электроэнергии на освещение принимается укрупнено 45 кВт на 1 м² площади помещения. Количество силовой электроэнергии принимается

укрупнено 582 кВт на 1 кВт установленной мощности оборудования. Расчет стоимости электроэнергии представлен в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Расчет стоимости электроэнергии

Потребители	Количество, кВт	Стоимость, кВт ч, руб.	Стоимость тыс. руб.
Освещение	14 580	7,69	112,12
Силовая сеть	8730	7,69	67,13
Итого:			179,25

Расчет стоимости водоснабжения и канализации представлен в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Расчет стоимости водоснабжения и канализации

Потребители	Количество, м ³ ,	Стоимость, м ³ , руб.	Стоимость тыс. руб.
Водоснабжение	400	28,36	11,34
Канализация	400	16,92	6,76
Итого:			18,1

6.3.3. Расчет амортизационных отчислений

Расчет амортизационных отчислений представлен в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Расчет амортизационных отчислений .

Виды основных фондов	Норма амортизации, %	Балансовая стоимость, тыс. руб.	Амортизационные отчисления, тыс. руб.
Здания и сооружения	15	2592	388,8
Оборудование	25	2101	525,25
Инструмент	50	100	50
Итого:			964,05

6.3.4. Расчет численности работающих и фонда оплаты труда

Расчет эффективного фонда времени одного рабочего (основного, вспомогательного) сведен в таблице 6.11.

Таблица 6.11 – Эффективный фонд времени одного рабочего

Наименование показателя	Значение
Календарная продолжительность года, дней	365
Нерабочие дни, всего:	114
В том числе: праздничные	10
Выходные	104
Количество рабочих дней	251
Неявки на работу всего, дней	36
В т. ч. отпуска основные и дополнительные	24
Болезни	10
Выполнение государственных обязанностей	1
Неявки с разрешения администрации	1
Число эффективных дней одного рабочего	215
Продолжительность рабочей смены, ч	8
Внутри сменные потери, ч	0,1
Продолжительность рабочего дня с учетом потерь,	7,9
Эффективный фонд времени одного рабочего, ч	1698,5

Принимаем величину эффективного фонда времени одного рабочего в год $T_{эф.} = 1698,5$ часов.

Расчет численности и фонда оплаты труда основных рабочих представлен в таблице 6.12.

Таблица 6.12 – Расчет численности и фонда оплаты труда основных рабочих

Профессия рабочих	Кол-во	Разряд рабочего	Часовая тарифная ставка	Потребное количество чел.-часов на программу	Тарифный фонд з/п, тыс. руб.
Оператор линии отделки	1	4	300	1596	478
Итого:					175,6

Годовой фонд оплаты труда основных рабочих составил 175,6 тыс. руб.

Таблица 6.13 – Расчет численности и фонда оплаты труда вспомогательных рабочих.

Профессия рабочих	Кол-во работающих	Разряд рабочего	Часовая тарифная ставка	Потребное количество чел.-часов на программу	Тарифный фонд з/п, тыс. руб.
Рабочий линии отделки	1	3	160	1596	255,4
Рабочий участка сушки	1	3	200	1596	319,2
Итого:					574,6

Годовой фонд оплаты труда вспомогательных рабочих составил 574,6 тыс. руб.

Таблица 6.14 – Расчет численности и фонда оплаты труда служащих

Наименование должностей	Численность	Должностной оклад, месячный, тыс. руб.	Годовой фонд з/п, тыс. руб.
А: Заработная плата цехового персонала			
Лаборант	1	20	240
Слесарь	1	21	252
Итого А:			492

Наименование должностей	Численность	Должностной оклад, месячный, тыс. руб.	Годовой фонд з/п, тыс. руб.
Б: Заработная плата аппарата управления			
Технолог	1	30	360
Итого Б:			360
Итого:			852

Годовой фонд оплаты труда вспомогательных рабочих составил 852 тыс. руб.

Расчет годового фонда зарплаты производится по категориям работающих на основании ранее выполненных расчетов тарифного фонда зарплаты рабочих и годового фонда зарплаты приведен в таблице 6.15.

Таблица 6.15 – Расчет численности персонала и годового фонда оплаты труда.

Показатели	Персонал предприятия			Итого
	Основные рабочие	Вспомог. рабочие	Служащие	
Списочная численность, чел	1	2	3	6
Тарифный фонд оплаты труда (ТФОТ), тыс. руб.	478	574,6	852	1904,6
Премии и доплаты (15% ТФОТ), тыс. руб.	71,7	86,2	127,8	285,7
Фонд основной оплаты труда (ТФОТ + Пид), тыс. руб.	549,7	660,8	979,8	2190,3
Фонд дополнительной оплаты труда (20% ФООТ), тыс.руб.	109,9	132,2	196	438,1
Годовой фонд оплаты труда (ФООТ + ФДОТ), тыс. руб.	659,6	793	1175,8	2628,4

В результате расчета, годового фонда оплаты труда персонала предприятия составил 2628,4 тыс. руб.

6.4.5. Расчет общепроизводственных расходов

Таблица 6.16 – Смета производственных расходов

Статьи расходов	Сумма, тыс. руб.
А. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	
1. Заработная плата вспомогательных рабочих	793
2. Отчисления на социальные нужды (43%)	341
3. Амортизация оборудования и транспортных средств	525,25
4. Материалы, запасные части	52,5
5. Возмещение износа малоценного и быстроизнашивающегося инвентаря	26,25
Итого по разделу А:	1738
Б. Цеховые расходы	
1. Оплата труда цехового персонала	492
2. Отчисления на социальные нужды	211,56
3. Амортизация зданий и сооружений	388,8
4. Содержание здания	
а) расходы на отопление	136
б) расходы электроэнергии	179,25
в) водоснабжение и канализация	18,1
5. Затраты на ремонт и содержание зданий, сооружений, инвентаря	144,42
6. Охрана труда	4,92
Итого по разделу Б:	1575,05
Всего:	3313,05

6.3.6. Расчет общехозяйственных расходов

Для определения величины общехозяйственных расходов в целом по предприятию составляется смета на основе ранее выполненных расчетов.

Таблица 6.17 – Смета общехозяйственных расходов

Статьи расходов		Сумма, тыс. руб.
А. Расходы по управлению		
1.	Оплата труда аппарата управления предприятия	360
2.	Отчисления на социальные нужды	154,8
3.	Служебные командировки и перемещения	18
4.	Расходы на пожарно-сторожевую охрану	3,6
5.	Прочие расходы	3,6
Итого по разделу А		540
Б. Общехозяйственные расходы		
1.	Подготовка и переподготовка кадров	36
2.	Прочие расходы	36
Итого по разделу Б		72
Всего		612

6.3.7. Расчет коммерческих расходов

Для определения величины этих расходов составляется смета, которая включает расходы на тару и упаковку продукции, ее транспортировку, комиссионные сборы и отчисления, затраты на рекламу и прочие расходы по сбыту.

Для сокращения расчетов эти расходы можно принять укрупнено в размере 5% от производственной себестоимости, что составляет 410,6 тыс. руб.

6.3.8. Калькуляция себестоимости

Таблица 6.18 – Калькуляция себестоимости

Статьи калькуляции	Сумма затрат на единицу продукции, руб.	Сумма затрат на программу, тыс. руб.
1. Материальные затраты	395,6	3956
2. Оплата труда производственных	65,96	659,6

Статьи калькуляции	Сумма затрат на единицу продукции, руб.	Сумма затрат на программу, тыс. руб.
рабочих		
3. Отчисления на социальные нужды	28,36	283,6
4. Общепроизводственные расходы	331,3	3313,05
Итого (цеховая себестоимость):	821,2	8212,25
5. Общехозяйственные расходы	61,2	612
6. Коммерческие расходы (5%)	41,06	410,61
Итого (полная себестоимость):	923,49	9234,9

6.3.9. Планирование сбыта продукции

План по сбыту продукции формируется на основе оценки рынка сбыта, принятого ассортимента продукции, установленного уровня цен (производственная программа). Расчет приведен в таблице 6.19.

$$C_{\text{р.}} = C_{\text{ед.}} \cdot \left(1 + \frac{P}{100}\right), \quad (6.5)$$

где $C_{\text{р.}}$ - себестоимость 1 изделия, руб.;

P - величина рентабельности продукции, составляет 30 - 70 % .

Таблица 6.19 – План сбыта продукции

Продукция	Цена за штуку, руб.	Объем, шт.	Выручка, тыс. руб.
Панель рентгенозащитная	1500	10 000	15000

6.3.10. Расчет чистой прибыли

Финансовым результатом реализации инвестиционного проекта является прибыль. Определение показателя прибыли выполняется по таблице 6.20.

Таблица 6.20 – Расчет чистой прибыли

№ п/п	Статьи калькуляции	Сумма, тыс. руб.
1	Выручка от реализации продукции	15000
2	Затраты на производство реализованной продукции	9234,9
3	Балансовая прибыль	5765,1
4	Налоги (20%)	1153,02
5	Чистая прибыль	4612,08
6	Показатели рентабельности (балансовая прибыль к объему продаж), %	37

6.3.11. Экономическая эффективность технологии

Срок окупаемости инвестиций характеризует продолжительность периода, в течении которого проект будет работать «на себя». Для внедрения проекта необходимы инвестиционные затраты на приобретение основных фондов и оборотных средств на период равный одному обороту средств. Принимаем величину оборота равной двум неделям, тогда инвестиционные затраты составят:

$$ИЗ = ОФ + \frac{\sum_{i=1}^n CM}{n} \times 14, \quad (6.6)$$

где: $\sum_{i=1}^n CM$ - суммарная стоимость сырья и материалов, руб.

ОФ – стоимость основных фондов, руб.

$n = 365$, число дней в году,

$$ИЗ = 4693 + \frac{3956}{365} \times 14 = 4844,73 \text{ тыс.руб.}$$

Тогда срок окупаемости проекта будет:

$$T_{ок} = \frac{ИЗ}{ЧП} = \frac{4844,73}{4612,08} = 1,05 \text{ года}$$

где, ЧП – чистая прибыль, руб.

Но реальный срок окупаемости будет больше, т.к. в расчете не учитывается что денежные вложения, которые выплачиваются «сегодня», имеют другую реальную стоимость».

Таблица 4.21 – 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

6.4. Оценка экономической эффективности применения разработанного материала

Для выявления экономического эффекта необходимо сравнить по основным экономическим показателям 1 м² стеновых панелей, покрытых рентгенозащитным лакокрасочным материалом с материалами, которые в настоящее время применяются для аналогичных целей.

Таблица 6.22 – Экономические показатели конкурирующих материалов

Наименование показателя	Просвинцованная резина	Материал «Плитотрен»	Баритовая штукатурка «Кнауф»	Панель Протекс ПРЗ 12	Панель, покрытая РЗ ЛКК
Цена м ² , руб.	12000	7000	2150	5540	2200
Срок лужбы, лет	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

6.5. Выводы по главе

1. По результатам исследований изготовлена опытно-промышленная партия рентгенозащитных панелей в условиях ООО «Атом-Технология» г. Берёзовский Свердловской области, что подтверждает возможность нанесения разработанной РЗ ЛКК на древесную подложку в условиях промышленного производства (акт опытно-промышленной апробации результатов исследований приведен в приложении 27).

2. 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.

3. Сравнительный анализ показал, что разработанная РЗ ЛКК по своим технико-эксплуатационным характеристикам является конкурентоспособным материалом в ценовом сегменте материалов-конкурентов. Ввиду низкой стоимости и продолжительного срока эксплуатации, применение стеновых панелей, покрытых рентгенозащитным лакокрасочным материалом, является экономически эффективным и данный вид продукции можно рекомендовать для использования в отделке помещений с повышенным радиационным фоном (воздействием), элементах мебели, защитных экранах, ширмах, жалюзи и пр.

ОБЩИЕ 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 подложки, 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 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 и анодного напряжения 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 минерального наполнителя, количество вододисперсионной акриловой краски и количество дистиллированной воды.

6. Оптимальный состав (с максимальными рентгенозащитными свойствами) разработанной РЗ ЛКК (содержание сульфата бария - 65 %, вододисперсионной акриловой краски - 19 %, дистиллированной воды - 16 %) имеет следующие характеристики: расход - 1135 г/м²; сухой остаток – 72%; степень перетира 0,002 мкм (т.е. 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 Рb, при 75 Вт - 0,074 мм Рb, при 100 кВ - 0,1305 мм Рb; 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 %, вододисперсионной акриловой краски 15 %, дистиллированной воды - 23 %. Ожидаемые значения выходных параметров представлены в таблицах 4.7 и 4.8.

8. В соответствии с ГОСТ 54208 – 2010 «Покрытия защитно-декоративные на мебели из древесины и древесных материалов. Классификация

и обозначение» обозначается: покрытие рентгенозащитное на основе ВДАК – П. 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-рачельный 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-конкурентов. Ввиду низкой стоимости и продолжительного срока эксплуатации, применение стеновых панелей, покрытых рентгенозащитным лакокрасочным материалом, является экономически эффективным и данный вид продукции можно рекомендовать для использования в отделке помещений с повышенным радиационным фоном (воздействием), 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 результате 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».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аглинцев, К. К. Дозиметрия ионизирующего излучения / К. К. Аглинцев. – М. : Техническая литература, 1957. – 503 с.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Марков, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
3. Азаров В. И. Технология связующих и полимерных материалов : учебное пособие / В. И. Азаров, В. Е. Цветков. – М. : Лесная промышленность, 1985. – 216 с.
4. Андреев В. Н. Математическое планирование экспериментов / В. Н. Андреев. – Л. : РИО ЛТА, 1982. – 40 с.
5. Андреев В. Н. Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе / В. Н. Андреев, Ю. Ю. Герасимов. Финляндия : Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. – 200 с.
6. Андреев В. Н., Гусейнов Э. М. Выбор и обоснование критериев и показателей эффективности при оптимальном проектировании лесных машин // Машины и оборудование для механизации лесозаготовок и лесного хозяйства / Межвузовский сб. научн. трудов. Л. : РИО ЛТА, 1981. – Вып. 10. – С. 12 – 15.
7. Андреев В. Н., Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе / В. Н. Андреев, Ю. Ю. Герасимов. – Финляндия: Изд-во университета Йоэнсуу, 1999. – 200 с.
8. Анненков В. Ф. Древесно-полимерные материалы и технология их получения / В. Ф. Анненков. – М. : Лесн. промышленность, 1974. – 83 с.
9. Барит – болонский камень. Режим доступа: <https://lutch.ru> (дата обращения 10.01.2024).
10. Баритовая рентгенозащитная штукатурка: технология нанесения. Режим доступа: <https://planken.guru> (дата обращения 25.12.2023).
11. Басин В. Е. Адгезионная прочность / В. Е. Басин. – М. : Химия, 1981. – 208 с.

12. Батунер Л. М. Математические методы в химической технике / Батунер Л. М., Позин М. Е. – М.: Химия, 1968. – 824 с.
13. Берлин А. А. Основы адгезии полимеров / А. А. Берлин, В. Е. Басин – М., «Химия», 1969. – 320 с.
14. Берсенева А. П., Фокина А. Г. Опыт использования радиоактивных изотопов для исследования древесины // Деревообрабатывающая промышленность, № 8, 1958. – С.11 – 13.
15. Бовей Ф. Действие ионизирующих излучений на природные и синтетические полимеры / Ф. Бовей, под ред. Ю. С. Лазуркина. – М. : Издательство, 1959. – 296 с.
16. Васильев В. В. Композиционные материалы / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др.; под общей ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
17. Ветошкин Ю. И. Композиционные материалы на основе древесины и их эксплуатационные свойства: монография / Ю. И. Ветошкин, И. В. Коцюба, И. В. Яцун – Екатеринбург: УГЛТУ, 2014. Ч.1. – 119 с.
18. Ветошкин Ю. И. Конструкции и эксплуатационно-технологические особенности композиционных рентгенозащитных материалов на основе древесины / Ю. И. Ветошкин, И. В. Яцун, О. Н. Чернышев – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т., 2009. – 148 с.
19. Ветошкин Ю. И. Эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе древесины : монография // Ю. И. Ветошкин, И. В. Яцун, И. В. Коцюба. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. – 100 с.
20. Ветошкин Ю.И. Совершенствование технологии создания рентгенозащитных лакокрасочных покрытий // Ю. И. Ветошкин, С. Б. Шишкина, И. В. Яцун / Деревообрабатывающая промышленность, № 5, 2007. – С. 23 – 25.
21. Вибеграль А. В., Защита от рентгеновских и гамма лучей / А. В. Вибеграль, У. Я. Маргулис, Е. И. Воробьев Е. И. – М. : Медгиз, 1955. – 302 с.

22. Газеев М. В. Формирование лакокрасочных покрытий на древесине с применением красящего состава на основе алкидных смол : дисс. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Газеев Максим Владимирович. – Екатеринбург, 2004. – 191 с.
23. Гармаш А. Н. Математические методы в управлении / А. Н. Гармаш, И. В. Орлова. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 272 с.
24. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующего излучения / Б. П. Голубев. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 336 с.
25. Гольдберг М. М., Лакокрасочные покрытия в машиностроении. Справочник. – М., Машиностроение, 1974. – 511 с.
26. ГОСТ 19007–73 Материалы лакокрасочные. Метод определения времени и степени высыхания. – ИПК Издательство стандартов, 2003. – 6 с.
27. ГОСТ 31939-2012 Материалы лакокрасочные. Определение массовой доли нелетучих веществ. – М., Стандартинформ, 2014. – 12 с.
28. ГОСТ 31973-2013 Материалы лакокрасочные. Метод определения степени перетира. – М., Стандартинформ, 2014. – 12 с.
29. ГОСТ 31974-2012 Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности покрытия при изгибе вокруг цилиндрического стержня. – М., Стандартинформ, 2014. – 14 с.
30. ГОСТ 31975-2017 Материалы лакокрасочные. Метод определения блеска лакокрасочных покрытий под углом 20°, 60° и 85°. – М., Стандартинформ, 2017. – 24 с.
31. ГОСТ 31992.1-2012 Материалы лакокрасочные. Метод определения плотности. – М., Стандартинформ, 2017. – 12 с.
32. ГОСТ 32299-2013 Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва. – М., Стандартинформ, 2014. – 15 с.
33. ГОСТ 33095-2014 Покрытия защитно-декоративные на мебели из древесины и древесных материалов. Классификация и обозначения. – М., Стандартинформ, 2019. – 16 с.

34. ГОСТ 33352-2015 Материалы лакокрасочные. Метод определения влагопоглощения. – М., Стандартинформ, 2015. – 12 с.
35. ГОСТ 4765-73 Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности при удар. – М., Издательство стандартов, 1993. – 7 с.
36. ГОСТ 5233-2021 Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытия по маятниковому прибору. – М., Российский институт стандартизации, 2022. – 23 с.
37. ГОСТ 8832-76 Материалы лакокрасочные. Методы получения лакокрасочного покрытия для испытания. – М., Стандартинформ, 2006. – 14 с.
38. ГОСТ 9.401-91 Единая система защиты от коррозии. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. – М., Стандартинформ, 2007. – 105 с.
39. ГОСТ Р 53651-2009 Материалы лакокрасочные. Метод определения теплового воздействия. – М., Стандартинформ, 2010. – 8 с.
40. Григорьев И.С. Справочник по физическим величинам / И. С. Григорьев, В. З. Михайлов. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
41. Гусев, Н. Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите / Н. Г. Гусев. – М. : Медгиз, 1956. – 784 с.
42. Действие ионизирующих излучений на неорганические и органические системы. Сборник статей по различным вопросам радиационной химии под ред. проф. С. Я. Пшежецкого, издательство АН СССР, Москва, 1958. – 416 с.
43. Дерягин Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин. – М. : Наука, 1973. – 280 с.
44. Джейкок М. Химия поверхности раздела фаз / М. Джейкок, Дж. Парфит. – М. : Мир, 1984. – 289 с.
45. Долацис Я. А. Радиационно-химическое модифицирование древесины / Я. А. Долацис. – Рига: Зинатне, 1985. – 218 с.

46. Дубровский В. Б. Радиационная стойкость строительных материалов / В. Б. Дубровский. – М. : издательство Стройиздат, 1977. – 277 с.
47. Жуков Е. В. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов / Е. В. Жуков, В. И. Онегин. – М. : Экология, 1993. – 301 с.
48. Иверонова В. И. Теория рассеяния рентгеновых лучей / В. И. Иверонова, Г. П. Ревкевич. – М. : Изд-во МГУ, 1978. – 277 с.
49. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. Санитарные правила и нормы СанПиН 2,6,1,802 – 99. – М. : ИнтерСЭН, 2000. – 72 с.
50. Карякина М. И. Испытания лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Карякина. – М. : Химия, 1988. – 271 с.
51. Карякина М. И. Лабораторный практикум по техническому анализу и контролю производств лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Карякина. – М. : Химия, 1989. – 208 с.
52. Кимель Л. Р. Защита от ионизирующих излучений. Справочник / Л. Р. Кимель, В. П. Машкович. – М.: Атомиздат, 1972. – 312 с.
53. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы / Э. Кинлок. Наука и технология. Пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 484 с.
54. Киреев В. А. Курс физической химии / В. А. Киреев. – М. : Госхимиздат, 1970. – 640 с.
55. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 791 с.
56. Князев В. К. Радиационная стойкость лакокрасочных покрытий / В. К. Князев. – М., Атомиздат, 1971. — 181 с.
57. Князев В. К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении / В. К. Князев. – М. : Машиностроение, 1977. – 183 с.

58. Корецкая Н. С. Высокомолекулярные соединения / Н. С. Корецкая, В. В. Лаврентьев и др. – М., 1966. – 1247 с.
59. Косолапов Г. Ф. Рентгенография / Г. Ф. Косолапов. – М.: Высшая школа, 1962. – 332 с.
60. Куликов В. А. Производство фанеры / В. А. Куликов. – М.: Лесная промышленность, 1973. – 208 с.
61. Ларичева-Бакаева В. П. Эпоксидные смолы и радиация / В. П. Ларичева-Бакаева. – М., НИИТЭХИМ, 1976, № 10.
62. Леонов В. В. Материаловедение и технология композиционных материалов / В. В. Леонов, О. А. Артемьева, Е. Д. Кравцова. – Красноярск : Сибирский Федеральный ун-т, 2007. – 241 с.
63. Липатов Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю. С. Липатов. – М. : Химия, 1991. – 260 с.
64. Локатош Б. К. Дефектоскопия древесины / Б. К. Локатош. – М. : Лесная промышленность, 1966. – 184 с.
65. Локатош Б. К. О применении радиоактивных изотопов в деревообработке // Б. К. Локатош / Журн. Деревообрабатывающая промышленность, № 5, 1957 – С. 9 – 10.
66. Мильман И. И. Физические поля в неразрушающем контроле: Лабораторный практикум / И. И. Мильман. – Свердловск : УПИ, 1990. – 126 с.
67. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / Л. И. Миркин. – М. : Изд-во физико-математической литературы, 1961. – 864 с.
68. Мищенко Г. Л., Опыт использования полиэфирных лаков / Г. Л. Мищенко, Н. А. Моисеева. – М., 1963. – 36 с.
69. Мэттьюз Ф. Композиционные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. – М., Техносфера, 2004. – 408 с.
70. Мялицин Ал. В. Композиционные материалы на основе древесных частиц с защитными свойствами от рентгеновского излучения : дисс. ... канд.

техн. наук : 05.21.05 / Мялицин Алексей Владимирович. – Екатеринбург, 2012. – 150 с.

71. Оболенская А. В. Химия древесины и полимеров / А. В. Оболенская, В. П. Щеголев. – М. : Лесная промышленность, 1980. – 168 с.

72. Одинцева С. А. Повышение эффективности производства рентгенозащитного слоистого материала на основе древесины : дисс. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Одинцева Светлана Александровна. – Екатеринбург, 2018. – 163 с.

73. Онегин В. И. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов / Ю. И. Цой, В. А. Соколова. – С. - Петербург, издательство СПбГЛТУ, 2012. – 71 с.

74. Орлова Ю. Д. Отделка изделий из древесины / Ю. Д. Орлова. – М. : Высшая школа, 1968. – 276 с.

75. Патякин В. И. Анализ взаимодействия древесины и нейтронных потоков малых и средних энергий // В. И. Патякин, Л. Р. Бирман, Ю. Д. Силуков / Технология лесопромышленного производства и транспорта. – Екатеринбург : УГЛТА, 2000. – С. 217-221.

76. Пен Р. З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства / Р. З. Пен. – Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1982. – 190 с.

77. Пижурин А. А. Исследование процессов деревообработки / А. А. Пижурин, М. С. Розенблит. – М. : Лесная промышленность, 1984. – 232 с.

78. Пижурин А. А. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки / А. А. Пижурин, М. С. Розенблит. – М. : Лесная промышленность, 1988. – 296 с.

79. Пижурин А. А. Современные методы исследования технологических процессов в деревообработке / А. А. Пижурин. – М. : Лесная промышленность, 1972. – 248 с.

80. Пяткин В. И., Анализ взаимодействия древесины и нейтронный потоков малых и средних энергий // Бирман А. Р., Белоногова Н. А. /

Технология лесопромышленного производства и транспорта, 2000. – С. 217 – 220.

81. Резина рентгенозащитная (просвинцованная). Режим доступа: <http://mobilefences.ru> (дата обращения 10.11.2023).

82. Рейтлингер С. А. Проницаемость полимерных материалов / С. А. Рейтлингер. – М. : Химия, 1974. – 272 с.

83. Рентгенозащитная панель Протекс ПРЗ 12. Режим доступа: <https://xrservice.ru/product/rentgenozashchitnye-material/rentgenzashchitnye-paneli/rentgenozashchitnaya-panel-proteks-prz-12/> (дата обращения 15.02.2024).

84. Рентгенозащитная шпатлевка Сейфборд Шпахтель. Режим доступа: <https://megapolis-ekb.ru/article/rentgenozaschitnaya-shpatlevka> (дата обращения 10.02.2024).

85. Рентгенозащитное свинцовое стекло. Режим доступа: <http://96ur.com> (дата обращения 10.03.2024).

86. Рузинов Л. П. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчакова. – М. : Химия, 1980. – 280 с.

87. Рузинов Л. П. Статистические методы оптимизации химических производств / Л. П. Рузинов. – М. : Химия, 1972. – 200 с.

88. Рыбин Б. М. Определение физических показателей полимеров для деревообработки по аддитивным функциональным группам вкладов в химическую структуру звеньев // Б. М. Рыбин / Лесной Вестник, т. 22, № 2 2018. – с. 68 – 75.

89. Рыбин Б. М. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов / Б. М. Рыбин. – М., издательство МГУЛ, 2003. – 562 с.

90. Рыбин Б. М. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. Монография / Б. М. Рыбин. – М., издательство МГУЛ, 2021. – 567 с.

91. Свинец листовой. Режим доступа: <http://www.medrk.ru> (дата обращения 15.02.2024).

92. Своллоу А. Радиационная химия органических соединений / А. Своллоу. – М. : Химия, 1968. – 368 с.
93. Сивухин Д. В. Атомная и ядерная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1989. – 416 с.
94. Скорняков Н. Н. Ослабление рентгеновских лучей пластиками из цельной древесины // Н. Н. Скорняков / Технология древесных плит и пластиков, вып. 5, 1978 – С. 23 – 27.
95. Смирнов А. В. Клееная фанера / А. В. Смирнов. – М.: Гослесбумиздат, 1959. – 100 с.
96. Соболев Б. В. Методы оптимизации: практикум / Б. В. Соболев, Б. Ч. Месхи, Г. И. Каньгин. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 380 с.
97. Строительная композиция для защиты от ионизирующего излучения. Режим доступа: <https://www.freepatent.ru/patents/2375771> (дата обращения 05.02.2024).
98. Тихомиров В. Б. Полимерные покрытия в атомной технике / В. Б. Тихомиров. – М.: Атомиздат, 1965. – 276 с.
99. Цементно-баритовая рентгенозащитная штукатурка. Режим доступа: <https://zamesbetona.ru/podgotovka/tsementno-baritovaya-rentgenozashhitnaya-shtukaturka.html> (дата обращения 01.02.2024).
100. Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры / А. Чарлзби. – М., Издательство, 1962. – 469 с.
101. Что такое баритовая штукатурка (рентгенозащитная): технология нанесения и расход на 1 м². Режим доступа: <https://1beton.info/shtukaturka/baritovaya-shtukaturka-rentgenozashhitnaya-tehnologiya-naneseniya-i-rashod-na-1-m2> (дата обращения 10.01.2024).
102. Что такое баритовый бетон: сфера применения, особенности. Режим доступа: <https://masterabetona.ru> (дата обращения 02.03.2024).
103. 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. Ч. 1. – Екатеринбург, УГЛТУ, 2009. – С. 167 – 169.

104. Шишкина С. Б. Влияние конвективной сушки на эксплуатационные характеристики рентгенозащитного покрытия // С. Б. Шишкина, М. В. Газеев / 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.

105. Шишкина С. Б. Исследование времени «физического» высыхания рентгенозащитного лакокрасочного покрытия на древесной подложке // С. Б. Шишкина, И. В. Яцун / Деревообрабатывающая промышленность, № 1, 2024. – С. 15 – 23.

106. Шишкина С. Б. Исследования стойкости рентгенозащитного лакокрасочного покрытия к воздействию ультрафиолетового излучения // С. Б. Шишкина, И. В. Яцун / Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. – Екатеринбург, УГЛТУ, 2024. – С. 526 – 531.

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

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

109. 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. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, № 2 (175), 2015. – С. 174 – 179.

110. 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, 2018. – С. 254 – 259.

111. Шорникова Н. Ю. Фанера для рентгенодиагностических аппаратов / Н. Ю. Шорникова // Журн. Плиты и фанера, № 8, 1982. №8. – С. 16 – 21.

112. Щеткин Ю. И. Свойства древесины как поглотителя гамма (рентгеновского) излучения // Ю. И. Щеткин, Л. М. Исаева / Исследование свойств древесины и древесных материалов, 1969. – С. 7 – 9.

113. Яковлев А. Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. Учебник для вузов / А. Д. Яковлев. – Л., "Химия", 1981. – 384 с.

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

115. Яцун И. В. Методы и модели в управлении процессами деревообрабатывающих производств : учебное пособие / И. В. Яцун, С. Б. Шишкина. – Екатеринбург, УГЛТУ, 2023. – 171 с.

116. Яцун И. В. Основы управления качеством продукции лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств : учебно-методическое пособие / И. В. Яцун. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2017. – 60 с.

117. 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, Т. 4, № 3 (15), 2014. – С. 220 – 229.

118. Яцун И. В. Формирование древесных композиционных материалов с рентгенозащитными свойствами : диссертация доктора технических наук : 05.21.05 / Яцун Ирина Валерьевна. – Екатеринбург, 2020. – 313 с.

Приложение 1

Значения скорости высыхания РЗ ЛКП в зависимости от содержания в РЗ ЛКК летучих веществ при естественной сушке

Вариант состава	Обозначение величины	Значение в точке		
		В	С	Е
1	X	1,306805075	1,06185567	0,064
	w	0,560880757	0,560880757	0
2	X	1,289377289	1,049180328	0,064
	w	0,60036811	0,60036811	0
3	X	1,277904328	1,040816327	0,064
	w	0,693777061	0,693777061	0
4	X	1,056343821	0,876172608	0,064
	w	0,516249942	0,516249942	0
5	X	1,037905034	0,862197393	0,064
	w	0,547834059	0,547834059	0
6	X	1,024291498	0,851851852	0,064
	w	0,582579472	0,582579472	0
7	X	0,744591766	0,633986928	0,064
	w	0,297556202	0,297556202	0
8	X	0,728011059	0,620745543	0,064
	w	0,34293852	0,34293852	0
9	X	0,718213058	0,612903226	0,064
	w	0,455830044	0,455830044	0

Значения скорости высыхания РЗ ЛКП в зависимости от содержания в РЗ ЛКК летучих веществ при конвективной сушке

Вариант состава	Обозначение величины	Значение в точке		
		В	С	Е
1	X	0,718213058	0,612903226	0,064
	w	0,455830044	0,455830044	0
2	X	0,728011059	0,620745543	0,064
	w		0,34293852	0
3	X	0,744591766	0,633986928	0,064
	w	0,297556202	0,297556202	0
4	X	1,024291498	0,851851852	0,064
	w	0,582579472	0,582579472	0
5	X	1,037905034	0,862197393	0,064
	w	0,547834059	0,547834059	0
6	X	1,056343821	0,876172608	0,064
	w	0,516249942	0,516249942	0
7	X	1,277904328	1,040816327	0,064
	w	0,693777061	0,693777061	0
8	X	1,289377289	1,049180328	0,064
	w	0,60036811	0,60036811	0
9	X	1,306805075	1,06185567	0,064
	w	0,560880757	0,560880757	0

Приложение 2

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП (анодное напряжение 50 кВ, толщина 1 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры											S _t ²	y [^] ср	(y _{ср} -y _{ср.ср}) ²									
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложк	Цвет фона	Цвет образцов			Цвет свинца	Кратность ослабления образцов, раз			Кратн. ослабл.	y ₁				y ₂	y ₃	Св. экв. ммРб						
	m1	m2	m3	x ₁	x ₂	x ₃																							
1	250	90	70	1	1	1	185	181	202	195	196	254	1,32	1,17	1,19	74,00	0,0178	0,0158	0,0160	0,0165	0,000001	0,020450	0,00001522						
2	150	90	70	-1	1	1	185	181	222	228	225	254	2,12	2,59	2,33	74,00	0,0187	0,0150	0,0115	0,0151	0,000013	0,011915	0,00001000						
3	250	60	70	1	-1	1	175	170	214	212	209	254	1,95	1,86	1,74	85,00	0,0130	0,0119	0,0105	0,0118	0,000002	0,013760	0,00000397						
4	150	60	70	-1	-1	1	175	170	223	222	221	254	2,50	2,42	2,35	85,00	0,0194	0,0185	0,0177	0,0185	0,000001	0,016105	0,00000592						
5	250	90	50	1	1	-1	179	175	217	212	219	254	2,00	1,77	2,11	80,00	0,0150	0,0171	0,0164	0,0162	0,000001	0,027053	0,00011865						
6	150	90	50	-1	1	-1	179	175	231	228	234	254	3,17	2,81	3,62	80,00	0,0196	0,0152	0,0152	0,0167	0,000006	0,016417	0,00000006						
7	250	60	50	1	-1	-1	182	177	214	213	219	254	1,78	1,74	2,03	78,00	0,0128	0,0123	0,0160	0,0137	0,000004	0,011925	0,00000316						
8	150	60	50	-1	-1	-1	182	177	221	215	220	254	2,15	1,83	2,09	78,00	0,0175	0,0134	0,0167	0,0159	0,000005	0,012167	0,00001384						
9	250	75	60	1	0	0	178	173	212	211	208	254	1,79	1,75	1,64	82,00	0,0118	0,0113	0,0200	0,0144	0,000024	0,023268	0,00007889						
10	150	75	60	-1	0	0	178	173	233	232	233	254	3,50	3,35	3,50	82,00	0,0127	0,0258	0,0127	0,0171	0,000058	0,019122	0,00000424						
11	200	90	60	0	1	0	175	171	231	233	233	254	3,33	3,64	3,64	84,00	0,0197	0,0133	0,0133	0,0154	0,000014	0,008612	0,00004636						
12	200	60	60	0	-1	0	175	171	216	218	226	254	2,05	2,16	2,76	84,00	0,0144	0,0157	0,0128	0,0143	0,000002	0,003143	0,00012524						
13	200	75	70	0	0	1	180	174	237	237	238	254	4,17	4,17	4,41	81,00	0,0114	0,0114	0,0145	0,0124	0,000003	0,018401	0,00003543						
14	200	75	50	0	0	-1	180	174	232	233	236	254	3,26	3,41	3,95	81,00	0,0203	0,0121	0,0187	0,0170	0,000019	0,019734	0,00000733						
ИТОГО:																			0,0154	0,000151	0,23703	0,00046831							
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта																													
S ² [y]	0,000011																												
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений																													
S ² [ycp]	0,000004																												
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)																													
Коэффициенты регрессии	Дисперсия коэффициентов		S ² {bi } * t a(f1)																										
	b0	0,01496	S ² {b0}	0,000004	0,000009	0,000018	значим																						
	b1	0,00207	S ² {b1}	0,000001	0,000002	0,000005	значим																						
	b2	0,00273	S ² {b2}	0,000001	0,000002	0,000005	значим																						
	b3	-0,00067	S ² {b3}	0,000001	0,000002	0,000005	значим																						
	b11	0,00624	S ² {b11}	0,000004	0,000009	0,000018	значим																						
	b22	-0,00908	S ² {b22}	0,000004	0,000009	0,000018	значим																						
	b33	0,00411	S ² {b33}	0,000004	0,000009	0,000018	значим																						
	b12	0,00272	S ² {b12}	0,000001	0,000003	0,000006	значим																						
	b13	-0,00053	S ² {b13}	0,000001	0,000003	0,000006	значим																						
	b23	-0,00211	S ² {b23}	0,000001	0,000003	0,000006	значим																						
	Оценка дисперсии для проверки адекватности																												
	S ² ад.	0,000004																											
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)																													
F ад.	3,50 адекватн: 2,71																												
Оценка эффективности критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)																													
y ср.ср	0,0011																												
F эф.	0,9516 модель эффективна																												

Приложение 3

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП (анодное напряжение 50 кВ, толщина 2 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры										S _i ²	y [^] cp	(y _{cp} -y _{cp} .cp) ²				
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложки	Цвет фона	Цвет образцов			Цвет свинца 1,0 мм	Кратность ослабления образцов, раз			Кратн. ослабл. Pb 1,0 мм				y ₁	y ₂	y ₃	Св. экв. ммPb
	m1	m2	m3	x ₁	x ₂	x ₃																	
1	250	90	70	1	1	1	185	181	221	218	220	254	2,06	1,89	2,00	74,00	0,0163	0,0141	0,0155	0,0153	0,000001	0,055089	0,00158277
2	150	90	70	-1	1	1	185	181	242	241	241	254	5,38	5,00	5,00	74,00	0,0213	0,0161	0,0161	0,0178	0,000009	-0,003054	0,00043490
3	250	60	70	1	-1	1	175	170	212	215	215	254	1,86	2,00	2,00	85,00	0,0104	0,0120	0,0220	0,0148	0,000040	0,058346	0,00189489
4	150	60	70	-1	-1	1	175	170	224	225	229	254	2,58	2,67	3,08	85,00	0,0089	0,0099	0,0147	0,0111	0,000010	-0,030183	0,00170790
5	250	90	50	1	1	-1	179	175	230	227	227	254	3,04	2,71	2,71	80,00	0,0165	0,0124	0,0224	0,0171	0,000025	0,055026	0,00143695
6	150	90	50	-1	1	-1	179	175	236	236	231	254	4,00	4,00	3,17	80,00	0,0185	0,0185	0,0181	0,0184	0,000000	-0,001629	0,00039960
7	250	60	50	1	-1	-1	182	177	221	217	219	254	2,15	1,92	2,03	78,00	0,0160	0,0231	0,0145	0,0179	0,000021	0,059519	0,00173345
8	150	60	50	-1	-1	-1	182	177	235	230	229	254	3,65	2,92	2,81	78,00	0,0153	0,0159	0,0145	0,0152	0,000001	-0,027521	0,00182873
9	250	75	60	1	0	0	178	173	222	217	220	254	2,33	2,03	2,20	82,00	0,0170	0,0132	0,0153	0,0152	0,000004	0,059360	0,00195316
10	150	75	60	-1	0	0	178	173	240	241	241	254	5,13	5,50	5,50	82,00	0,0111	0,0156	0,0156	0,0141	0,000007	-0,013232	0,00074609
11	200	90	60	0	1	0	175	171	234	231	232	254	3,81	3,33	3,48	84,00	0,0139	0,0182	0,0199	0,0173	0,000010	0,013608	0,00001373
12	200	60	60	0	-1	0	175	171	229	234	233	254	3,08	3,81	3,64	84,00	0,0151	0,0139	0,0218	0,0169	0,000018	0,002290	0,00021414
13	200	75	70	0	0	1	180	174	232	229	231	254	3,26	2,88	3,13	81,00	0,0088	0,0141	0,0171	0,0133	0,000018	0,019964	0,00004419
14	200	75	50	0	0	-1	180	174	227	232	233	254	2,68	3,26	3,41	81,00	0,0116	0,0188	0,0206	0,0170	0,000023	0,021264	0,00001842
ИТОГО:																			0,0158	0,000185	0,28431	0,01400893	
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта																							
S ² {y}		0,000013																					
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений																							
S ² {y _{cp} }		0,000004																					
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)																							
Кoeffициенты регрессии	Дисперсия коэффициентов		S ² {b _i } * t _α (f1)																				
	b0	0,01546	S ² {b0}	0,000005	0,000011	0,000023	значим																
	b1	0,03630	S ² {b1}	0,000001	0,000003	0,000006	значим																
	b2	0,00566	S ² {b2}	0,000001	0,000003	0,000006	значим																
	b3	-0,00065	S ² {b3}	0,000001	0,000003	0,000006	значим																
	b11	0,00760	S ² {b11}	0,000005	0,000011	0,000023	значим																
	b22	-0,00751	S ² {b22}	0,000005	0,000011	0,000023	значим																
	b33	0,00515	S ² {b33}	0,000005	0,000011	0,000023	значим																
	b12	-0,00760	S ² {b12}	0,000002	0,000003	0,000007	значим																
	b13	0,00037	S ² {b13}	0,000002	0,000003	0,000007	значим																
b23	0,00031	S ² {b23}	0,000002	0,000003	0,000007	значим																	
Оценка дисперсии для проверки адекватности																							
S ² ад.		0,00005																					
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)																							
F ад.		3,50 адекватна 2,71																					
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)																							
y _{cp} .cp		0,0011																					
F эф.		23,2436 модель эффективна																					

Приложение 4

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП
(анодное напряжение 50 кВ, толщина 3 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры											S ²	y ^{ср}	(y ^{ср} -y ^{ср.ср}) ²													
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложки	Цвет фона	Цвет образцов			Цвет свинца 1,0 мм	Кратность ослабления образцов, раз			Кратн. ослабл. Рв 1,0 мм	y1				y2	y3	Св. экв, ммРв										
	m1	m2	m3	x1	x2	x3			1	2	3		1	2	3																		
1	250	90	70	1	1	1	182	177	219	223	226	254	2,03	2,28	2,52	78,00	0,0160	0,0192	0,0123	0,0158	0,000012	0,016182	0,00000012										
2	150	90	70	-1	1	1	182	177	234	232	232	254	3,48	3,17	3,17	78,00	0,0146	0,0107	0,0107	0,0120	0,000005	0,009645	0,00000547										
3	250	60	70	1	-1	1	179	175	237	236	235	254	4,22	4,00	3,80	80,00	0,0128	0,0100	0,0175	0,0134	0,000014	0,019246	0,00003387										
4	150	60	70	-1	-1	1	179	175	232	225	225	254	3,30	2,53	2,53	80,00	0,0113	0,0117	0,0117	0,0115	0,000000	0,009501	0,00000418										
5	250	90	50	1	1	-1	175	170	243	239	240	254	6,67	5,00	5,33	85,00	0,0184	0,0188	0,0127	0,0167	0,000012	0,018692	0,00000410										
6	150	90	50	-1	1	-1	175	170	227	231	228	254	2,86	3,33	2,96	85,00	0,0136	0,0192	0,0149	0,0159	0,000009	0,010056	0,00003410										
7	250	60	50	1	-1	-1	185	181	246	243	241	254	7,78	5,83	5,00	74,00	0,0251	0,0288	0,0276	0,0272	0,000004	0,029485	0,00000537										
8	150	60	50	-1	-1	-1	185	181	223	223	217	254	2,19	2,19	1,84	74,00	0,0196	0,0196	0,0149	0,0180	0,000007	0,017641	0,00000013										
9	250	75	60	1	0	0	178	173	235	234	231	254	3,85	3,67	3,21	82,00	0,0170	0,0187	0,0191	0,0183	0,000001	0,023857	0,00003128										
10	150	75	60	-1	0	0	178	173	246	243	243	254	8,56	6,42	6,42	82,00	0,0243	0,0183	0,0183	0,0203	0,000012	0,014667	0,00003151										
11	200	90	60	0	1	0	175	171	240	242	244	254	5,33	6,15	7,27	84,00	0,0235	0,0233	0,0266	0,0244	0,000003	0,018713	0,00003284										
12	200	60	60	0	-1	0	175	171	231	235	235	254	3,33	4,00	4,00	84,00	0,0197	0,0176	0,0176	0,0183	0,000001	0,024038	0,00003284										
13	200	75	70	0	0	1	180	174	235	237	239	254	3,75	4,17	4,69	81,00	0,0163	0,0214	0,0279	0,0219	0,000034	0,020049	0,00000331										
14	200	75	50	0	0	-1	180	174	240	238	238	254	5,00	4,41	4,41	81,00	0,0217	0,0245	0,0245	0,0236	0,000002	0,025374	0,00000331										
ИТОГО:																			0,0184	0,000117	0,28067	0,00022246											
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта																																	
S ² [y]																			0,000008														
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений																																	
S ² {y ^{ср} }																			0,000003														
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)																																	
коэффициент																			S ² {b _i } * t _α (f1)														
b0																			0,0235			0,000003			0,000007			0,000014			значим		
b1																			-0,0046			0,000001			0,000002			0,000004			значим		
b2																			-0,0027			0,000001			0,000002			0,000004			значим		
b3																			-0,0027			0,000001			0,000002			0,000004			значим		
b11																			-0,0043			0,000003			0,000007			0,000014			значим		
b22																			-0,0021			0,000003			0,000007			0,000014			значим		
b33																			-0,0008			0,000003			0,000007			0,000014			значим		
b12																			-0,0008			0,000001			0,000002			0,000004			значим		
b13																			-0,0005			0,000001			0,000002			0,000004			значим		
b23																			0,0019			0,000001			0,000002			0,000004			значим		
Оценка дисперсии для проверки адекватности																																	
S ² ад.																			0,00003														
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)																																	
F ад.																			3,50			адекватн.			2,71								
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, β3=13 и f2=4 равен 3,18)																																	
y ^{ср.ср}																			0,0013														
F эф.																			0,5833			модель эффективна											

Приложение 5

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП (анодное напряжение 75 кВ, толщина 1 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры													S ²	y ^{ср}	(y ^{ср} -y ^{ср.ср}) ²	
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложки	Цвет фона	Цвет образцов			Цвет свинца 1,0 мм	Кратность ослабления образцов, раз			Кратн. ослабл. Pb 1,0 мм	y ₁	y ₂	y ₃				Св. экв. ммPb
	m1	m2	m3	x 1	x 2	x 3			117	103	114		219	1,57	1,43								
1	250	90	70	1	1	1	38	33	117	103	114	219	1,57	1,43	1,54	61,67	0,0155	0,0132	0,0150	0,0145	0,000002	0,023540	0,00008107
2	150	90	70	-1	1	1	38	33	97	112	103	219	1,37	1,52	1,43	61,67	0,0123	0,0146	0,0132	0,0133	0,000001	0,027752	0,00020762
3	250	60	70	1	-1	1	52	47	159	146	164	221	2,11	1,86	2,23	61,18	0,0246	0,0204	0,0265	0,0238	0,000009	0,030050	0,00003876
4	150	60	70	-1	-1	1	52	47	116	108	125	221	1,46	1,38	1,56	61,18	0,0139	0,0126	0,0155	0,0140	0,000002	0,027286	0,00017677
5	250	90	50	1	1	-1	41	34	134	126	130	218	1,77	1,66	1,71	59,73	0,0196	0,0178	0,0287	0,0220	0,000034	0,031420	0,00008844
6	150	90	50	-1	1	-1	41	34	105	103	98	218	1,43	1,41	1,36	59,73	0,0239	0,0236	0,0128	0,0201	0,000040	0,033647	0,00018373
7	250	60	50	1	-1	-1	61	57	144	150	145	225	1,75	1,85	1,76	66,00	0,0165	0,0180	0,0167	0,0171	0,000001	0,028957	0,00014140
8	150	60	50	-1	-1	-1	61	57	87	82	78	225	1,15	1,12	1,10	66,00	0,0175	0,0170	0,0166	0,0170	0,000000	0,024207	0,00005150
9	250	75	60	1	0	0	39	34	98	99	92	219	1,38	1,38	1,33	61,39	0,0124	0,0126	0,0116	0,0122	0,000000	0,032309	0,00040502
10	150	75	60	-1	0	0	39	34	154	157	160	219	2,14	2,20	2,27	61,39	0,0248	0,0259	0,0270	0,0259	0,000001	0,032041	0,00003739
11	200	90	60	0	1	0	31	27	143	149	150	213	2,00	2,11	2,13	54,29	0,0268	0,0289	0,0293	0,0284	0,000002	0,018164	0,00010387
12	200	60	60	0	-1	0	31	27	102	112	124	213	1,46	1,57	1,71	54,29	0,0170	0,0189	0,0215	0,0191	0,000005	0,016700	0,00000580
13	200	75	70	0	0	1	31	27	138	161	161	213	1,91	2,38	2,38	54,29	0,0253	0,0239	0,0239	0,0244	0,000001	0,022500	0,00000344
14	200	75	50	0	0	-1	31	27	142	143	159	213	1,98	2,00	2,33	54,29	0,0165	0,0168	0,0130	0,0154	0,000005	0,024901	0,00008938
ИТОГО:																			0,0191	0,000103	0,39595	0,00161418	
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта																							
S ² {y}	0,000007																						
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений																							
S ² {y ^{ср} }	0,000002																						
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)																							
коэффициент	S ² {b _i }		S ² {b _i } * t _α (f1)																				
b ₀	0,0225	S ² {b ₀ }	0,000003	0,000006	0,000013	значим																	
b ₁	0,0001	S ² {b ₁ }	0,000001	0,000002	0,000003	значим																	
b ₂	0,0007	S ² {b ₂ }	0,000001	0,000002	0,000003	значим																	
b ₃	-0,0012	S ² {b ₃ }	0,000001	0,000002	0,000003	значим																	
b ₁₁	0,0097	S ² {b ₁₁ }	0,000003	0,000006	0,000013	значим																	
b ₂₂	-0,0050	S ² {b ₂₂ }	0,000003	0,000006	0,000013	значим																	
b ₃₃	0,0012	S ² {b ₃₃ }	0,000003	0,000006	0,000013	значим																	
b ₁₂	-0,0017	S ² {b ₁₂ }	0,000001	0,000002	0,000004	значим																	
b ₁₃	-0,0005	S ² {b ₁₃ }	0,000001	0,000002	0,000004	значим																	
b ₂₃	-0,0022	S ² {b ₂₃ }	0,000001	0,000002	0,000004	значим																	
Оценка дисперсии для проверки адекватности																							
S ² ад.	0,00003																						
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)																							
F ад.	3,50	адекватн. 2,71																					
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)																							
y ^{ср.ср}	0,0014																						
F эф.	4,8353	модель эффективна																					

Приложение 6

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП (анодное напряжение 75 кВ, толщина 2 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры											Св. экв. ммPb	S ²	y ^{ср}		
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложки	Цвет фона	Цвет образцов			Цвет свинца 1,0 мм	Кратность ослабления образцов, раз			Кратн. ослабл. Pb 1,0 мм	y1				y2	y3
	m1	m2	m3	x1	x2	x3			1	2	3		1	2	3							
1	250	90	70	1	1	1	38	33	159	143	144	219	2,26	1,94	1,95	61,67	0,0367	0,0314	0,0317	0,0333	0,000009	0,033115
2	150	90	70	-1	1	1	38	33	112	104	109	219	1,52	1,44	1,49	61,67	0,0246	0,0233	0,0241	0,0240	0,000000	0,036827
3	250	60	70	1	-1	1	52	47	176	172	160	221	2,57	2,45	2,14	61,18	0,0420	0,0400	0,0349	0,0390	0,000013	0,046945
4	150	60	70	-1	-1	1	52	47	156	143	144	221	2,05	1,81	1,83	61,18	0,0335	0,0296	0,0299	0,0310	0,000005	0,040365
5	250	90	50	1	1	-1	41	34	133	138	150	218	1,75	1,83	2,04	59,73	0,0294	0,0306	0,0341	0,0314	0,000006	0,052898
6	150	90	50	-1	1	-1	41	34	105	112	110	218	1,43	1,50	1,48	59,73	0,0239	0,0251	0,0247	0,0245	0,000000	0,047455
7	250	60	50	1	-1	-1	61	57	198	200	196	225	3,40	3,53	3,29	66,00	0,0516	0,0534	0,0498	0,0516	0,000003	0,037308
8	150	60	50	-1	-1	-1	61	57	128	124	128	225	1,53	1,48	1,53	66,00	0,0231	0,0224	0,0231	0,0229	0,000000	0,021573
9	250	75	60	1	0	0	39	34	125	114	120	219	1,66	1,53	1,60	61,39	0,0271	0,0250	0,0261	0,0260	0,000001	0,042543
10	150	75	60	-1	0	0	39	34	184	179	185	219	3,04	2,84	3,09	61,39	0,0496	0,0463	0,0383	0,0447	0,000034	0,036532
11	200	90	60	0	1	0	31	27	151	143	147	213	2,15	2,00	2,07	54,29	0,0397	0,0368	0,0382	0,0382	0,000002	0,036660
12	200	60	60	0	-1	0	31	27	135	147	148	213	1,87	2,07	2,09	54,29	0,0344	0,0382	0,0386	0,0371	0,000005	0,030634
13	200	75	70	0	0	1	31	27	136	136	139	213	1,88	1,88	1,93	54,29	0,0347	0,0347	0,0356	0,0350	0,000000	0,041549
14	200	75	50	0	0	-1	31	27	123	136	143	213	1,70	1,88	2,00	54,29	0,0313	0,0347	0,0368	0,0343	0,000008	0,042044
ИТОГО:																	0,0338	0,000087	0,58416			
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта																						
S ² {y}		0,000006																				
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений																						
S ² {ycp}		0,000002																				
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)																						
центы		коэффициенты S ² {bi}*t a(f1)																				
b0	0,03771	S ² {b0}	0,000003	0,000005	0,000011	значим																
b1	0,00301	S ² {b1}	0,000001	0,000001	0,000003	значим																
b2	0,00301	S ² {b2}	0,000001	0,000001	0,000003	значим																
b3	-0,00025	S ² {b3}	0,000001	0,000001	0,000003	значим																
b11	0,00183	S ² {b11}	0,000003	0,000005	0,000011	значим																
b22	-0,00406	S ² {b22}	0,000003	0,000005	0,000011	значим																
b33	0,00409	S ² {b33}	0,000003	0,000005	0,000011	значим																
b12	-0,00257	S ² {b12}	0,000001	0,000002	0,000003	значим																
b13	-0,00229	S ² {b13}	0,000001	0,000002	0,000003	значим																
b23	-0,00736	S ² {b23}	0,000001	0,000002	0,000003	значим																
Оценка дисперсии для проверки адекватности																						
S ² ад.		0,00002																				
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)																						
F ад.		3,50	адекватн. 2,71																			
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)																						
ycp.ср		0,0024																				
F эф.		7,0279	модель эффективна																			

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП
(анодное напряжение 75 кВ, толщина 3 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры													S _i ²	y ^{ср}	(y ^{ср} -y ^{ср} ср) ²	
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложки	Цвет фона	Цвет образцов			Цвет свинца 1,0 мм	Кратность ослабления образцов, раз			Кратн. ослабл. Рb 1,0 мм	y ₁	y ₂	y ₃				Св. экв. ммРb
	m1	m2	m3	x1	x2	x3			1	2	3		1	2	3								
1	250	90	70	1	1	1	38	33	161	174	181	219	2,31	2,68	2,93	61,67	0,0525	0,0585	0,0626	0,0578	0,000026	0,074184	0,00026712
2	150	90	70	-1	1	1	38	33	156	149	147	219	2,19	2,05	2,01	61,67	0,0506	0,0482	0,0476	0,0488	0,000002	0,076807	0,00078411
3	250	60	70	1	-1	1	52	47	177	165	162	221	2,60	2,26	2,18	61,18	0,0576	0,0519	0,0507	0,0534	0,000013	0,070122	0,00027983
4	150	60	70	-1	-1	1	52	47	153	140	133	221	1,99	1,77	1,66	61,18	0,0476	0,0439	0,0422	0,0446	0,000007	0,066742	0,00049212
5	250	90	50	1	1	-1	41	34	195	179	184	218	3,57	2,82	3,01	59,73	0,0747	0,0622	0,0655	0,0675	0,000042	0,086687	0,00036931
6	150	90	50	-1	1	-1	41	34	144	154	142	218	1,93	2,12	1,89	59,73	0,0473	0,0505	0,0467	0,0482	0,000004	0,072855	0,00060876
7	250	60	50	1	-1	-1	61	57	205	200	197	225	3,88	3,53	3,34	66,00	0,0738	0,0685	0,0657	0,0693	0,000017	0,082721	0,00017922
8	150	60	50	-1	-1	-1	61	57	122	132	124	225	1,46	1,58	1,48	66,00	0,0371	0,0389	0,0375	0,0378	0,000001	0,062888	0,00062727
9	250	75	60	1	0	0	39	34	165	162	154	219	2,40	2,32	2,14	61,39	0,0541	0,0529	0,0499	0,0523	0,000005	0,074039	0,00047323
10	150	75	60	-1	0	0	39	34	207	197	197	219	4,50	3,72	3,72	61,39	0,0883	0,0757	0,0757	0,0799	0,000053	0,065434	0,00020949
11	200	90	60	0	1	0	31	27	175	181	192	213	2,80	3,03	3,56	54,29	0,0666	0,0708	0,0805	0,0726	0,000051	0,067347	0,00002805
12	200	60	60	0	-1	0	31	27	142	152	158	213	1,98	2,17	2,31	54,29	0,0515	0,0551	0,0576	0,0547	0,000009	0,060331	0,00003131
13	200	75	70	0	0	1	31	27	147	158	168	213	2,07	2,31	2,57	54,29	0,0532	0,0576	0,0625	0,0578	0,000021	0,074195	0,00027029
14	200	75	50	0	0	-1	31	27	171	162	163	213	2,67	2,41	2,43	54,29	0,0642	0,0594	0,0599	0,0611	0,000007	0,078519	0,00030188
																			ИТОГО:	0,0576	0,000260	1,08077	0,00492199

Оценка дисперии воспроизводимости единичного опыта

S²{y} 0,000019

Оценка дисперии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений

S²{ycp} 0,000006

Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии

(критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)

коэффициент	S ² {bi}	S ² {bi}*tα(f1)	значим		
b0	0,06790	0,000008	0,000015	0,000032	значим
b1	0,00430	0,000002	0,000004	0,000008	значим
b2	0,00351	0,000002	0,000004	0,000008	значим
b3	-0,00216	0,000002	0,000004	0,000008	значим
b11	0,00183	0,000008	0,000015	0,000032	значим
b22	-0,00406	0,000008	0,000015	0,000032	значим
b33	0,00845	0,000008	0,000015	0,000032	значим
b12	-0,00150	0,000002	0,000005	0,000010	значим
b13	-0,00411	0,000002	0,000005	0,000010	значим
b23	0,000024	0,000002	0,000005	0,000010	значим

Оценка дисперсии для проверки адекватности

S²2ад. 0,00007

Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)

F ад. 3,50 адекватн. 2,71

Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)

y^{ср}ср 0,0041

Fэф. 5,8243 модель эффективна

Приложение 8

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП
(анодное напряжение 100 кВ, толщина 1 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры														Si ²	y ^{ср}	(y ^{ср} -y ^{ср}) ²
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложки	Цвет фона	Цвет образцов			Цвет свинца 1,0 мм	Кратность ослабления образцов, раз	Кратн. ослабл. Р _б 1,0 мм	y ₁	y ₂	y ₃	Св. экв. ммР _б					
	m1	m2	m3	x1	x2	x3																	
1	250	90	70	1	1	1	85	80	143	133	141	214	1,52	1,39	1,49	42,68	0,0238	0,0209	0,0232	0,0227	0,000002	0,038533	0,00025220
2	150	90	70	-1	1	1	85	80	131	141	133	214	1,37	1,49	1,39	42,68	0,0204	0,0232	0,0209	0,0215	0,000002	0,040793	0,00037206
3	250	60	70	1	-1	1	79	74	159	152	166	212	1,83	1,71	1,98	42,09	0,0318	0,0289	0,0352	0,0320	0,000010	0,042539	0,00011150
4	150	60	70	-1	-1	1	79	74	129	125	132	212	1,40	1,35	1,43	42,09	0,0215	0,0204	0,0223	0,0214	0,000001	0,037653	0,00026470
5	250	90	50	1	1	-1	81	74	152	144	145	212	1,69	1,57	1,58	42,09	0,0284	0,0255	0,0258	0,0266	0,000003	0,046062	0,00037924
6	150	90	50	-1	1	-1	81	74	130	128	123	212	1,39	1,37	1,32	42,09	0,0213	0,0208	0,0196	0,0206	0,000001	0,045766	0,00063426
7	250	60	50	1	-1	-1	73	68	130	144	134	209	1,46	1,64	1,50	40,65	0,0241	0,0286	0,0253	0,0260	0,000005	0,042441	0,00027076
8	150	60	50	-1	-1	-1	73	68	91	88	86	209	1,11	1,09	1,08	40,65	0,0156	0,0151	0,0148	0,0151	0,000000	0,034999	0,00039454
9	250	75	60	1	0	0	78	73	125	124	118	211	1,36	1,35	1,29	41,36	0,0212	0,0209	0,0195	0,0205	0,000001	0,047532	0,00072848
10	150	75	60	-1	0	0	78	73	164	165	168	211	1,95	1,97	2,03	41,36	0,0353	0,0358	0,0375	0,0362	0,000001	0,044942	0,00007662
11	200	90	60	0	1	0	84	79	168	173	173	214	1,97	2,09	2,09	42,93	0,0341	0,0368	0,0368	0,0359	0,000003	0,032578	0,00001116
12	200	60	60	0	-1	0	84	79	143	146	157	214	1,53	1,57	1,74	42,93	0,0238	0,0248	0,0289	0,0259	0,000007	0,029198	0,00001116
13	200	75	70	0	0	1	79	74	165	174	182	212	1,96	2,17	2,41	42,09	0,0347	0,0399	0,0455	0,0401	0,000029	0,037357	0,00000728
14	200	75	50	0	0	-1	79	74	161	166	179	212	1,87	1,98	2,32	42,09	0,0328	0,0352	0,0433	0,0371	0,000030	0,039794	0,00000728
																			ИТОГО:	0,0272	0,000096	0,59749	0,00352125

Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта

S²{y} 0,000007

Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений

S²{ycp} 0,000002

Проверка статистической значимости

коэффициентов регрессии

(критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)

коэффициент	S ² {b _i }	0,000003	0,000006	0,000012	значим	
b0	0,03730	S ² {b0}	0,000003	0,000006	0,000012	значим
b1	0,00130	S ² {b1}	0,000001	0,000001	0,000003	значим
b2	0,00169	S ² {b2}	0,000001	0,000001	0,000003	значим
b3	-0,00122	S ² {b3}	0,000001	0,000001	0,000003	значим
b11	0,00894	S ² {b11}	0,000003	0,000006	0,000012	значим
b22	-0,00641	S ² {b22}	0,000003	0,000006	0,000012	значим
b33	0,00127	S ² {b33}	0,000003	0,000006	0,000012	значим
b12	-0,00179	S ² {b12}	0,000001	0,000002	0,000004	значим
b13	-0,00064	S ² {b13}	0,000001	0,000002	0,000004	значим
b23	-0,00191	S ² {b23}	0,000001	0,000002	0,000004	значим

Оценка дисперсии для проверки адекватности

S²ад. 0,00002

Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)

F_{ад.} 3,50 адекватн. 2,71

Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)

y^{ср} 0,0019

F_{эф.} 11,2670 модель эффективна

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП
(анодное напряжение 100 кВ, толщина 2 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры													S _i ²	y ^{ср}	(y _{ср} -y _{ср.ср}) ²	
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложки	Цвет фона	Цвет образцов				Цвет свинца 1,0 мм	Кратность ослабления образцов, раз	Кратн. ослабл. Pb 1,0 мм	y ₁	y ₂	y ₃	Св. экв. ммPb				
	m1	m2	m3	x1	x2	x3			1	2	3	4											5
1	250	90	70	1	1	1	85	80	173	164	158	214	2,07	1,87	1,75	42,68	0,0524	0,0476	0,0449	0,0483	0,000014	0,068307	0,00039964
2	150	90	70	-1	1	1	85	80	142	135	137	214	1,50	1,42	1,44	42,68	0,0391	0,0370	0,0376	0,0379	0,000001	0,071253	0,00111152
3	250	60	70	1	-1	1	79	74	175	171	161	212	2,20	2,10	1,87	42,09	0,0561	0,0536	0,0483	0,0527	0,000016	0,064580	0,00014136
4	150	60	70	-1	-1	1	79	74	161	153	150	212	1,87	1,73	1,68	42,09	0,0483	0,0448	0,0437	0,0456	0,000006	0,058885	0,00017609
5	250	90	50	1	1	-1	81	74	149	152	161	212	1,64	1,69	1,85	42,09	0,0428	0,0440	0,0478	0,0449	0,000007	0,073192	0,00080128
6	150	90	50	-1	1	-1	81	74	130	133	138	212	1,39	1,43	1,49	42,09	0,0369	0,0377	0,0392	0,0379	0,000001	0,067632	0,00088136
7	250	60	50	1	-1	-1	73	68	181	185	180	209	2,46	2,60	2,43	40,65	0,0644	0,0678	0,0635	0,0652	0,000005	0,073471	0,00006786
8	150	60	50	-1	-1	-1	73	68	124	121	123	209	1,39	1,36	1,38	40,65	0,0380	0,0373	0,0378	0,0377	0,000000	0,059270	0,00046596
9	250	75	60	1	0	0	78	73	139	133	136	211	1,53	1,45	1,49	41,36	0,0407	0,0389	0,0398	0,0398	0,000001	0,066714	0,00072303
10	150	75	60	-1	0	0	78	73	183	180	187	211	2,46	2,36	2,60	41,36	0,0633	0,0609	0,0668	0,0637	0,000009	0,061086	0,00000660
11	200	90	60	0	1	0	84	79	174	172	167	214	2,11	2,06	1,94	42,93	0,0530	0,0518	0,0491	0,0513	0,000004	0,053382	0,00000421
12	200	60	60	0	-1	0	84	79	164	173	165	214	1,88	2,09	1,90	42,93	0,0476	0,0524	0,0481	0,0494	0,000007	0,047337	0,00000421
13	200	75	70	0	0	1	79	74	159	155	161	212	1,83	1,76	1,87	42,09	0,0474	0,0457	0,0483	0,0471	0,000002	0,054496	0,00005422
14	200	75	50	0	0	-1	79	74	151	160	164	212	1,69	1,85	1,93	42,09	0,0441	0,0479	0,0498	0,0472	0,000009	0,057131	0,00009788
																			ИТОГО:	0,0478	0,000082	0,92824	0,00493521
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта																							
S ² {y}	0,000006																						
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений																							
S ² {ycp}	0,000002																						
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)																							
коэффициент	S ² {b _i } * t _α (f1)																						
b0	0,05150	S ² {b0}	0,000002	0,000005	0,000010	значим																	
b1	0,00281	S ² {b1}	0,000001	0,000001	0,000002	значим																	
b2	0,00302	S ² {b2}	0,000001	0,000001	0,000002	значим																	
b3	-0,00132	S ² {b3}	0,000001	0,000001	0,000002	значим																	
b11	0,01240	S ² {b11}	0,000002	0,000005	0,000010	значим																	
b22	-0,00114	S ² {b22}	0,000002	0,000005	0,000010	значим																	
b33	0,00431	S ² {b33}	0,000002	0,000005	0,000010	значим																	
b12	-0,00216	S ² {b12}	0,000001	0,000001	0,000003	значим																	
b13	-0,00213	S ² {b13}	0,000001	0,000001	0,000003	значим																	
b23	0,00100	S ² {b23}	0,000001	0,000001	0,000003	значим																	
Оценка дисперсии для проверки адекватности																							
S ² 2ад.	0,00002																						
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)																							
F ад.	3,50	адекватн. 2,71																					
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)																							
y ср.ср	0,0034																						
F эф.	18,6035	модель эффективна																					

План и результаты эксперимента по исследованию рентгенозащитных свойств РЗ ЛКП
(анодное напряжение 100 кВ, толщина 3 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры														Si ²	y ^{ср}	(y ^{ср} -y ^{ср.ср}) ²							
	Натуральные значения			Нормализованные значения			Цвет подложки	Цвет фона	Цвет образцов			Цвет свинца 1,0 мм	Кратность ослабления образцов, раз	Кратн. ослабл. Рb 1,0 мм	y1	y2	y3	Св. экв, ммРb												
	m1	m2	m3	x1	x2	x3																								
1	250	90	70	1	1	1	85	80	172	183	188	214	2,05	2,36	2,54	42,68	0,1117	0,1190	0,1231	0,1179	0,000034	0,112843	0,00002608							
2	150	90	70	-1	1	1	85	80	170	169	165	214	2,00	1,98	1,89	42,68	0,1106	0,1100	0,1080	0,1095	0,000002	0,117511	0,00006405							
3	250	60	70	1	-1	1	79	74	169	168	166	212	2,05	2,02	1,98	42,09	0,1123	0,1118	0,1107	0,1116	0,000001	0,107974	0,00001304							
4	150	60	70	-1	-1	1	79	74	159	148	143	212	1,83	1,64	1,57	42,09	0,1073	0,1028	0,1010	0,1037	0,000010	0,105071	0,00000191							
5	250	90	50	1	1	-1	81	74	194	183	186	212	2,85	2,42	2,52	42,09	0,1315	0,1211	0,1236	0,1254	0,000029	0,124013	0,00000191							
6	150	90	50	-1	1	-1	81	74	156	165	157	212	1,76	1,93	1,78	42,09	0,1055	0,1096	0,1059	0,1070	0,000005	0,110600	0,00001304							
7	250	60	50	1	-1	-1	73	68	199	184	179	209	3,25	2,56	2,39	40,65	0,1436	0,1268	0,1226	0,1310	0,000124	0,123000	0,00006405							
8	150	60	50	-1	-1	-1	73	68	117	127	116	209	1,32	1,42	1,31	40,65	0,0961	0,0987	0,0959	0,0969	0,000002	0,102016	0,00002608							
9	250	75	60	1	0	0	78	73	170	168	157	211	2,08	2,03	1,81	41,36	0,1140	0,1129	0,1074	0,1114	0,000013	0,129535	0,00032778							
10	150	75	60	-1	0	0	78	73	203	196	196	211	3,40	3,00	3,00	41,36	0,1460	0,1362	0,1362	0,1395	0,000032	0,121377	0,00032778							
11	200	90	60	0	1	0	84	79	189	193	200	214	2,59	2,76	3,11	42,93	0,1241	0,1280	0,1361	0,1294	0,000038	0,124253	0,00002627							
12	200	60	60	0	-1	0	84	79	168	173	178	214	1,97	2,09	2,22	42,93	0,1095	0,1123	0,1154	0,1124	0,000009	0,117526	0,00002627							
13	200	75	70	0	0	1	79	74	170	171	182	212	2,07	2,10	2,41	42,09	0,1129	0,1135	0,1210	0,1158	0,000020	0,115114	0,00000045							
14	200	75	50	0	0	-1	79	74	181	177	178	212	2,38	2,26	2,29	42,09	0,1202	0,1173	0,1180	0,1185	0,000002	0,119171	0,00000045							
																			ИТОГО:	0,1164	0,000322	1,75531	0,00091917							
Оценка дисперсия воспроизводимости единичного опыта																														
S ² {y}		0,000023																												
Оценка дисперсия воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений																														
S ² {уср}		0,000008																												
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)																														
центы		коэффициенте S ² {bi}*r a(f1)																												
b 0		0,12530		S ² {b 0}		0,000009		0,000019		0,000039		значим																		
b 1		0,00408		S ² {b 1}		0,000002		0,000005		0,000010		значим																		
b 2		0,00336		S ² {b 2}		0,000002		0,000005		0,000010		значим																		
b 3		-0,00203		S ² {b 3}		0,000002		0,000005		0,000010		значим																		
b 11		0,00015		S ² {b11}		0,000009		0,000019		0,000039		значим																		
b 22		-0,00442		S ² {b22}		0,000009		0,000019		0,000039		значим																		
b 33		-0,00816		S ² {b33}		0,000009		0,000019		0,000039		значим																		
b 12		-0,00189		S ² {b12}		0,000003		0,000006		0,000012		значим																		
b 13		-0,00452		S ² {b13}		0,000003		0,000006		0,000012		значим																		
b 23		0,00096		S ² {b23}		0,000003		0,000006		0,000012		значим																		
Оценка дисперсии для проверки адекватности																														
S ² ад.		0,00008																												
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)																														
F ад.		3,50		адекватн		2,71																								
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)																														
y ^{ср.ср}		0,0083																												
F эф.		0,8797		модель эффективна																										

**План и результаты эксперимента по исследованию времени высыхания
РЗ ЛКП при естественной сушке (толщина покрытия 1 мм)**

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры			у ср	S ² _i	y ^{ср}	(y ^{ср} -y ^{ср.ср}) ²
	Натуральные значения			Нормализованные значения			y1	y2	y3				
	m1	m2	m3	x1	x2	x3							
1	250	90	70	1	1	1	1110	1130	1130	1123,33	133,33	943,00	32520,11
2	150	90	70	-1	1	1	980	1020	990	996,67	433,33	774,00	49580,44
3	250	60	70	1	-1	1	1180	1160	1150	1163,33	233,33	956,67	42711,11
4	150	60	70	-1	-1	1	940	960	940	946,67	133,33	741,00	42298,78
5	250	90	50	1	1	-1	1130	1140	1440	1236,67	31033,33	1021,00	46512,11
6	150	90	50	-1	1	-1	960	940	950	950,00	100,00	875,33	5575,11
7	250	60	50	1	-1	-1	1040	1020	1010	1023,33	233,33	918,00	11095,11
8	150	60	50	-1	-1	-1	920	910	930	920,00	100,00	725,67	37765,44
9	250	75	60	1	0	0	1130	1130	1130	1130,00	0,00	1043,67	7453,44
10	150	75	60	-1	0	0	940	980	960	960,00	400,00	863,00	9409,00
11	200	90	60	0	1	0	1050	1040	1020	1036,67	233,33	981,33	3061,78
12	200	60	60	0	-1	0	950	950	950	950,00	0,00	913,33	1344,44
13	200	75	70	0	0	1	1010	1040	1050	1033,33	433,33	951,33	6724,00
14	200	75	50	0	0	-1	1000	970	960	976,67	433,33	982,67	36,00
ИТОГО:										14446,67	33900,00	12690,00	296086,89
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта													
S ² {y}	2421,43												
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений													
S ² {y ^{ср} }	807,14												
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)													
Коэффициенты		Дисперсия		S ² {b _i } * t _α (f1)									
b0	999,17	S ² {b0}	983,71	2016,60	значим								
b1	90,333	S ² {b1}	242,14	496,39	значим								
b2	34,000	S ² {b2}	242,14	496,39	значим								
b3	15,667	S ² {b3}	242,14	496,39	значим								
b11	-45,833	S ² {b11}	983,71	2016,60	значим								
b22	-51,833	S ² {b22}	983,71	2016,60	значим								
b33	-32,167	S ² {b33}	983,71	2016,60	значим								
b12	-11,667	S ² {b12}	302,68	620,49	значим								
b13	5,833	S ² {b13}	302,68	620,49	значим								
b23	-29,167	S ² {b23}	302,68	620,49	значим								
Оценка дисперсии для проверки адекватности													
S ² ад.	8475,00												
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)													
F ад.	3,50	адекватна	2,71										
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)													
y ^{ср.ср}	1031,90												
F эф.	2,687	модель эффективна											

План и результаты эксперимента по исследованию времени высыхания
РЗ ЛКП при естественной сушке (толщина покрытия 2 мм)

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры			y _{cp}	S _t ²	y [^] _{cp}	(y _{cp} -y _{cp,cp}) ²
	Натуральные значения			Нормализованные значения			y ₁	y ₂	y ₃				
	m ₁	m ₂	m ₃	x ₁	x ₂	x ₃							
1	250	90	70	1	1	1	1250	1270	1220	1246,67	633,33	960,00	82177,78
2	150	90	70	-1	1	1	1010	1050	1030	1030,00	400,00	894,00	18496,00
3	250	60	70	1	-1	1	1200	1230	1250	1226,67	633,33	1041,67	34225,00
4	150	60	70	-1	-1	1	1070	1030	1060	1053,33	433,33	845,67	43125,44
5	250	90	50	1	1	-1	1200	1230	1240	1223,33	433,33	1091,67	17336,11
6	150	90	50	-1	1	-1	960	940	950	950,00	100,00	995,67	2085,44
7	250	60	50	1	-1	-1	1040	1020	1010	1023,33	233,33	1080,00	3211,11
8	150	60	50	-1	-1	-1	980	960	960	966,67	133,33	854,00	12693,78
9	250	75	60	1	0	0	1140	1160	1130	1143,33	233,33	1149,67	40,11
10	150	75	60	-1	0	0	1160	1100	1140	1133,33	933,33	1003,67	16813,44
11	200	90	60	0	1	0	1060	1090	1060	1070,00	300,00	1080,00	100,00
12	200	60	60	0	-1	0	1150	1120	1030	1100,00	3900,00	1050,00	2500,00
13	200	75	70	0	0	1	1080	1080	1080	1080,00	0,00	1028,67	2635,11
14	200	75	50	0	0	-1	1100	1130	1140	1123,33	433,33	1098,67	608,44
ИТОГО:										15370,00	8800,00	14173,33	236047,78
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта													
S ² {y}	628,57												
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений													
S ² {y _{cp} }	209,52												
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)													
Коэффициенты		Дисперсия		S ² {b _i } * t _α (f1)									
b ₀	1117,50	S ² {b ₀ }	255,36	523,48	значим								
b ₁	73,000	S ² {b ₁ }	62,86	128,86	значим								
b ₂	15,000	S ² {b ₂ }	62,86	128,86	значим								
b ₃	35,000	S ² {b ₃ }	62,86	128,86	значим								
b ₁₁	-40,833	S ² {b ₁₁ }	255,36	523,48	значим								
b ₂₂	-52,500	S ² {b ₂₂ }	255,36	523,48	значим								
b ₃₃	-53,833	S ² {b ₃₃ }	255,36	523,48	значим								
b ₁₂	-32,500	S ² {b ₁₂ }	78,57	161,07	значим								
b ₁₃	-7,500	S ² {b ₁₃ }	78,57	161,07	значим								
b ₂₃	-23,333	S ² {b ₂₃ }	78,57	161,07	значим								
Оценка дисперсии для проверки адекватности													
S ² ад.	2200,00												
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)													
F ад.	3,50	адекватна	2,71										
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)													
y _{cp,cp}	1097,86												
F эф.	8,253	модель эффективна											

**План и результаты эксперимента по исследованию времени высыхания
РЗ ЛКП при естественной сушке (толщина покрытия 3 мм)**

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры			y _{ср}	S _i ²	y ^{ср}	(y _{ср} -y ^{ср}) ²
	Натуральные значения			Нормализованные значения			y ₁	y ₂	y ₃				
	m ₁	m ₂	m ₃	x ₁	x ₂	x ₃							
1	250	90	70	1	1	1	1540	1590	1560	1563,33	633,33	1219,25	118393,34
2	150	90	70	-1	1	1	1070	1020	1060	1050,00	700,00	977,58	5244,17
3	250	60	70	1	-1	1	1620	1570	1580	1590,00	700,00	1263,58	106547,84
4	150	60	70	-1	-1	1	1050	1070	1060	1060,00	100,00	943,58	13552,84
5	250	90	50	1	1	-1	1470	1440	1450	1453,33	233,33	1288,92	27032,84
6	150	90	50	-1	1	-1	1140	1160	1130	1143,33	233,33	1188,92	2077,84
7	250	60	50	1	-1	-1	1440	1420	1410	1423,33	233,33	1214,92	43437,51
8	150	60	50	-1	-1	-1	990	990	940	973,33	833,33	1036,58	4000,56
9	250	75	60	1	0	0	1580	1640	1610	1610,00	900,00	1391,67	47669,44
10	150	75	60	-1	0	0	1090	1050	1050	1063,33	533,33	1181,67	14002,78
11	200	90	60	0	1	0	1280	1260	1240	1260,00	400,00	1323,67	4053,44
12	200	60	60	0	-1	0	1130	1140	1190	1153,33	1033,33	1269,67	13533,44
13	200	75	70	0	0	1	1480	1520	1530	1510,00	700,00	1220,58	83762,01
14	200	75	50	0	0	-1	1370	1390	1360	1373,33	233,33	1301,92	5100,34
							ИТОГО:			18226,67	7466,67	16822,50	488408,40
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта													
S ² {y}	533,33												
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений													
S ² {y _{ср} }	177,78												
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)													
Коэффициенты регрессии		Дисперсия		S ² {b _i } * r _α (f ₁)									
b ₀	1351,46	S ² {b ₀ }	216,67	444,17	значим								
b ₁	105,000	S ² {b ₁ }	53,33	109,33	значим								
b ₂	27,000	S ² {b ₂ }	53,33	109,33	значим								
b ₃	40,667	S ² {b ₃ }	53,33	109,33	значим								
b ₁₁	-64,792	S ² {b ₁₁ }	216,67	444,17	значим								
b ₂₂	-54,792	S ² {b ₂₂ }	216,67	444,17	значим								
b ₃₃	-90,208	S ² {b ₃₃ }	216,67	444,17	значим								
b ₁₂	-19,583	S ² {b ₁₂ }	66,67	136,67	значим								
b ₁₃	35,417	S ² {b ₁₃ }	66,67	136,67	значим								
b ₂₃	-29,583	S ² {b ₂₃ }	66,67	136,67	значим								
Оценка дисперсии для проверки адекватности													
S ² ад.	1866,67												
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)													
F ад.	3,50	адекватна	2,71										
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)													
y _{ср.ср}	1301,90												
F эф.	20,127	модель эффективна											

**План и результаты эксперимента по исследованию времени высыхания
РЗ ЛПК при конвективной сушке (толщина покрытия 1 мм)**

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры			у ср	S _i ²	y ^{ср}	(y _{ср} -y _{ср.ср}) ²
	Натуральные значения			Нормализованные значения			y1	y2	y3				
	m1	m2	m3	x1	x2	x3							
1	250	90	70	1	1	1	250	220	210	226,67	433,33	286,47	3576,88
2	150	90	70	-1	1	1	180	180	190	183,33	33,33	141,47	1752,23
3	250	60	70	1	-1	1	200	220	220	213,33	133,33	270,14	3227,04
4	150	60	70	-1	-1	1	220	200	210	210,00	100,00	130,14	6377,57
5	250	90	50	1	1	-1	220	260	240	240,00	400,00	235,47	20,49
6	150	90	50	-1	1	-1	240	230	260	243,33	233,33	102,14	19935,46
7	250	60	50	1	-1	-1	260	280	300	280,00	400,00	237,47	1808,49
8	150	60	50	-1	-1	-1	240	260	260	253,33	133,33	109,14	20791,62
9	250	75	60	1	0	0	260	260	240	253,33	133,33	282,81	868,70
10	150	75	60	-1	0	0	250	240	230	240,00	100,00	146,14	8809,64
11	200	90	60	0	1	0	280	270	280	276,67	33,33	223,47	2829,50
12	200	60	60	0	-1	0	190	190	190	190,00	0,00	218,81	829,84
13	200	75	70	0	0	1	270	230	240	246,67	433,33	260,81	199,95
14	200	75	50	0	0	-1	260	240	230	243,33	233,33	224,81	343,23
ИТОГО:										3300,00	2800,00	2869,30	71370,62
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта													
S ² {y}	200,00000												
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений													
S ² {уср}	66,6667												
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)													
Коэффициенты		Дисперсия		S ² {bi} * t _α (f1)									
b0	244,682	S ² {b0}	81,25	166,5625	значим								
b1	68,333	S ² {b1}	20,00	41,0000	значим								
b2	2,333	S ² {b2}	20,00	41,0000	значим								
b3	-18,000	S ² {b3}	20,00	41,0000	значим								
b11	-30,208	S ² {b11}	81,25	166,5625	значим								
b22	-23,542	S ² {b22}	81,25	166,5625	значим								
b33	-1,875	S ² {b33}	81,25	166,5625	значим								
b12	1,250	S ² {b12}	25,00	51,2500	значим								
b13	2,917	S ² {b13}	25,00	51,2500	значим								
b23	4,583	S ² {b23}	25,00	51,2500	значим								
Оценка дисперсии для проверки адекватности													
S ² ад.	700,00												
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)													
F ад.	3,50	адекватна 2,71											
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)													
y _{ср.ср}	235,71												
F эф.	7,84	модель эффективна											

**План и результаты эксперимента по исследованию времени высыхания
РЗ ЛКП при конвективной сушке (толщина покрытия 2 мм)**

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры			у ср	S ²	y ^{ср}	(y ср-y ср.ср.) ²
	Натуральные значения			Нормализованные значения			y1	y2	y3				
	m1	m2	m3	x1	x2	x3							
1	250	90	70	1	1	1	260	300	280	280,00	400,00	382,79	10564,76
2	150	90	70	-1	1	1	250	210	230	230,00	400,00	236,79	46,04
3	250	60	70	1	-1	1	300	260	250	270,00	700,00	336,45	4415,82
4	150	60	70	-1	-1	1	260	300	250	270,00	700,00	178,79	8320,18
5	250	90	50	1	1	-1	260	300	290	283,33	433,33	285,45	4,49
6	150	90	50	-1	1	-1	290	340	270	300,00	1300,00	144,45	24195,28
7	250	60	50	1	-1	-1	390	430	410	410,00	400,00	314,12	9193,29
8	150	60	50	-1	-1	-1	350	360	350	353,33	33,33	161,45	36818,57
9	250	75	60	1	0	0	320	340	290	316,67	633,33	363,87	2228,34
10	150	75	60	-1	0	0	280	260	240	260,00	400,00	214,54	2066,73
11	200	90	60	0	1	0	390	400	410	400,00	100,00	319,04	6555,33
12	200	60	60	0	-1	0	240	280	270	263,33	433,33	304,37	1683,87
13	200	75	70	0	0	1	340	350	360	350,00	100,00	349,96	0,00
14	200	75	50	0	0	-1	330	350	340	340,00	100,00	292,62	2244,67
ИТОГО:										4326,67	6133,33	3884,67	108337,39
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта													
S ² {y}	438,09524												
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений													
S ² {уср}	146,0317												
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)													
Коэффициенты		Дисперсия		S ² {bi} * r a(f1)									
b0	333,580	S ² {b0}	177,98	364,8512	значим								
b1	74,667	S ² {b1}	43,81	89,8095	значим								
b2	7,333	S ² {b2}	43,81	89,8095	значим								
b3	-28,667	S ² {b3}	43,81	89,8095	значим								
b11	-44,375	S ² {b11}	177,98	364,8512	значим								
b22	-21,879	S ² {b22}	177,98	364,8512	значим								
b33	-12,292	S ² {b33}	177,98	364,8512	значим								
b12	-2,917	S ² {b12}	54,76	112,2619	значим								
b13	1,250	S ² {b13}	54,76	112,2619	значим								
b23	18,750	S ² {b23}	54,76	112,2619	значим								
Оценка дисперсии для проверки адекватности													
S ² ад.	1533,33												
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)													
F ад.	3,50	адекватна	2,71										
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)													
у ср.ср	309,05												
F эф.	5,43	модель эффективна											

**План и результаты эксперимента по исследованию времени высыхания
РЗ ЛКП при конвективной сушке (толщина покрытия 3 мм)**

Номер опыта	Управляющие факторы						Выходные параметры			у ср	S _i ²	y ^{ср}	(y ^{ср} -y ^{ср.ср}) ²
	Натуральные значения			Нормализованные значения			y1	y2	y3				
	m1	m2	m3	x1	x2	x3							
1	250	90	70	1	1	1	300	340	330	323,33	433,33	434,26	12304,36
2	150	90	70	-1	1	1	280	240	270	263,33	433,33	265,59	5,10
3	250	60	70	1	-1	1	320	300	300	306,67	133,33	381,93	5663,82
4	150	60	70	-1	-1	1	290	330	290	303,33	533,33	224,93	6147,87
5	250	90	50	1	1	-1	310	340	340	330,00	300,00	327,59	5,80
6	150	90	50	-1	1	-1	330	380	320	343,33	1033,33	187,26	24359,41
7	250	60	50	1	-1	-1	400	440	430	423,33	433,33	340,26	6901,46
8	150	60	50	-1	-1	-1	400	410	400	403,33	33,33	211,59	36764,87
9	250	75	60	1	0	0	380	350	400	376,67	633,33	416,01	1547,77
10	150	75	60	-1	0	0	320	300	290	303,33	233,33	267,34	1295,40
11	200	90	60	0	1	0	390	420	420	410,00	300,00	365,34	1994,37
12	200	60	60	0	-1	0	280	320	310	303,33	433,33	351,34	2304,80
13	200	75	70	0	0	1	380	420	410	403,33	433,33	391,26	145,81
14	200	75	50	0	0	-1	410	390	400	400,00	100,00	331,26	4725,42
ИТОГО:										4893,33	5466,67	4495,95	104166,22
Оценка дисперсии воспроизводимости единичного опыта													
S ² {y}	390,47619												
Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения из 3 наблюдений													
S ² {уср}	130,1587												
Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента при q=0,05 и f1=28 равен 2,05)													
Коэффициенты регрессии		Дисперсия		S ² {b _i } * t α(f1)									
b0	382,300	S ² {b0}	158,63	325,1935	значим								
b1	74,333	S ² {b1}	39,05	80,0476	значим								
b2	7,000	S ² {b2}	39,05	80,0476	значим								
b3	-30,000	S ² {b3}	39,05	80,0476	значим								
b11	-40,625	S ² {b11}	158,63	325,1935	значим								
b22	-23,958	S ² {b22}	158,63	325,1935	значим								
b33	-21,042	S ² {b33}	158,63	325,1935	значим								
b12	2,917	S ² {b12}	48,81	100,0595	значим								
b13	7,083	S ² {b13}	48,81	100,0595	значим								
b23	16,250	S ² {b23}	48,81	100,0595	значим								
Оценка дисперсии для проверки адекватности													
S ² ад.	1366,67												
Проверка адекватности модели (критерий Фишера при q=0,05, f1=4 и f2=28 равен 2,71)													
F ад.	3,50	адекватна	2,71										
Оценка эффективности модели критерий Фишера при q=0,05, f3=13 и f2=4 равен 3,18)													
уср.ср	349,52												
F эф.	5,86	модель эффективна											

Приложение 18

Решение задачи оптимизации по определению максимальной
величины свинцового эквивалента РЗ ЛКП при анодном
напряжении 75 кВ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	а) толщина покрытия 1 мм										
2	Коэффициенты уравнения регрессии										
3	b0	b1	b2	b3	b11	b22	b33	b12	b13	b23	
4	0,0261	0,000126	0,000732	-0,00117	0,00967	-0,00499	0,001175	-0,00168	-0,00053	-0,00224	Свинцовый эквивалент при анодном напряжении 75 кВ и толщине покрытия 1 мм
5	Переменные										
6	x1	x2	x3								
7	1	0	0								
8	Система ограничений										
9	1	0	0	1	1						
10	1	0	0	1	-1						
11	0	1	0	0	1						
12	0	1	0	0	-1						
13	0	0	1	0	1						
14	0	0	1	0	-1						
15											

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	б) толщина покрытия 2 мм										
2	Коэффициенты уравнения регрессии										
3	b0	b1	b2	b3	b11	b22	b33	b12	b13	b23	
4	0,03771	0,00301	0,003013	-0,00025	0,001843	-0,00406	0,004093	-0,00257	-0,00229	-0,00736	Свинцовый эквивалент при анодном напряжении 75 кВ и толщине покрытия 2 мм
5	Переменные										
6	x1	x2	x3								
7	1	0	0								
8	Система ограничений										
9	1	0	0	1	1						
10	1	0	0	1	-1						
11	0	1	0	0	1						
12	0	1	0	0	-1						
13	0	0	1	0	1						
14	0	0	1	0	-1						
15											

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	в) толщина покрытия 3 мм										
2	Коэффициенты уравнения регрессии										
3	b0	b1	b2	b3	b11	b22	b33	b12	b13	b23	
4	0,06787	0,004103	0,00351	-0,00216	0,001834	-0,00406	0,00845	-0,0015	-0,00411	0,000027	Свинцовый эквивалент при анодном напряжении 75 кВ и толщине покрытия 3 мм
5	Переменные										
6	x1	x2	x3								
7	1	0	0								
8	Система ограничений										
9	1	0	0	1	1						
10	1	0	0	1	-1						
11	0	1	0	0	1						
12	0	1	0	0	-1						
13	0	0	1	0	1						
14	0	0	1	0	-1						
15											

Результаты эксперимента по определению расхода и сухого
остатка РЗ ЛКК

Номер опыта	Размеры пластины, мм×мм	Масса до нанесения РЗК, G, г	Масса после нанесения РЗК, G1, г	Площадь пластины, м ²	Расход РЗК, г/м ²	Масса после высыхания РЗК, G ₂ , г	Содержание разбавителя, X1, %	Содержание сухого остатка, X2, %
1	26x76	9,01	11,06	0,00198	1035,35	10,2	41,95	58,05
2	26x75	9,02	10,67	0,00195	846,15	10	40,61	59,39
3	26x76	6,09	8,65	0,00198	1292,93	7,61	40,63	59,38
4	26x76	8,8	10,32	0,00198	767,68	9,72	39,47	60,53
5	26x76	5,58	7,33	0,00198	883,84	6,63	40,00	60,00
6	27x75	8,99	10,26	0,00203	625,62	9,79	37,01	62,99
7	26x76	8,77	10,06	0,00198	651,52	9,58	37,21	62,79
8	26x76	9,22	10,73	0,00198	762,63	10,16	37,75	62,25
9	26x76	5,82	7,19	0,00198	691,92	6,69	36,50	63,50
10	26x76	5,55	6,98	0,00198	722,22	6,46	36,36	63,64
11	26x76	9,11	10,51	0,00198	707,07	10	36,43	63,57
12	22x74	7,47	11,41	0,00163	2417,18	8,45	75,13	24,87
13	24x75	8,27	11,47	0,0018	1777,78	9,27	68,75	31,25
14	25x75	8,65	10,71	0,00188	1095,74	9,93	37,86	62,14
15	26x76	5,61	7,32	0,00198	863,64	6,69	36,84	63,16
16	25x75	5,6	6,84	0,00188	659,57	6,37	37,90	62,10
17	21x74	7,47	9,05	0,00155	1019,35	8,45	37,97	62,03
18	24x76	8,94	11,01	0,00182	1137,36	10,22	38,16	61,84
19	25x76	8,7	10,47	0,0019	931,58	9,82	36,72	63,28
20	25x75	8,88	10,46	0,00188	840,43	9,86	37,97	62,03
21	25x76	9,25	10,9	0,0019	868,42	10,29	36,97	63,03
22	25x76	5,73	7,93	0,0019	1157,89	7,08	38,64	61,36
23	25x76	5,68	9,73	0,0019	2131,58	8,27	36,05	63,95
24	26x76	8,82	13,17	0,00198	2196,97	11,53	37,70	62,30
25	26x76	8,43	11,1	0,00198	1348,48	10,09	37,83	62,17
26	26x76	8,87	10,3	0,00198	722,22	9,76	37,76	62,24
27	26x76	5,72	8,6	0,00198	1454,55	7,5	38,19	61,81
28	26x76	11,65	14,54	0,00198	1459,60	13,03	52,25	47,75
29	26x76	8,4	11,72	0,00198	1676,77	10,42	39,16	60,84
30	26x76	8,89	11,45	0,00198	1292,93	10,49	37,50	62,50

Результаты эксперимента по определению степени перетира РЗ ЛКК

Номер опыта	Масса до нанесения РЗК, G, г	Масса после нанесения РЗК, G1, г	Степень перетира
1	9,01	11,06	0,00198
2	9,02	10,67	0,00195
3	6,09	8,65	0,00198
4	8,8	10,32	0,00198
5	5,58	7,33	0,00198
6	8,99	10,26	0,00203
7	8,78	10,06	0,00198
8	9,22	10,73	0,00198
9	5,82	7,19	0,00203
10	5,55	6,98	0,00198
11	9,11	10,51	0,00198
12	7,47	11,41	0,00198
13	8,27	11,47	0,00163
14	8,65	10,71	0,0018
15	5,61	7,32	0,00188
16	5,6	6,84	0,00198
17	7,47	9,05	0,00188
18	8,94	11,05	0,00155
19	8,7	10,43	0,00182
20	8,88	10,46	0,0019
21	9,25	10,9	0,00188
22	5,73	7,93	0,0019
23	5,68	9,73	0,0019
24	8,82	13,17	0,00198
25	8,43	11,1	0,00198
26	8,87	10,3	0,00198
27	5,72	8,6	0,00198
28	11,65	14,54	0,00198
29	8,4	11,72	0,00198
30	8,89	11,45	0,00198

Результаты экспериментов по определению величины краевого угла
смачивания РЗ ЛКК

Номер опыта	замера, $tg\theta$	Краевой угол смачивания, град.
	σ	
1	19,08	87
2	14,3	86
3	14,3	86
4	19,08	87
5	28,63	88
6	11,43	85
7	9,51	84
8	14,3	86
9	9,51	84
10	14,3	86

Результаты экспериментов по определению свойств РЗ ЛКП

Номер образца	Твердость при высыхании, усл. ед.		Влагопоглощение при высыхании, %		Прочность при ударе при высыхании, Па*м		Блеск, D , ед.	
	при естественной сушке, $H_{ест.}$	при конвективной сушке, $H_{конв.}$	при естественной сушке, $\sigma_{ест.}$	при конвективной сушке, $\sigma_{конв.}$	при естественной сушке, $\sigma_{ест.}$	при конвективной сушке, $\sigma_{конв.}$	при естественной сушке, $D_{ест.}$	при конвективной сушке, $D_{конв.}$
1	0,114	0,104	53	44	0,44	0,54	41	46
2	0,102	0,102	39	39	0,39	0,49	31	48
3	0,127	0,107	48	55	0,55	0,55	32	49
4	0,095	0,095	49	69	0,69	0,69	44	46
5	0,095	0,095	49	59	0,59	0,59	41	45
6	0,134	0,114	48	48	0,48	0,58	34	44
7	0,134	0,114	45	55	0,55	0,55	38	47
8	0,086	0,186	45	58	0,58	0,58	39	48
9	0,139	0,139	56	56	0,56	0,56	41	49
10	0,127	0,127	54	54	0,54	0,54	42	51
11	0,123	0,123	41	61	0,61	0,61	34	47
12	0,123	0,123	46	56	0,56	0,56	35	48
13	0,123	0,123	55	55	0,55	0,55	37	49
14	0,089	0,189	57	57	0,57	0,57	38	44
15	0,095	0,095	46	66	0,66	0,66	42	45
16	0,159	0,159	55	55	0,55	0,55	43	46
17	0,136	0,136	54	54	0,54	0,54	45	47
18	0,132	0,132	56	56	0,56	0,56	44	47
19	0,182	0,182	56	56	0,56	0,56	52	44
20	0,141	0,141	55	55	0,55	0,55	31	43
21	0,118	0,118	55	55	0,55	0,55	32	45
22	0,116	0,116	56	56	0,56	0,56	33	47
23	0,061	0,161	55	55	0,55	0,55	42	48
24	0,061	0,161	57	57	0,57	0,57	41	49
25	0,164	0,164	49	49	0,49	0,49	40	45
26	0,12	0,120	48	48	0,48	0,48	35	44
27	0,13	0,130	47	47	0,47	0,47	32	48
28	0,093	0,193	46	66	0,66	0,66	31	47
29	0,086	0,186	47	67	0,67	0,67	35	49
30	0,164	0,164	47	67	0,67	0,67	34	51

Приложение 26




АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА

Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

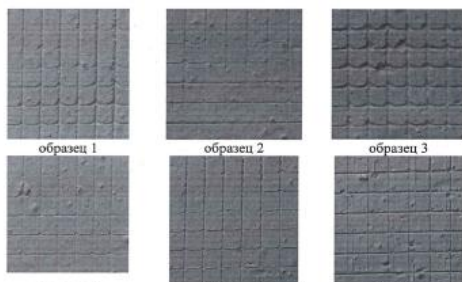


Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	2
образец 2	1
образец 3	1
образец 4	2
образец 5	1
образец 6	2

Фамилия Имя Отчество эксперта Магасумова Альфия ГатрауфовнаУченая степень, ученое звание - к. с.-х. н., доцентМесто работы УГЛТУ кафедра Лесоводства




АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА

Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

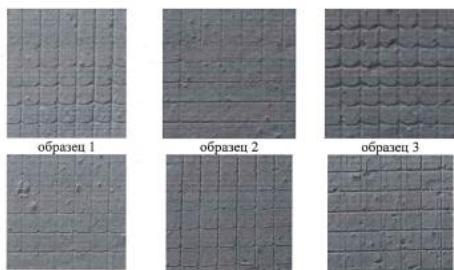


Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	1
образец 2	1
образец 3	2
образец 4	2
образец 5	0
образец 6	2

Фамилия Имя Отчество эксперта Бунькова Наталья ПавловнаУченая степень, ученое звание к. с.-х. н., доцентМесто работы УГЛТУ кафедра Лесоводства

АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА

Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений намного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

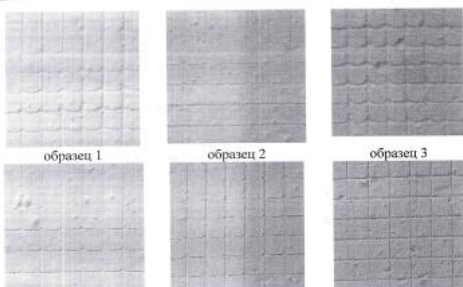


Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	1
образец 2	1
образец 3	2
образец 4	2
образец 5	1
образец 6	2

Фамилия Имя Отчество эксперта
Совина Светлана Валентиновна

Ученая степень, ученое звание
к.т.н., доцент

Место работы
УГЛУ, кафедра МОД

АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА

Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений намного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

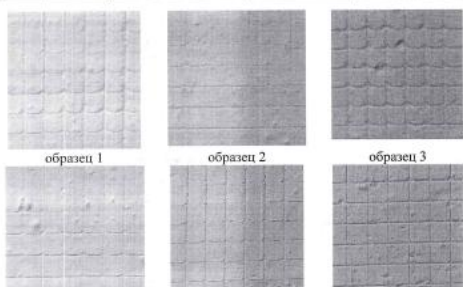


Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	1
образец 2	1
образец 3	2
образец 4	2
образец 5	0
образец 6	2

Фамилия Имя Отчество эксперта
Одинцова Светлана Александровна
Ученая степень, ученое звание - к.т.н.
Место работы УГЛУ, каф. ТМ и ТМ

АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА

Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

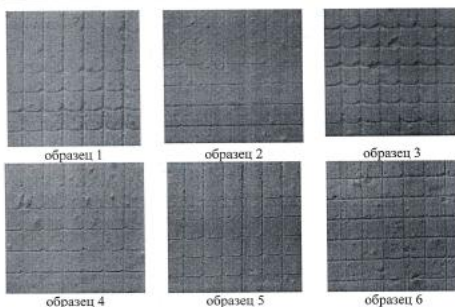


Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА

Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

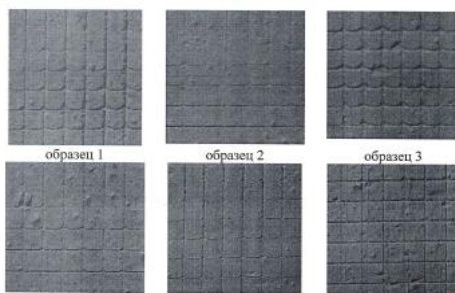


Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	1
образец 2	0
образец 3	1
образец 4	1
образец 5	1
образец 6	2

Фамилия Имя Отчество эксперта Мамаев Алексей ЛьвовичУченая степень, ученое звание не имеетМесто работы ООО «Атом-Технология»Должность Главный технолог

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	2
образец 2	1
образец 3	2
образец 4	1
образец 5	0
образец 6	1

Фамилия Имя Отчество эксперта: Масагутов Эдуард СамгуллоевичУченая степень, ученое звание: не имеюМесто работы: ООО «Атомстройкомплекс-Технология»Должность: Заместитель директора по деревообработке

АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА
Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

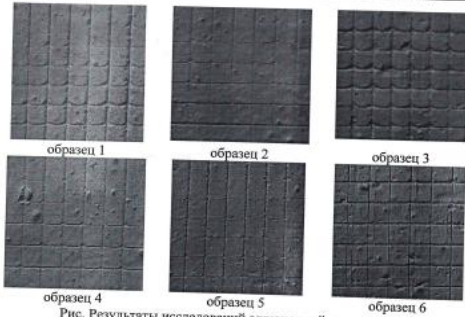


Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	2
образец 2	1
образец 3	1
образец 4	2
образец 5	0
образец 6	2

Фамилия Имя Отчество эксперта Щепочкин Сергей Владимирович

Ученая степень, ученое звание доцент, к.т.н.

Место работы УГЛТУ кафедра МОД

АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА
Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	

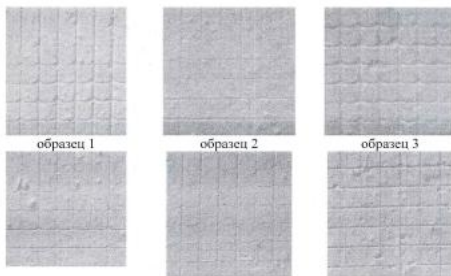


Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	1
образец 2	1
образец 3	0
образец 4	2
образец 5	0
образец 6	2

Фамилия Имя Отчество эксперта Капустина Юлия Александровна

Ученая степень, ученое звание доцент, к.т.н.

Место работы УГЛТУ кафедра Э и ЭБ



АНКЕТА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА

Уважаемые коллеги!

Просим Вас принять участие в опросе по оценке адгезионных свойств рентгенозащитного лакокрасочного покрытия (РЗ ЛКП) методом решетчатых надрезов. Оценочная шкала представлена в табл. 1, фотографии полученных образцов представлены на рис., а анкета опроса приведена в табл. 2.

Заранее благодарны за участие в опросе!

Таблица 1 - Оценочная шкала

Классификация в баллах	Описание	Внешний вид поверхности надрезов с отслаиванием (пример для шести параллельных надрезов)
0	Края надрезов полностью гладкие. Ни один из квадратов в решетке не отслоился	
1	Отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов. Площадь отслоений намного превышает 5 % площади решетки	
2	Облицовка отслоилась вдоль краев и/или на пересечении надрезов. Площадь отслоений немного превышает 5 % площади решетки	



образец 1



образец 2



образец 3



образец 4



образец 5



образец 6

Рис. Результаты исследований адгезионной прочности образцов РЗ ЛКП (увеличение в 2,5 раза)

Таблица - 2 Анкета эксперта

Номер образца	Балл
образец 1	1
образец 2	1
образец 3	2
образец 4	2
образец 5	0
образец 6	2

Фамилия Имя Отчество эксперта Курдышева Елена ВикторовнаУченая степень, ученое звание к.т.н., доцентМесто работы УГЛТУ кафедра ТОЛП

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель генерального директора -
управляющий директор ООО «Атом-
стройкомплекс – промышленность»

И.В.Костылев

«14» февраля 2024 г.

АКТ

Мы, нижеподписавшиеся, главный технолог Мамаев А.Л., инженер-технолог Ялина Н.В., профессор кафедры МОД Яцун И.В., старший преподаватель кафедры МОД Шишкина С.Б., составили настоящий акт в том, что 14 февраля 2024 г. на ООО «АТОМ-Технология» (Свердловская область, г. Березовский) изготовили опытно-промышленную партию рентгенозащитных панелей, общей площадью 6,6 м².

Исходные материалы:

1. Фанера березовая толщиной 12 мм 1220×2440 сорт 1/2 (ГОСТ 3916.1-2018) - 3 листа;
2. Барий сернокислый (ГОСТ 11380-74) - 4,9 кг;
3. Акриловая краска Акрэм-Комфорт-20, полуматовая (ТУ 2316-014-0-31953544-00) - 1,8 кг;
4. Вода дистиллированная (ГОСТ 6709-72) - 0,8 кг.

Фанера раскраивалась на заготовки длиной 2400±2 мм и шириной 290±2 мм. Приготовление рентгенозащитной лакокрасочной композиции осуществлялось в лакоприготовительном отделении цеха путем взвешивания компонентов, входящих в состав композиции с последующим перемешиванием в смесителе, изготовленного в условиях предприятия (нетиповое оборудование).

Нанесение рентгенозащитной композиции на заготовки осуществлялась на линии WL-4000 фирмы «MasterPROFF».

Режим нанесения рентгенозащитной лакокрасочной композиции:

Наименование показателя	Значение
Температура рентгенозащитной композиции, °С	20±2
Расход композиции, г/м ²	1135±20
Толщина наносимого слоя, мм	3±0,1
Способ нанесения материала	рапель, однослойное нанесение
Скорость подачи заготовок, м/мин	3±0,1

Полученные изделия укладывались по высоте в дистанционные секции на подстопную тележку и отправлялись в конвективную сушилку. Высыхание проходило при температуре 20±2 °С в течение 21 часа и при температуре 60±5 °С в течение 5 часов.

Представители

ООО «АТОМ-Технология»:

Главный технолог

 А.Л. Мамаев

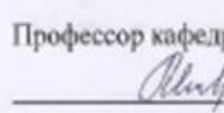
Инженер-технолог

 Н.В. Ялина

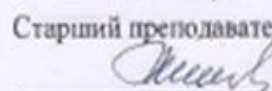
Представители

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»:

Профессор кафедры МОД

 И.В. Яцун

Старший преподаватель кафедры МОД

 С.Б. Шишкина

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и
инновационной деятельности
ФГБОУ ВО «Уральский
государственный
лесотехнический университет»,
доктор биологических наук,
профессор



Фомин В.В.

« » 2024 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс на кафедре механической обработки древесины Инженерно-технического института по проблеме «Формирование рентгенозащитного лакокрасочного покрытия на древесной подложке»

1. **Внедрение выполнено** кафедрой механической обработки древесины ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет».
2. **Исполнитель** – д.т.н., доцент Яцун И.В.
3. **Соискатель** – Шишкина С.Б.
4. **Наименование разделов темы, выполненных соискателем:** поисковые работы по разработке рентгенозащитной лакокрасочной композиции и определению ее оптимального состава. Определение времени высыхания оптимального состава на образцах с разной толщиной покрытия и принятие решения об интенсификации процесса отверждения. Применение теоретических моделей процесса сушки «камневидного» тела для прогнозирования времени физического высыхания технологического слоя композиции при естественной и конвективной сушке. Исследование технико-эксплуатационных свойств разработанной рентгенозащитной композиции и покрытия на ее основе, сформированного на древесной подложке.
5. **Краткое описание результатов внедрения, конечный результат:** теоретические основы кинетики сушки твердого («камневидного») тела получили подтверждение экспериментально-аналитическим методом, что позволило прогнозировать время высыхания, как для естественного, так и для конвективного процесса отверждения рентгенозащитного покрытия. Покрытию присвоено обозначение в соответствии с ГОСТ 33095 – 2014 «Покрытия защитно-декоративные на мебели из древесины и древесных материалов. Классификация и обозначение».
6. **Внедрение по курсу дисциплины:** «Технология защитно-декоративных покрытий», «Специальные виды отделки» для направления подготовки 35.03.02, 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и

деревоперерабатывающих производств», профиль «Технология деревообработки».

7. Влияние на качество подготовки обучающихся: решается актуальная задача применения новых лакокрасочных материалов со специфическими свойствами в технологических процессах изготовления изделий специального назначения.

8. Рекомендации: результаты исследований используются при выполнении выпускных квалификационных работ обучающихся кафедры механической обработки древесины.

9. Эффект от внедрения: результаты исследований опубликованы в двадцати печатных работах, четыре из которых в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Состав комиссии:

Директор Инженерно-технического института

Е.Е. Шишкина

Зав. кафедрой механической обработки древесины

М.В. Газеев

Доцент кафедры механической обработки древесины

С.В. Совина

Доцент кафедры механической обработки древесины

О.Н. Чернышев

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Шишкина Е.Е.
Специалист по кадрам
Кадрово-правового управления
Юрв. Митин Е.Н.



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Газеев М.В.
Специалист по кадрам
Кадрово-правового управления
Юрв. Митин Е.Н.



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Совина С.В.
Специалист по кадрам
Кадрово-правового управления
Юрв. Митин Е.Н.



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Чернышев О.Н.
Специалист по кадрам
Кадрово-правового управления
Юрв. Митин Е.Н.

