

Газеев Максим Владимирович

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДРЕВЕСИНЕ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ АЭРОИОНИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ  
ПЛЕНКООБРАЗОВАНИЯ

05.21.05 – Древесиноведение, технология  
и оборудование деревопереработки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Екатеринбург 2017

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

Официальные  
оппоненты **Онегин Владимир Иванович**  
Доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», профессор кафедры технологии и оборудования деревообрабатывающих производств

**Рыбин Борис Матвеевич**  
Доктор технических наук, профессор, Мытищинский филиал Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)», профессор кафедры древесиноведения и технологии деревообработки

**Исаев Сергей Петрович**  
Доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», профессор кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства

Ведущая  
организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Защита диссертации состоится 28 сентября 2017 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 на базе ФГБОУ ВО Уральского государственного лесотехнического университета по адресу: 620100, Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, ауд. 401.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета,  
доктор технических наук, доцент

Шишкина  
Елена Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В технологическом процессе отделки изделий из древесины время пленкообразования лакокрасочных покрытий (ЛКП) является важным показателем, от которого зависит продолжительность производственного цикла, возможность организации процесса отделки по непрерывно-поточному принципу, а также потребность в производственных площадях. Для получения ЛКП высокого качества необходимо нанесение нескольких слоев покрытий с промежуточной сушкой, что является необходимым условием, и в еще большей степени, увеличивает цикл отделки, для сокращения которого применяют различные способы ускоренного пленкообразования лакокрасочных материалов (ЛКМ). Выбор способа определяется возможностью его применения для получения высококачественных покрытий с минимальными временными и энергетическими затратами. Существуют различные способы по ускорению процесса пленкообразования ЛКП на древесине, такие как конвективный нагрев, терморadiационное и фотохимическое отверждение и др. Все перечисленные выше способы помимо определенных преимуществ обладают и недостатками, один из которых повышенное энергопотребление.

В настоящее время в соответствии с Государственной программой социально-экономического развития РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» (утв. распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. №2446-р) перед промышленностью ставится задача по повышению ее энергоэффективности, эффект может быть получен за счет технологических мероприятий. Предприятия вынуждены подбирать более простые в эксплуатации, экономичные, высокопроизводительные решения для производства продукции. Энергоэффективность и энергосбережение является одним из восьми приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. №899).

Таким образом совершенствование и разработка новых способов интенсификации пленкообразования ЛКП на древесине является актуальным, что позволит улучшить качество, повысить эффективность и решить ряд экономических задач в технологии формирования ЛКП на изделиях из древесины и древесных материалах.

**Степень разработанности темы исследования.** Установлено, что исследованием аэроионизации для очистки воздуха в деревообрабатывающих помещениях занимался Рогов В.А.; в медицинских целях исследовали Чижевский А.Л., Сипетров В.П., Беспалов Н.Н., за рубежом занимались Timo Estola, Raavo Mâkelâ, Tarani Novi (Хельсинки, Финляндия), Richard B. Russell (г. Афины, Джорджия, США), Stacy L. Daniels (США). Шкатов В.Т. и Кувшинов В.А разработали способ сушки тонкослойных материалов в электрическом поле. Изучение литературы позволило установить, что в настоящее время электроэфлювиальная аэроионизация широко применяется для насыщения воздуха активными формами кислорода (АФК), для очистки воздуха от микроорганизмов, пыли и в оздоровительных целях.

При анализе литературных источников применение аэроионизации в технологии формирования ЛКП на изделиях из древесины не найдено.

**Цель работы.** Повышение эффективности формирования лакокрасочных покрытий на изделиях из древесины.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- исследовать и дать теоретическое обоснование механизма влияния АФК и электрического поля электроэффлювиальной аэроионизации на процесс пленкообразования ЛКП, образованных на древесине водно-дисперсионными, пентафталевыми и полиуретановыми ЛКМ;
- исследовать смачивание поверхности древесины ЛКМ при электроэффлювиальной аэроионизации;
- исследовать кинетику испарения растворителей ЛКМ при электроэффлювиальной аэроионизации;
- исследовать шероховатость поверхности древесины с ЛКП, отвержденным при электроэффлювиальной аэроионизации;
- исследовать химический состав ЛКП, отвержденных при электроэффлювиальной аэроионизации;
- исследовать физико-механические показатели качества ЛКП, образованных при электроэффлювиальной аэроионизации на древесине;
- разработать режимы аэроионизационной сушки ЛКП на древесине водно-дисперсионными акриловыми, пентафталевыми и полиуретановыми ЛКМ;
- определить экономическую эффективность аэроионизационной сушки ЛКП на древесине.

**Объект исследования.** Аэроионизационный способ интенсификации пленкообразования ЛКП на древесине.

**Предмет исследования.** Процессы пленкообразования ЛКП на древесине при электроэффлювиальной аэроионизации.

**Научной новизной диссертационной работы обладают:**

1. Механизм интенсификации пленкообразования ЛКП, образованных на древесине водно-дисперсионными акриловыми ЛКМ, при наложении электрического поля аэроионизационной установкой, заключающийся в ускорении перемещении фаз дисперсной системы за счет дополнительного заряда двойного электрического слоя пленкообразующей системы. Действие механизма для полиуретановых ЛКМ достигается за счет регулирования электромагнитных полей и направленных потоков аэроионов от отдельных электродов аэроионизационной установки.

2. Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения физико-механических показателей качества ЛКП, образованных на древесине, при аэроионизационном способе пленкообразования за счет сообщения заряда соприкасающихся фаз ЛКМ в процессе пленкообразования.

3. Способ снижения внутренних напряжений, возникающих в ЛКП, образованных на древесине за счет сообщения заряда пленкообразующей системе в электрическом поле электроэффлювиального аэроионизатора.

4. Методика экспериментальных исследований водостойкости защитно-декоративных покрытий, образованных на древесине.

5. Модели 2D и 3D визуализации распределения электромагнитного поля, формируемого электродами электроэффлювиальной аэроионизационной установки на поверхности отверждаемого ЛКП.

6. Разработан технологический процесс формирования ЛКП на изделиях из древесины с применением аэроионизационного способа интенсификации пленкообразования на специализированных стеллажах.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Сокращение времени пленкообразования ЛКП, образованных водно-дисперсионными ЛКМ на древесине, достигается за счет уменьшения электрокинетического потенциала при наложении электрического поля аэроионизационной электроэффлювиальной установкой, при этом по правилу Кена происходит заряд соприкасающихся фаз дисперсной системы и ускорение их перемещения.

2. Регулирование электромагнитных полей и направленных потоков аэроионов от отдельных электродов электроэффлювиальной аэроионизационной установки обеспечивает повышение энергии Гиббса, активацию химической реакции пленкообразования и сокращение времени пленкообразования ЛКП, образованного на древесине полиуретановым лакокрасочным материалом.

3. Сокращение времени пленкообразования лакокрасочных покрытий, образованных на древесине пентафталевым лакокрасочным материалом, достигается за счет поляризации и упорядочивания молекул алкидной смолы при наложении внешнего электрического поля и активных форм кислорода аэроионизационной электроэффлювиальной установки.

4. Полученные математические модели адекватно характеризуют процесс формирования ЛКП на подложке из древесины.

#### **Значимость для теории и практики:**

**Теоретическая значимость.** Развитие и уточнение теории Штерна – электроосмоса при интенсификации пленкообразования ЛКП, образованных водно-дисперсионными ЛКМ на древесине.

Обоснование физико-химического влияния аэроионизационного способа интенсификации отверждения пленкообразующих веществ на древесине, позволившее выявить механизм процесса и повышения твердости, водостойкости и адгезионной прочности ЛКП с древесиной.

Теоретические исследования распределения электрического поля электроэффлювиального аэроионизатора, позволившие выявить его влияние на механизм пленкообразования водно-дисперсионных и органо-растворимых ЛКМ.

Математико-статистические модели процессов ускоренного пленкообразования ЛКП на древесине, включающие основные влияющие факторы, являются основой для оптимизации режимов ускоренной сушки ЛКП.

**Практическая значимость.** Полученные результаты исследований и разработанный технологический процесс могут быть применены на мебельных

и деревообрабатывающих предприятиях для управления технологическими процессами на этапе пленкообразования ЛКП изделий из древесины.

Разработанный способ аэроионизационной сушки ЛКП и режимы позволят повысить эффективность защитно-декоративной отделки изделий из древесины:

- интенсифицировать процесс отделки;
- обеспечить заданное качество ЛКП на древесине;
- снизить расход электрической энергии на сушку ЛКП.

Результаты исследований внедрены на деревообрабатывающих предприятиях в виде разработанного передвижного стеллажа для аэроионизационной сушки ЛКП, а также используются в учебном процессе.

**Апробация результатов диссертационной работы.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных симпозиумах, научно-технических конференциях и выставках: на Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи - лесному комплексу России» в апреле 2006-2016 гг.; Международном евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» 2006 - 2009, 2013, 2014, 2016 гг., г. Екатеринбург; на международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВПО КГТУ «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса», 2012 г., 2015 г., г. Кострома; IX Международной научно-практической конференции «Перспективные разработки науки и техники» 15 - 19 ноября 2013 г. (Пржемысл, Польша); X Международной научно-практической конференции «Прикладные научные разработки – 2014» 25.07 - 05.08.2014 (Чехия, Прага); Международной специализированной выставке мебели, оборудования, комплектующих и технологий для ее производства «Экспомебель Урал» 2013 г.; Международной специализированной выставке «LESPROM-URAL Professional» 2014, 2015, 2016 гг.; Международной научно-технической конференции «Лесотехнические университеты в реализации концепции возрождения инженерного образования: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» 2015 г., г. Екатеринбург; Международной научно-практической конференции «Fundamental and applied science», 2015 г. (Шеффилд, Великобритания).

**Реализация работы.** Основные результаты работы внедрены в Учебном научно-производственном центре УГЛТУ, прошли промышленные испытания в ООО Компания «Реннер», в ООО Лесопромышленная компания «Литек» (г. Екатеринбург).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 58 работ, в том числе 13 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 патента на полезную модель и 1 на изобретение.

**Объем диссертации и ее структура.** Диссертация состоит из введения, 6 разделов, выводов и рекомендаций, библиографического списка из 197 наименований, содержит 251 страницу основного текста, 100 рисунков, 38 таблиц, 49 страниц приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, научная новизна, научные положения, выносимые на защиту, структура и объем работы, а также ее реализация и апробация.

**В первой главе** «Состояние вопроса и задачи исследования» выполнен аналитический обзор способов интенсификации пленкообразования ЛКП на древесине. Показано, что пленкообразование представляет собой физико-химический процесс перехода жидкого ЛКМ в твердую пленку, ускорение которого возможно при сообщении ЛКМ дополнительной энергии. Существующие способы интенсификации пленкообразования ЛКП эффективны, но требуют больших затрат на организацию и оборудование производства, учета химической природы пленкообразователя и повышенного расхода электроэнергии от 3 до 20 кВт·ч (рисунок 1).



Рисунок 1 – Способы интенсификации пленкообразования ЛКП

Поэтому поиск новых или совершенствование существующих способов ускоренного пленкообразования ЛКП, направленных на сокращение затрат электрической энергии позволит повысить эффективность отделки. При отверждении ЛКП кислород воздуха участвует в реакции окислительной полимеризации. Следовательно, можно предположить, что активация кислорода воздуха позволит интенсифицировать пленкообразование ЛКП.

Электроэффлювиальная аэроионизация представляет собой метод получения активных форм кислорода (АФК) в электрическом поле аэроионизационного устройства, которое отличается низким энергопотреблением. В настоящее время аэроионизация широко применяется в медицине, сельском хозяйстве, быту, производстве и общественных помещениях.

Применение аэроионизации в технологии формирования ЛКП древесины предлагается впервые и является перспективным направлением в части энергоэффективности, обеспечении требуемого качества и повышения эффективности отделки изделий из древесины. Потребление электроэнергии при аэроионизации составляет порядка 0,096 – 0,2 кВт·ч. Анализ литературы позволил выявить новое направление повышения эффективности защитно-декоративной отделки изделий из древесины путем применения аэроионизационного способа пленкообразования ЛКП на технологическом

этапе сушки покрытий. На основании анализа сформулированы задачи исследования, приведенные выше.

**Во второй главе** представлены «Общие методические положения» при проведении экспериментов и обработки их результатов, а также дается характеристика используемых материалов и применяемого оборудования. Методики проведения некоторых экспериментов в силу их индивидуальных особенностей представлены в соответствующих разделах.

Для проведения экспериментальных исследований использовали современное отечественное и зарубежное оборудование и приборы. Физико-механические и эксплуатационные характеристики ЛКП оценивали стандартными методами.

В проведенных исследованиях использовались ЛКМ отечественного и зарубежного производства: лак акриловый ВД-АК «Эколак» (ТУ 2316-013-0-31953544-00); грунт прозрачный ВД-АК «Экогрунт» (ТУ 2316-014-31953544-2000); лак ВД-АК-УР «Балет»; лак ВД-АК-УР «Балет плюс» (ЭмЛАК-Урал, г. Екатеринбург); АКРА-лак мебельный (ТУ 2316-002-26294341-98) («ОПЛМ» г. Екатеринбург); двухкомпонентный полиуретановый лак Verinlegno I 362 VLX 36 и CEROPAC 20 Gloss (Италия); лак ПФ-157.

В проведенных исследованиях применялось электроэффлювиальное аэроионизационное устройство (ЭЭАУ), разработанное в Марийском государственном университете им. Н.П. Огарева (Мордовия, г. Саранск) оборудовано различными электроэффлювиальными излучателями (ЭИ) (рисунок 2): 1. Фанерная пластина с графитовой тканью, ворсинки которой являются электродами; 2. Металлическая проволочная сетка радиусом 0,3 м с шагом 0,02 м в углах ячеек припаяны металлические иглы. 3. Металлическая проволочная сетка радиусом 0,3 м с шагом 0,04 м в углах ячеек припаяны металлические иглы.

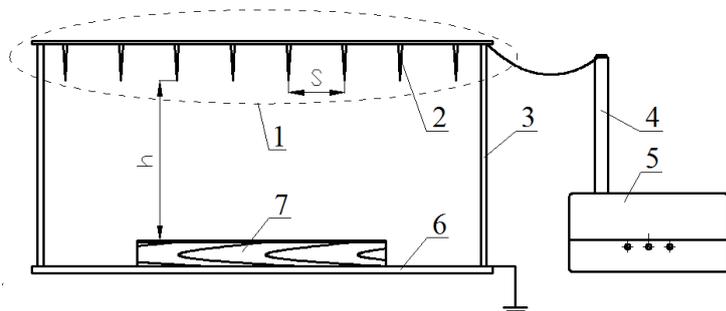


Рисунок 2 – Электроэффлювиальное аэроионизационное устройство (слева – схема, справа – фото): 1 – электроэффлювиальный излучатель (ЭИ); 2 – коронирующий электрод; 3 – стойка; 4 – умножитель; 5 – высоковольтный генератор (ВВГ); 6 – основание; 7 – образец с ЛКП;  $h$  – расстояние между образцом и ЭИ;  $S$  – расстояние между электродами

Исследование технологических и эксплуатационных характеристик ЛКП осуществлялось при их формировании на поверхности подложек из древесины сосны (размером  $170 \times 70 \times 20$  мм, относительной влажности  $8 \pm 2\%$ , шероховатостью поверхности  $R_{m \max} \leq 16$  мкм) и стеклянных пластинок размером  $4 \times 90 \times 120$  мм. Эксперименты проводили по классической схеме, а также с использованием методов планирования для многофакторных опытов и обработки их результатов. Разработана методика оценки водостойкости защитно-декоративных покрытий на древесине (патент №2557367).

**В третьей главе** «Теоретическое исследование общих закономерностей пленкообразования ЛКП на древесине при электроэфлювиальной аэроионизации» проведены теоретические исследования и обоснование основных закономерностей механизма пленкообразования ЛКП древесины при аэроионизации. Пленкообразование ВД-АК ЛКМ на поверхности древесины происходит при испарении растворителей и химических превращениях пленкообразователя, состоит из трех стадий: *первая стадия* – образование геля и интенсивное испарение растворителя со свободной поверхности; *вторая стадия* – синерезис промежуточного геля; *третья стадия* – ликвидация границ между соседними частицами (рисунок 3). Для ЛКМ на основе органических растворителей поднятие растворителя к поверхности покрытия происходит за счет диффузии через слой твердеющей полимерной пленки.

ЭЭАУ с размещенным под ее излучателем подложкой с нанесенным слоем жидкого ЛКМ можно представить, как плоский конденсатор, тогда его емкость будет эквивалентна трем последовательно соединенным конденсаторам. В слое жидкого ЛКМ в процессе пленкообразования происходит работа по перемещению жидкости из слоя к поверхности с последующим ее испарением. Из закона сохранения энергии работа, совершаемая источником

$$\Delta A_{\text{ист}} = \Delta W + F_{\text{эл}} \Delta x, \quad (1)$$

где  $\Delta W$  – изменение энергии конденсатора,  $F_{\text{эл}}$  – электрическая сила над внешними телами, тогда с учетом  $A_{\text{ист}} = 2\Delta W$ , сила действующая на ЛКМ

$$F_{\text{эл}} = \frac{\Delta W}{\Delta x}, \quad (2)$$

где  $\Delta x$  – величина изменения толщины ЛКП от начальной к конечной (рисунок 3). Энергию слоя жидкого ЛКП, как в конденсаторе, условно можно принять как сумму энергии слоя полимера  $W_1$  и слоя жидкости  $W_2$  (растворителя)

$$W = W_1 + W_2. \quad (3)$$

Тогда изменение энергии  $\Delta W$  в слое ЛКП можно определить как энергию слоя полимера (суммарная энергия за вычетом энергии слоя воды). Энергия плоского конденсатора может быть выражена, Дж

$$W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2 V}{2}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха  $\varepsilon \approx 1$ );

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м ( $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ );

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

$V$  – объем пространства, занимаемого электрическим полем, м<sup>3</sup>.

Предположим, что электрическая сила  $F_{эл}$ , действующая на жидкость в тонком слое ЛКМ, больше силы тяжести  $F_m$ , что способствует перемещению жидкости через слой образующегося ЛКП к поверхности и более интенсивному испарению со свободной поверхности в воздушном промежутке.

Синерезис (сжатие) промежуточного геля является второй стадией процесса пленкообразования ВД-АК ЛКМ. При данном процессе происходит удаление растворителя из сохнущей пленки ЛКМ. В отверждаемом на поверхности древесины слое ЛКП возникают капиллярные явления, вызывающие подъем жидкости в капиллярах, образующихся между сжимающимися частицами дисперсной фазы. Можно предположить, что воздействие электрического поля ЭЭАУ влияет на упорядочивание и уплотнение частиц дисперсной фазы, а также на уменьшение краевого угла смачивания жидкости, за счет сообщения заряда и, как следствие, лучшее поднятие растворителя по образуемым между слипающимися частицами дисперсной фазы капиллярам (рисунок 3).

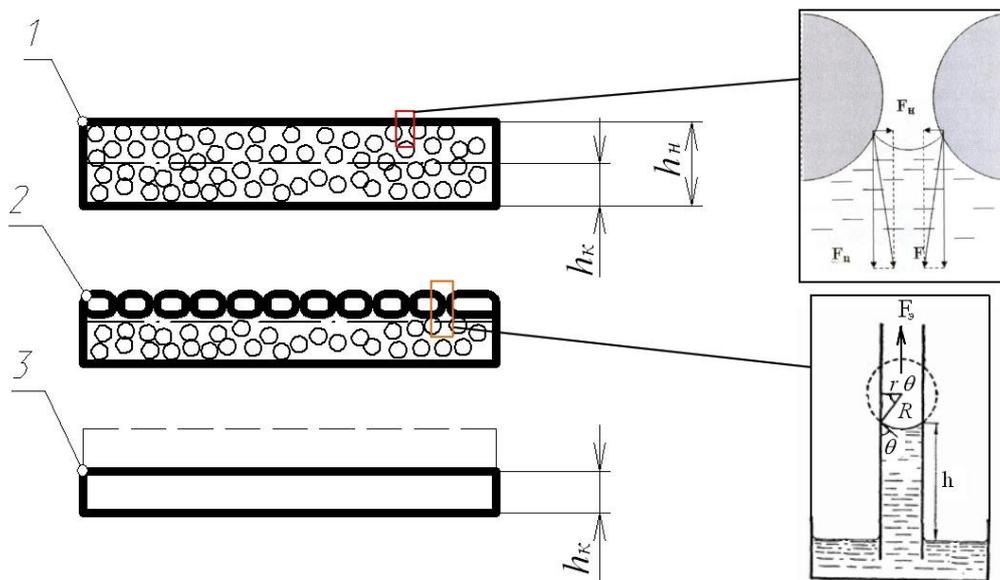


Рисунок 3 – Превращения в слое жидкого ЛКМ при аэроионизации:  
 1 – образование геля и испарение растворителя с открытой поверхности;  
 2 – уплотнение геля с образованием микрокапилляров; 3 – отвержденная пленка лака;  $h_n$  – начальная толщина ЛКП;  $h_k$  – конечная толщина ЛКП

Согласно формуле Жюрена высота подъема жидкости в капилляре

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho r g}. \quad (5)$$

Следовательно, на нее влияет радиус капилляра  $r$  и краевой угол смачивания  $\theta$  жидкостью стенок капилляра.

Если рассматривать применяемый для формирования покрытия на древесине ВД-АК ЛКМ более детально, то он представляет собой систему, в которой на границе раздела фаз древесина и ЛКМ образуется двойной электрический слой (ДЭС), имеющий диффузное строение (рисунок 4). Образование ДЭС происходит самопроизвольно, как следствие, стремления гетерогенной системы к уменьшению поверхностной энергии. Согласно теории Штерна, ДЭС состоит из двух частей противоионов: одна их часть образует адсорбционный слой, а другая находится в диффузном слое. Противоионы диффузного слоя не закреплены и способны перемещаться в пределах слоя внутри жидкости. При наложении внешнего электрического поля, формируемого ЭЭАУ, происходит разрыв ДЭС по плоскости скольжения А-А (рисунок 4). В результате дисперсионная среда и дисперсная фаза оказываются противоположно заряженными. По правилу Кена, из двух соприкасающихся фаз дисперсной системы положительно заряжается та, которая имеет большую диэлектрическую проницаемость. Вода обладает высокой диэлектрической проницаемостью, т.е. под воздействием внешнего электрического поля заряжается положительно. В результате дисперсная фаза и дисперсионная среда оказываются противоположно заряженными.

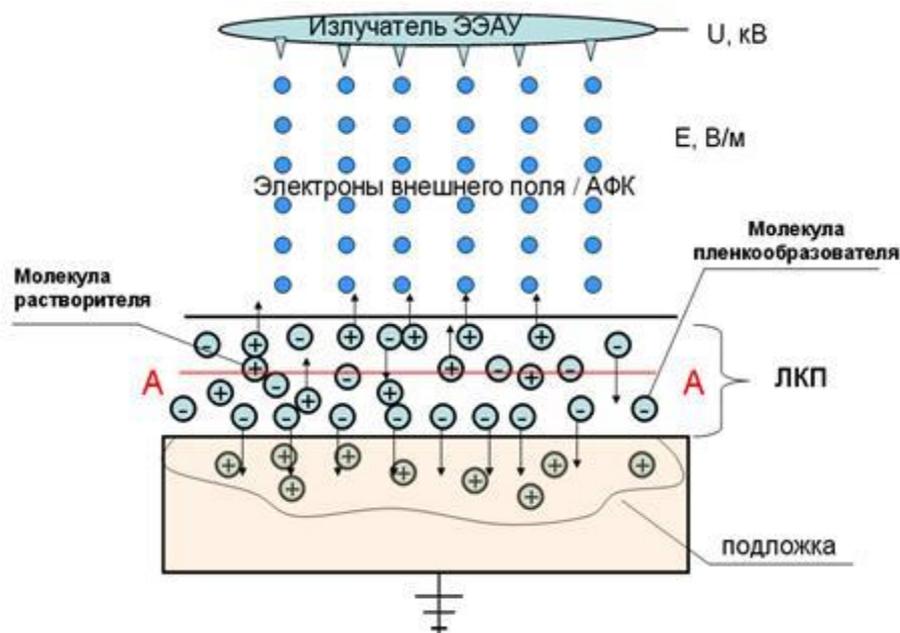


Рисунок 4 – Строение ДЭС на границе электрическое поле – ЛКМ – древесина:  
А-А – плоскость скольжения ДЭС

При относительном перемещении фаз возникает электрокинетический потенциал (ЭКП), что приводит к более быстрому удалению молекул растворителя с поверхности дисперсной системы (покрытия). Такое перемещение дисперсной среды под действием электрического поля, в результате которого жидкость выходит из слоя покрытия и оно становится более плотным, называют электроосмосом. При повышении напряженности электрического поля и количества АФК скорость протекания процесса должна возрастать.

Математическую зависимость линейной скорости движения растворителя (жидкости) относительно мембраны можно представить в виде уравнения Геймгольца-Смолуховского (6), из которого видно, что повышение напряженности поля оказывает непосредственное влияние на скорость

$$U_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E \zeta}{\eta}, \quad (6)$$

где  $\zeta$  – электрокинетический потенциал;

$\eta$  – коэффициент трения;

$U_0$  – постоянная линейная скорость дисперсной среды;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$E$  – напряженность электрического поля, кВ/м.

Таким образом при воздействии отрицательно заряженных АФК в электрическом поле ЭЭАУ свободные молекулы растворителя имеют возможность поляризоваться и выходить из покрытия на его поверхность.

Для подтверждения механизма пленкообразования ВД-АК ЛКМ на древесине при аэроионизации была исследована кинетика испарения растворителей ЛКМ под влиянием аэроионизации. ЭИ установки создает электрическое поле и АФК которые перемещаются вдоль линий силового поля от электродов излучателя к поверхности ЛКП. В результате перемещения создается ионный ветер в направлении, перпендикулярном поверхности испарения, следовательно, испарение с открытой поверхности должно протекать быстрее при ионизации воздуха, чем в естественных условиях. Согласно исследованиям Всесоюзного теплотехнического института при потоке воздуха перпендикулярном поверхности испарения, коэффициент испарения увеличивается в 2 раза.

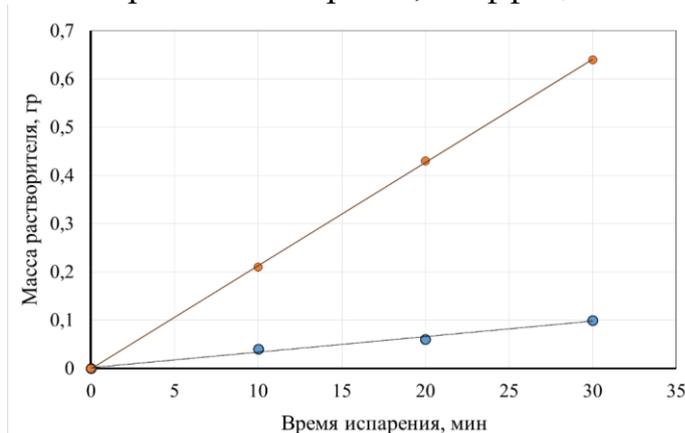


Рисунок 5 – Кинетика количества испарившейся воды при аэроионизации и естественных условиях

В условиях аэроионизации наблюдается воздействие на покрытие электрического поля, обладающего энергией способной ослабить межмолекулярное взаимодействие, ускорив процесс фазового превращения – испарения с малыми тепловыми потерями. В результате исследования кинетики испарения растворителей ЛКМ (рисунок 5) установлено, что с повышением напряженности поля до

$E = 120$  кВ/м потеря массы воды (испарение) с открытой поверхности в чашке Петри в 6,4 раза больше по сравнению с естественными условиями (температуре воздуха  $20 \pm 2$  °С и влажности воздуха  $60 \pm 5$  %). Количество испарившегося уайт-спирита увеличивается в 2,4 раза, растворителя полиуретанового лака Р 734 – в 2,6.

В результате исследования влияния аэроионизации на процесс пленкообразования ЛКП, образованных ВД-АК ЛКМ на древесине, были построены графические зависимости (рисунок 6, 7), которые позволяют сделать вывод, что воздействие АФК и электрического поля, в котором они образуются, интенсифицируют процесс пленкообразования.

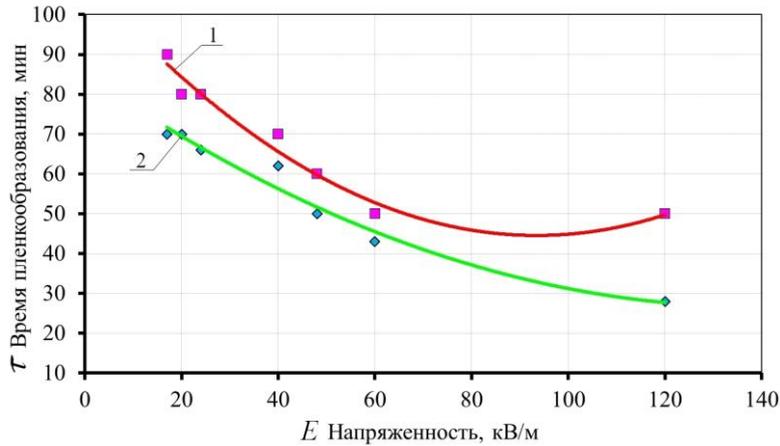


Рисунок 6 – Зависимость времени пленкообразования лака ВД-АК «Эколак» от напряженности электрического поля ЭИ: 1 – на стекле; 2 – на древесине

Для сравнения результатов пленкообразования ЛКМ при аэроионизации применялись подложки из стекла и из древесины сосны. Сокращение времени пленкообразования на дереве можно объяснить взаимодействием компонентов ЛКМ с древесиной. Процесс пленкообразования лака ВД-АК на стекле и древесине математически можно представить в виде уравнений регрессии, показывающих взаимосвязь времени пленкообразования от напряженности, адекватность которых подтверждается величиной достоверности аппроксимации  $R^2$ .

$$\tau_1 = 0,0074E^2 - 1,38E + 108,94, R^2=0,96, \quad (7)$$

$$\tau_2 = 0,003E^2 - 0,84E + 82,12, R^2=0,97. \quad (8)$$

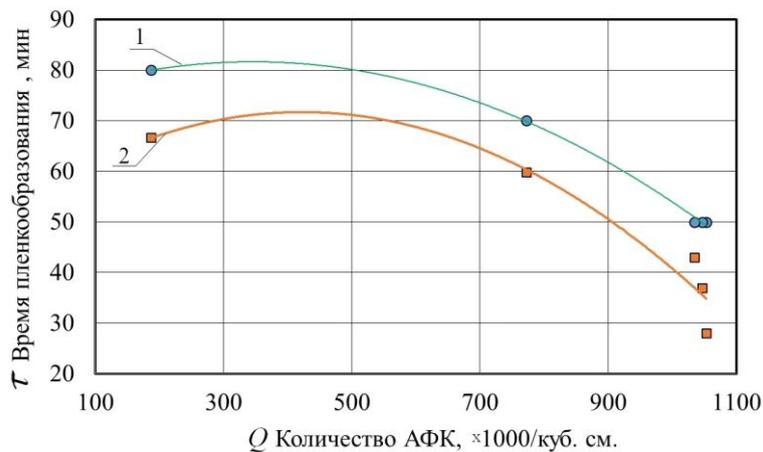


Рисунок 7 – Зависимость времени пленкообразования лака ВД-АК «Эколак» от количества АФК создаваемых ЭИ: 1 – на стекле; 2 – на древесине

Получены уравнения регрессии, отражающие зависимость времени пленкообразования на стекле и древесине от количества АФК, адекватность уравнений подтверждается величиной достоверности аппроксимации  $R^2$ .

$$\tau_1 = -0,00006Q^2 + 0,045Q + 73,88, R^2 = 0,99, \quad (9)$$

$$\tau_2 = -0,00009Q^2 + 0,078Q + 55,19, R^2=0,99. \quad (10)$$

Таким образом АФК и напряженность электрического поля аэроионизатора оказывают влияние на время пленкообразования ЛКП, но напряженность оказывает основное влияние.

Изучение влияния аэроионизации в технологии формирования ЛКП на древесине привело к рассмотрению явления смачивания, которое оказывает очень важную роль, определяющую термодинамическую концепцию адгезионного взаимодействия с подложкой. Исследования краевого угла смачивания поверхностного натяжения ЛКМ и работы адгезии ЛКП позволили сделать заключение о влиянии аэроионизации. Зависимость равновесного краевого угла от поверхностного натяжения на границах раздела фаз, участвующих в смачивании, описывается уравнением Юнга:

$$W_a = \sigma_{ж.г.}(1 + \cos\theta). \quad (11)$$

Результаты измерений и расчетов кинетики краевого угла представлены на рисунке 8. Равновесный краевой угол устанавливается после нанесения капли ЛКМ на подложку в 1,5 раза быстрее при ионизации, чем в естественных условиях. Снижение краевого угла и, как следствие, лучшее смачивание и повышение адгезии ЛКМ к подложке обеспечивается за счет создания на поверхности энергии от электрического поля ЭИ. Краевой угол смачивания ЛКМ подложки взаимосвязан с поверхностным натяжением и работой адгезии, в связи с чем были проведены дальнейшие исследования и изучение влияния аэроионизации на поверхностное натяжение ЛКМ. Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  при постоянной температуре равен работе, необходимой для увеличения поверхности (площади поверхности) на единицу.

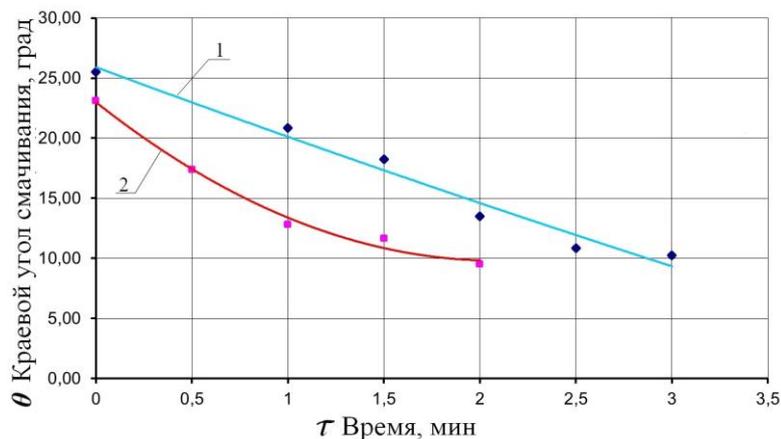


Рисунок 8 – Кинетика краевого угла смачивания грунтом ВД-АК «Экогрунт» подложки из дерева в естественных условиях и при аэроионизации:

1 – в естественных условиях; 2 – при аэроионизации

$$\theta_1 = 0,13\tau^2 - 5,91\tau + 25,89, R^2=0,97, \quad (12)$$

$$\theta_2 = 3,02\tau^2 - 12,63\tau + 22,99, R^2=0,99. \quad (13)$$

В результате проведенных исследований, получили значения поверхностного натяжения испытуемого ВД-АК ЛКМ, которые применили для определения зависимость работы адгезии  $W_a$  от краевого угла смачивания  $\theta$  грунтом ВД-АК «Экогрунт» древесины в естественных условиях и при ионизации приведены на рисунке 9. Анализ которого показывает, что аэроионизация оказывает влияние на работу адгезии при смачивании ЛКМ подложки из древесины. получены уравнения регрессии, отражающие зависимость работы адгезии ЛКМ к древесине от кинетики краевого угла смачивания древесины. Достоверность математических моделей подтверждается величиной  $R^2 = 0,99$ .

$$W_{a2} = 0,049\theta^3 - 0,755\theta^2 + 3,94\theta + 108,46, \quad (14)$$

$$W_{a1} = -0,178\theta^2 + 2,19\theta + 108,7. \quad (15)$$

Можно утверждать о преобладании электрической теории адгезионного взаимодействия ЛКМ с древесной подложкой при пленкообразовании ЛКП под воздействием аэроионизации. Происходит ориентированная адсорбция полярных групп молекул полимера на поверхности древесины, т.е. условно говоря создается молекулярный конденсатор. Также можно предполагать о диффузии жидкого ВД-АК ЛКМ в поверхностный слой древесины за счет проникновения макромолекул пленкообразователя через межфазную границу раздела.

Достаточная подвижность макромолекул ЛКМ достигается зарядкой в электрическом поле аэроионизатора. Поле влияет на уменьшение краевого угла смачивания растворителя ЛКМ за счет сообщения заряда и, как следствие, лучшее его поднятие по образуемым между слипающимися частицами дисперсной фазы капиллярам к поверхности покрытия, где происходит испарение, что подтверждает теоретические предположения основанные на анализе формулы (5) Жюрена.

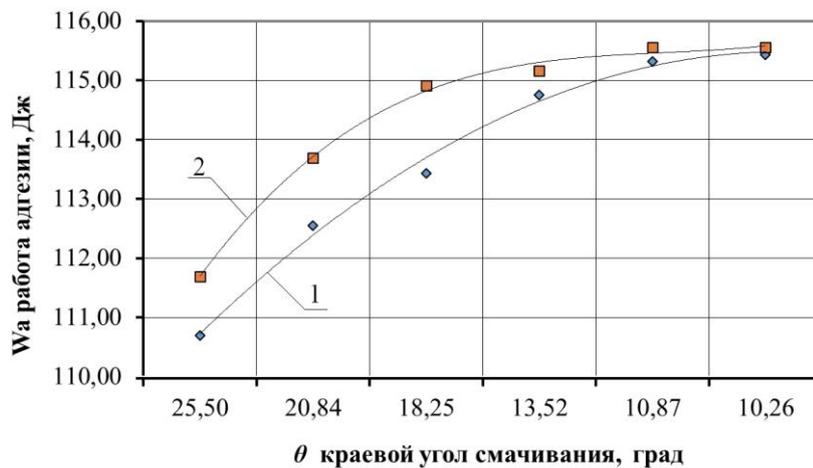


Рисунок 9 – Зависимость работы адгезии  $W_a$  от краевого угла смачивания  $\theta_0$  грунтом ВД-АК «Экогрунт» древесины: 1 – в естественных условиях; 2 – при аэроионизации

Для подтверждения перемещения растворителя из глубины ЛКП к его поверхности провели исследования шероховатости поверхности образцов покрытий, подвергавшихся воздействию аэроионизации в сравнении с естественными условиями. В результате исследований получили, что аэроионизация позволяет снизить шероховатость поверхности древесины с ЛКП (грунтованной) на 30 %, что можно объяснить меньшим контактом растворителя ЛКМ с древесиной и снижение ее набухания.

Теоретически исследовано распределение электрического поля, формируемого электродами ЭЭАУ на поверхности ЛКП. Вблизи каждого электрода ЭИ возникают упорядоченные потоки АФК, что повышает влияние магнитного поля. Проецирование поля на поверхность выглядит в виде окружности, что связано с таким физическим явлением как дрейф заряженных частиц (рисунок 10).

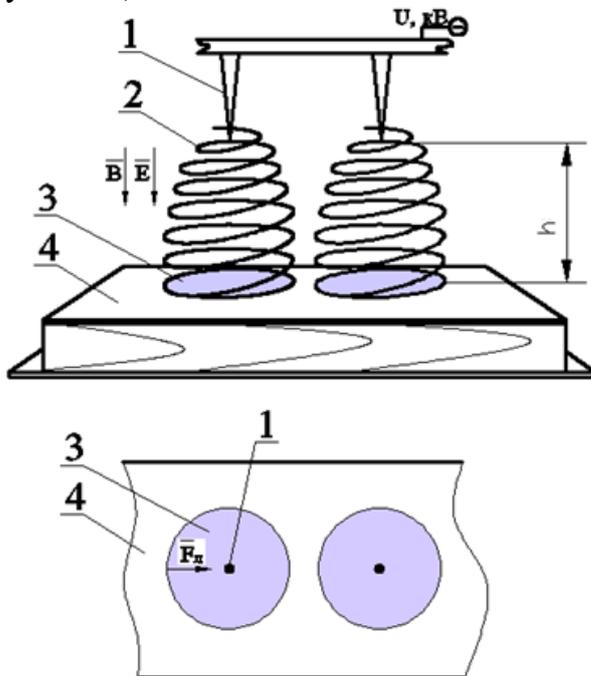


Рисунок 10 – Характер распределения электромагнитного поля между электродами электроэффлювиального излучателя:  
 1 – коронирующий электрод; 2 – траектория движения аэроионов; 3 – «отпечатки» электрического поля на поверхности ЛКП;  
 4 – образец с ЛКП

Известно, что движущиеся электрические заряды создают магнитное поле, направление которого определяется вектором напряженности электрического поля. При совместном действии электрического и магнитного полей на движущиеся аэроионы действует сила Лоренца в электромагнитном поле, значение которой усиливается при сокращении расстояния  $h$  и которая препятствует перекрытию потоков АФК от двух соседних электродов. Траекторию движения АФК в этом случае можно представить в виде спирали, что представлено на рисунке 8. Если рассмотреть электрод излучателя АФК, то на нем вблизи выступов силовые линии наиболее

сильно искривлены и сближены друг с другом. В этих областях напряженность максимальна (рисунок 11).

Напряженность  $E$  в какой-либо точке электрического поля равна градиенту потенциала  $\varphi$  в этой точке, взятому с обратным знаком  $E = -grad\varphi$ . Поле вблизи электрода условно можно считать сферическим. Тогда напряженность поля будет определяться по формуле, В/м:

$$E=U/r, \tag{16}$$

где  $U$  – напряжение электрического тока на электроде, В;  $r$  – расстояние от точки поля с напряженностью  $E$  до центра электрода.

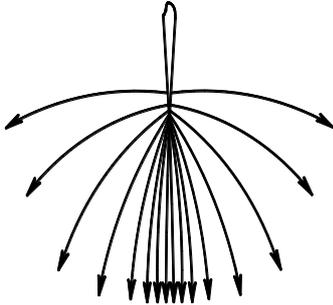


Рисунок 11 – Силовые линии электрического поля вблизи электрода

Электрическое поле аэроионизатора образуется в результате взаимного влияния полей, создаваемых отдельными электродами. Расстояние между электродами  $l$  в диапазоне 0,04 – 0,05 м было предложено А.Л. Чижевским как наиболее рациональное значение, при котором «два электрода дают удвоенное значение силы тока на приемный экран». Теоретически это может быть вызвано величиной суммарного вектора  $CD$  – результата наложения векторов напряженности двух соседних электродов (рисунок 12). При расстоянии больше предложенного диапазона линии напряженности, вероятно, не перекрываются, а при меньшем расстоянии – векторы  $AC$  и  $BC$  меньше, следовательно, уменьшается и результирующий вектор  $CD$ . В соответствии с выражением (16) напряженность прямопропорциональна потенциалу, который, в свою очередь, согласно закону Ома, прямопропорционален силе тока в цепи.

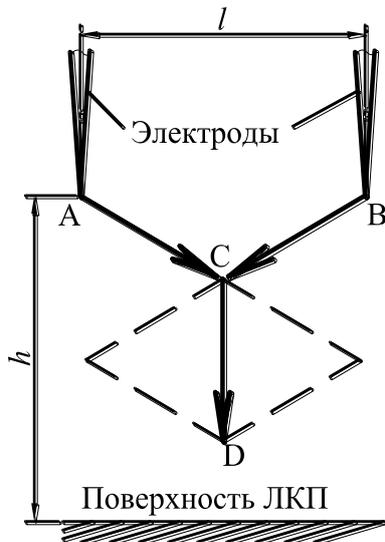


Рисунок 12 – Условная схема наложения полей двух соседних электродов

Однако, в исследованиях А.Л. Чижевского аэроионизатор устанавливался на расстоянии  $h = 2$  м от приемного экрана. В таких условиях угол, при котором линии напряженности не перекрываются составляет  $\alpha = 0,6^\circ$ , т.е. большая их часть складывается и направленное влияние поля единичного электрода выражено не так явно. В действительности же перекрытия поля от двух соседних электродов не происходит ввиду того, что поле одноименного отрицательного знака.

Рассмотрим электрическое поле, создаваемое двумя электродами ЭИ, расположенных на расстоянии  $l = 0,04$  м друг от друга (рисунок 12 - 13) и на расстоянии между концом электрода и поверхностью ЛКП  $h = 0,025$  м; 0,05 м; 0,1 м; 0,15 м; 0,2 м (значение величины  $h$  выбрано на основании экспериментальных

данных). Определим характер распределения напряженности поля на поверхности ЛКП при отклонении векторов от перпендикуляра к поверхности на угол меньше  $\alpha$ , а также при изменении расстояния  $h$ . Решение задачи осуществляем разделив катет (основание) прямоугольного треугольника  $OC$  на равные участки (кратные 0,002 м) и определяем гипотенузу  $AC$  или  $Ax_i$  при уменьшении угла  $\alpha$  (рисунок 13, 14).

$$AX_i = \sqrt{OA^2 + OX_i^2}. \quad (17)$$

При рассмотрении проекции поля на поверхность наблюдается участок ослабленного влияния, где так же необходимо вычислить напряженность. Для этого принимаем в расчет точку Г, максимально удаленную от электрода (рисунок 14). В качестве расстояния в вертикальной плоскости было выбрано пять значений, полученных экспериментальным путем. Расчетные значения напряженности электрического поля представлены на рисунке 15, где наглядно видно, что при сближении ЭИ с поверхностью ЛКП до 0,025 м поле неоднородно и наблюдается снижение напряженности в точке Г (рисунок 14), что может вызывать неравномерность пленкообразования ЛКП.

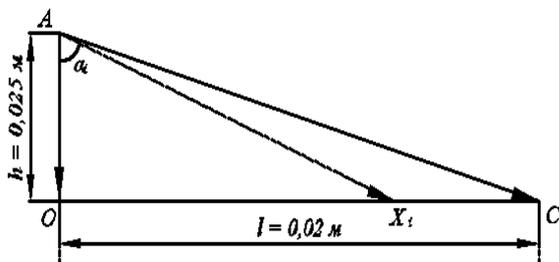


Рисунок 13 – Условная схема распределения векторов напряженности поля на поверхности под электродом

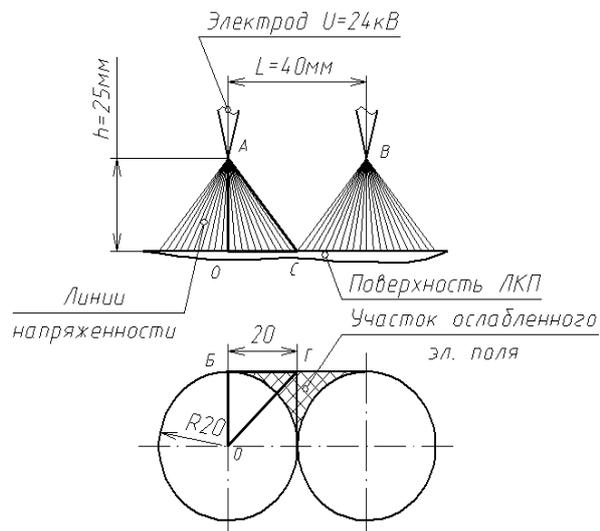


Рисунок 14 – Распределение электрического поля под электродами электроэффлювиального излучателя АЭЭУ

Увеличение расстояния до 0,1 м приводит к выравниванию поля и изменение напряженности не превышает 6 %, а при 0,2 м снижается до 2 %.

Моделирование на ЭВМ с применением специализированных прикладных программ позволило визуализировать электрическое поле и получить наглядное его распределение в воздушном промежутке от электродов до поверхности ЛКП. В программе трехмерного моделирования «КОМПАС» была построена твердотельная модель электродов ЭЭАУ, которая импортируется в программу инженерных расчетов (позволяющей выполнять расчет методом конечных элементов). На модель наносится конечно элементная сетка. При моделировании процесса использовали две модели: конечный элемент типа Electrostatic 121 для 2D моделирования и Electrostatic 122 для 3D.

Для наглядного моделирования и формирования электрического поля в разрядном промежутке подводим на электроды ЭЭАУ напряжение 24 кВ отрицательного знака и создаем второй электрод у основания модели. Масштабируем (сопоставляем) шкалу напряженности E (В/м) электрического поля, создаваемого ЭЭАУ, в соответствии с эмпирическими и расчетными значениями.

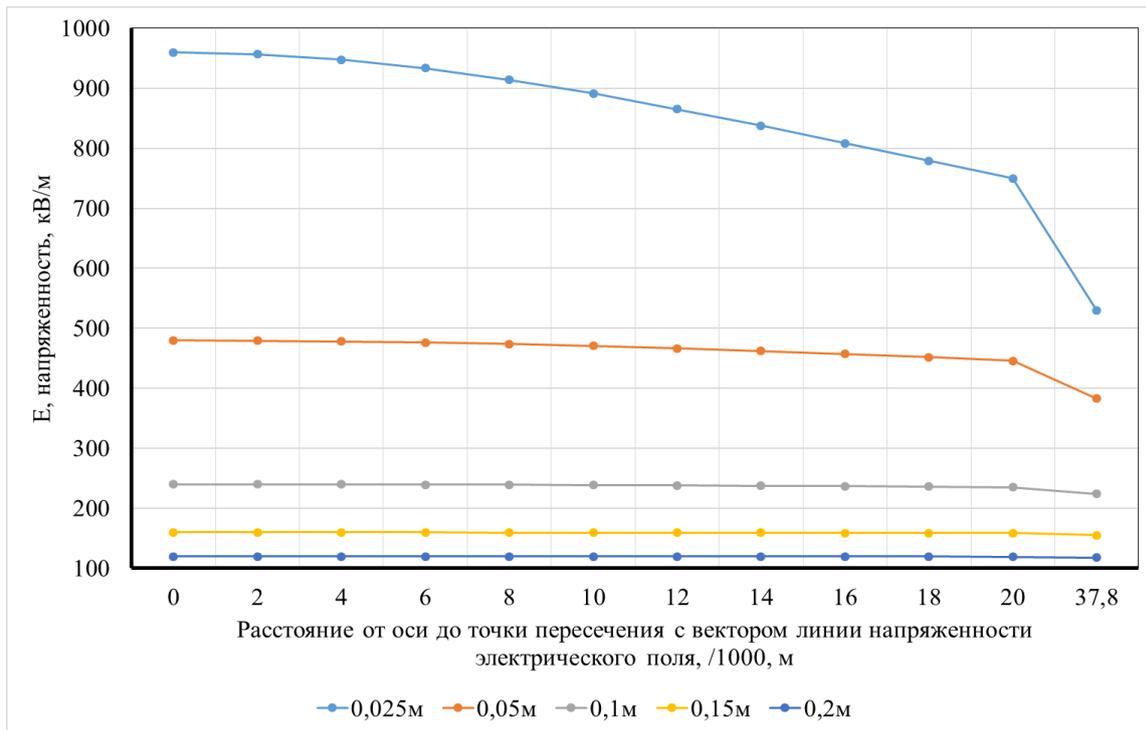


Рисунок 15 – Расчетная зависимость напряженности электрического поля при удалении от электрода ЭИ

Для того, чтобы исследовать влияние соседних электродов на формирование электрического поля их разместили с шагом 0,04 м. В результате получаем визуальное распределение напряженности электрического поля, формируемого отдельными электродами ЭЭАУ, а также геометрические параметры в двумерном (рисунок 16 - 17) и трехмерном пространстве (рисунок 18).

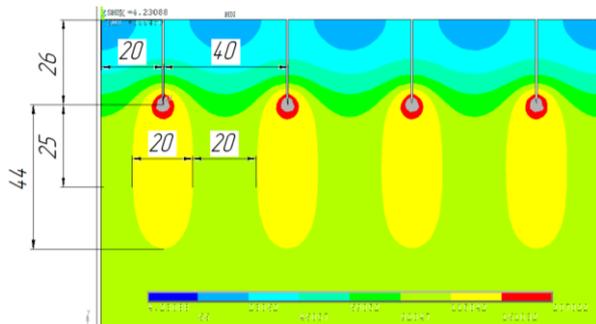


Рисунок 16 – Форма и размер напряженности электрического поля, В/м

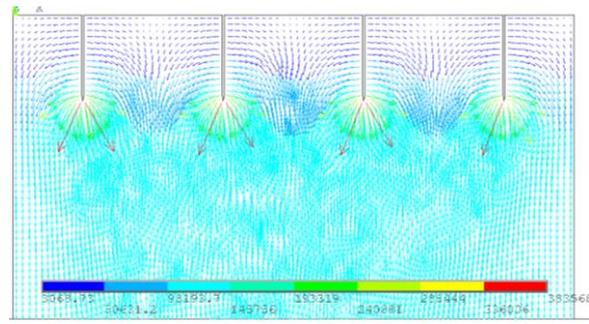


Рисунок 17 – Направленное влияние векторов напряженности электрического поля, В/м

Модель распределения напряженности электрического поля от соседних электродов в виде проекции на поверхность, расположенной на расстоянии 0,025 м, подтверждает результаты натурных экспериментов. На рисунке 16 видно, что при увеличении расстояния от электродов напряженность электрического поля выравнивается. Поле неоднородно, непосредственно под

электродами и его напряженность составила порядка 900 кВ/м, на удалении 0,044 м – 570 кВ/м и дальнейшее увеличение расстояния от 0,044 до 0,2 м приводит к его выравниванию, что подтверждается расчетами и экспериментом.

Следующий этап моделирования в программе инженерных расчетов – это размещение образца из древесины с ЛКП под электродами ЭЭАУ на расстоянии 0,025 м согласно полученным экспериментальным данным для интенсификации пленкообразования полиуретановых ЛКМ (рисунок 19).

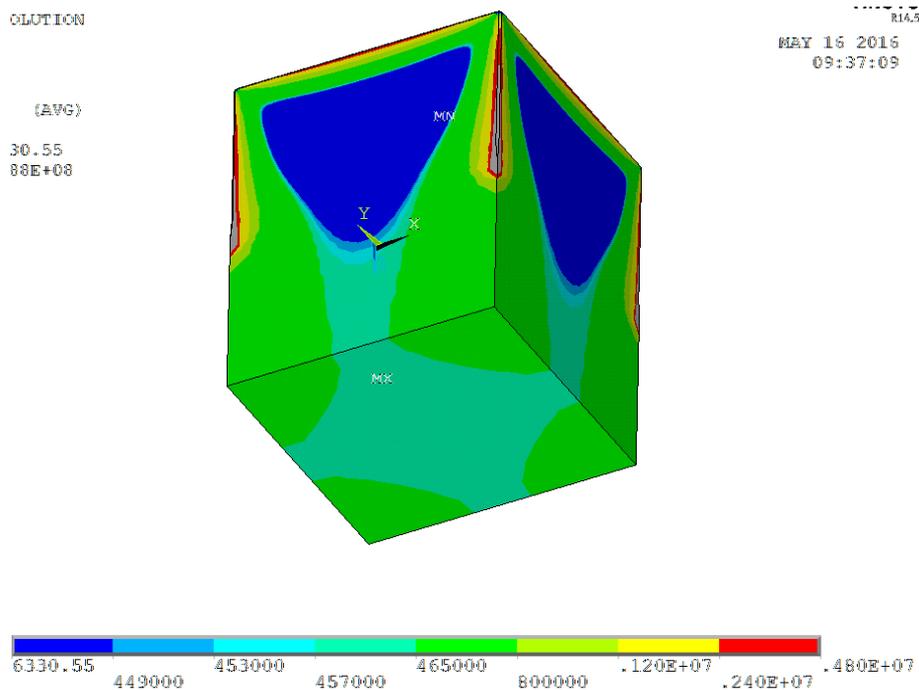


Рисунок 18 – Форма и распределение напряженности электрического поля в 3D пространстве, В/м

В программе были заданы каждому элементу модели соответствующие значения диэлектрической проницаемости. При подведении к электродам постоянного отрицательного напряжения в 24 кВ получили картину распределения напряженности электрического поля до поверхности древесины с ЛКП (рисунок 20).

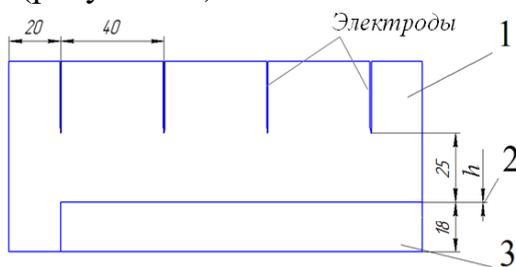


Рисунок 19 – Модель ЭЭАУ:  
1 – воздух; 2 – ЛКП;  
3 – подложка из древесины

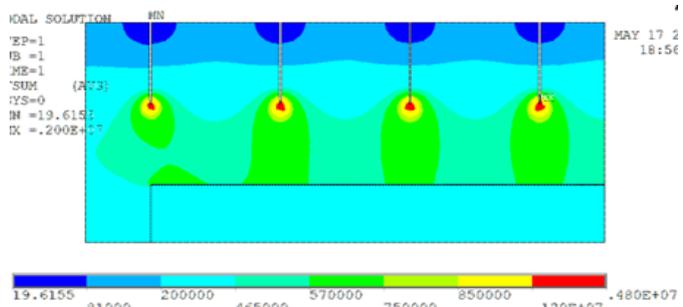


Рисунок 20 – Распределение напряженности электрического поля на поверхности образца с ЛКП, В/м



При соблюдении данных параметров время сушки (отверждения) первого от древесной подложки слоя ЛКП,  $Y \approx 3$  мин 23 с.

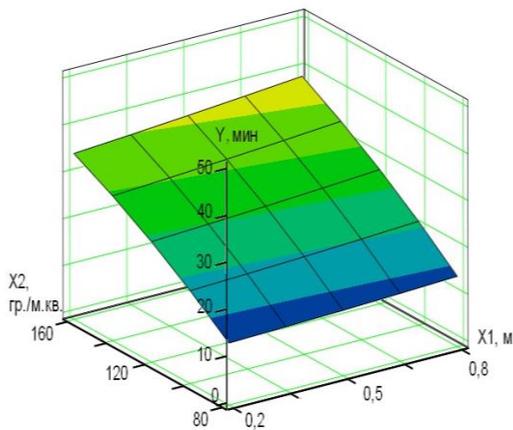


Рисунок 21 – Зависимость времени пленкообразования ЛКП ( $Y$ ) от расхода АКРА лака ( $X_2$ ) и расстояния между излучателем и ЛКП ( $X_1$ )

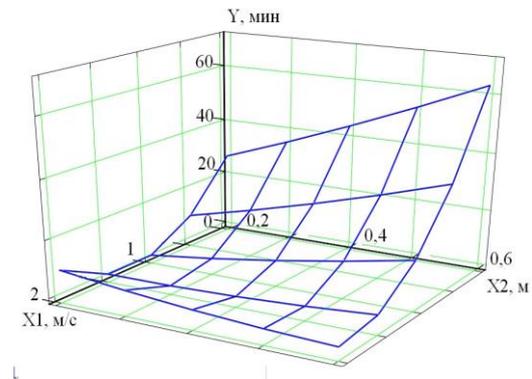


Рисунок 22 – Зависимость времени пленкообразования ЛКП ( $Y$ ) от скорости ионизированного воздуха ( $X_1$ ) и расстояния от ЭИ до поверхности образца ( $X_2$ )

В данном разделе также выполнены исследования физико-механических свойств и химического состава ЛКП, полученных при аэроионизационном способе пленкообразования.

Аэроионизация является физико-химическим способом интенсификации пленкообразования: во-первых, позволяет сообщить материалу дополнительную энергию, а во-вторых, инициирует протекание химической реакции.

Для определения химического состава ЛКМ и твердого покрытия проводилась инфракрасная (ИК) спектроскопия. В результате анализа ИК-спектров веществ составлена их сравнительная характеристика. Химический состав жидкого ВД-АК лака отличается от состава твердых покрытий. В процессе отверждения ЛКП последовательно происходит реакция изомеризации макромолекул лака с образованием сопряженных двойных связей, а затем стадия их дальнейшей полимеризации. В результате реакции двойные связи раскрываются и образуется пространственно сшитая молекула полимера. ИК-спектр покрытий, полученных под действием аэроионизации, иллюстрирует уменьшение полосы пропускания спектра, по которой можно предположить о повышении степени полимеризации, что подтверждается большей твердостью покрытия. Покрытие, отвержденное под действием аэроионизации, в сравнении с отвержденным в естественных условиях, имеет большее число эфирных связей с целлюлозой и, как следствие, повышенную прочность сцепления покрытия с древесной подложкой.

При исследовании толщины ЛКП, отвержденных при аэроионизации, было установлено, что толщина ЛКП, образованного прозрачным ВД-АК грунтом «Экогрунт», отвержденным при аэроионизации, составила 65 - 77 мкм, что меньше, чем толщина ЛКП, отвержденного в естественных условиях (85 мкм),

следовательно, аэроионизация оказывает незначительно влияние на толщину ЛКП, что можно объяснить влиянием электрического поля ЭЭАУ.

Электрическое поле электроэффлювиального аэроионизатора обеспечивает более глубокую степень полимеризации и упорядочивание структуры молекулы полимера с определенным распределением физических и химических связей, следовательно, можно предположить, что аэроионизация позволит устранить внутренние напряжения в отверждаемом покрытии (заявка на изобретение № 2015129302). Для подтверждения озвученной гипотезы был проведен эксперимент, основная цель которого – определить внутренние усадочные напряжения в ЛКП, отвержденном при воздействии аэроионизации. Исследования производили консольным методом, основанным на измерении отклонения от первоначального положения свободного конца консольно закрепленной упругой металлической пластинки с ЛКП, опираясь на теорию деформации и перемещений при изгибе. Нулевое значение свободного конца консоли и перемещения фиксировали визуально на микроскопе МИР-2 (рисунок 23).

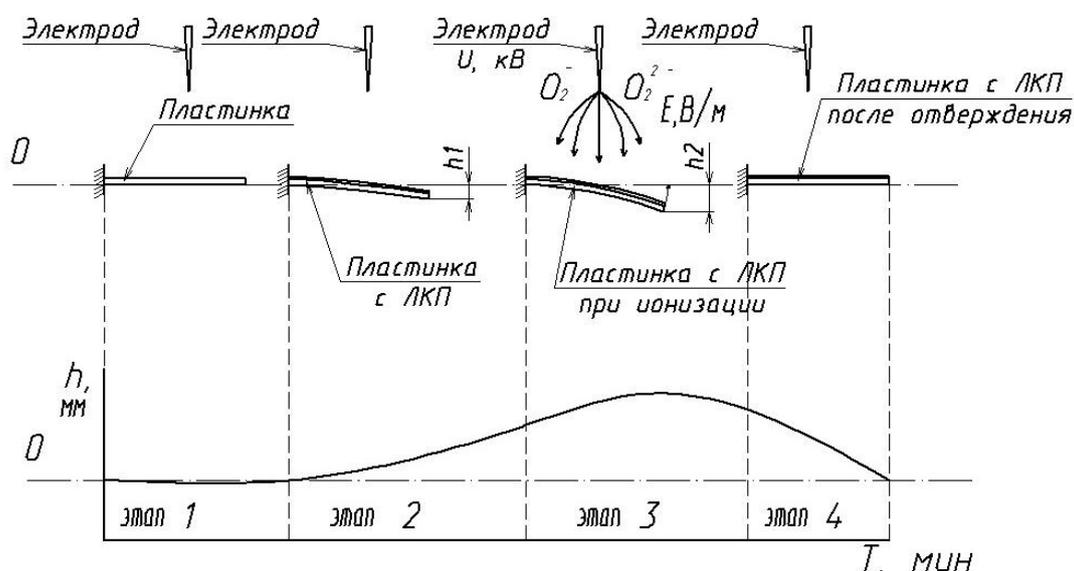


Рисунок 23 – Перемещение металлической пластинки с ЛКП в процессе пленкообразования при аэроионизации

Затем на металлическую пластинку кистью наносили лак ВД-АК «Эколак» и снова фиксировали положение свободного конца консоли. На электродный излучатель ЭЭАУ (электрод), размещенный над покрытием, подавали напряжение  $U = 24$  кВ. По достижению времени практического высыхания покрытия отключали подачу напряжения на электродный излучатель ЭЭАУ и также фиксировали перемещения.

Электрическое поле, создаваемое ЭИ, устраняет внутренние усадочные напряжения в ЛКП, отверждаемом на металлической пластинке. По истечении времени практического высыхания ЛКП свободный конец консольно закрепленной пластинки возвращается в исходную нулевую точку и сохраняет это положение (по истечению суток). Создание на поверхности энергии от

электрического поля ЭИ уменьшает поверхностное натяжение ЛКМ и способствует быстрому обезвоживанию покрытия. Можно условно принять, что покрытие становится «растянутым» на поверхности подложки под воздействием электрического поля аэроионизационной сушки и, как следствие, напряжения присутствуют в ЛКП при сушке. После аэроионизационного отверждения внутренние усадочные напряжения в ЛКП нейтрализуются.

В работе выявлено влияние аэроионизации на водостойкость и влагопоглощение ЛКП, образованных ВД-АК ЛКМ при аэроионизации. Испытание полученных покрытий на водостойкость проводили по разработанной методике (патент №2557367), Образцы укладывали покрытием на стакан с дистиллированной водой, налитой с мениском, и выдерживали в течении суток. Среднее арифметическое количество воды, поглощенной образцами  $Q$ , составило 0,132 г независимо от условий пленкообразования ЛКП. Для более полного сравнения стойкости ЗДП к действию воды определили влагопоглощение покрытий методом, основанным на способности пленки сорбировать воду. Значение влагопоглощения, полученное в результате проведенных испытаний, показало, что образцы, подвергшиеся воздействию аэроионизации, способны сорбировать меньшее количество воды (8 %), чем образцы, отвержденные в естественных условиях (10 %).

**В пятой главе «Исследование влияния аэроионизации на процесс пленкообразования ЛКП древесины полиуретановыми и пентафталевыми ЛКМ»** проведены экспериментальные исследования влияния аэроионизации на механизм пленкообразования двух-компонентных полиуретановых и пентафталевых лаков на древесине.

На основе экспериментальных данных в результате полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов получена математическая модель процесса интенсификации пленкообразования полиуретанового ЛКП при аэроионизации в виде:

$$y = -64,3x^3 + 119,6x^2 - 72,7x + 26,11, \quad (20)$$

где  $y$  – время пленкообразования, мин;

$x$  – напряженность поля на поверхности ЛКП,  $10^6 \cdot \text{В/м}$ .

Адекватность уравнения регрессии подтверждается коэффициентом аппроксимации  $R^2=0,99$ . Построена графическая зависимость влияния напряженности электрического поля ЭИ на время пленкообразования ЛКП (рисунок 24).

Время пленкообразования однослойного полиуретанового ЛКП в естественных условиях составляет  $25 \div 30$  мин, что в  $1,5 \div 2$  раза больше, чем при аэроионизационном способе отверждения.

Опытным путем установлено, что расстояние между электродами и поверхностью ЛКП должно быть 0,025 м, но в этом случае поле становится неоднородным и оказывает влияние на качество поверхности отверждаемого ЛКП с появлением круглых матовых пятен («отпечатков» электрического поля формируемого отдельными электродами) (рисунок 25). В результате эксперимента подтверждено теоретическое предположение влияния неравномерности электрического поля на пленкообразование полиуретановых ЛКМ.

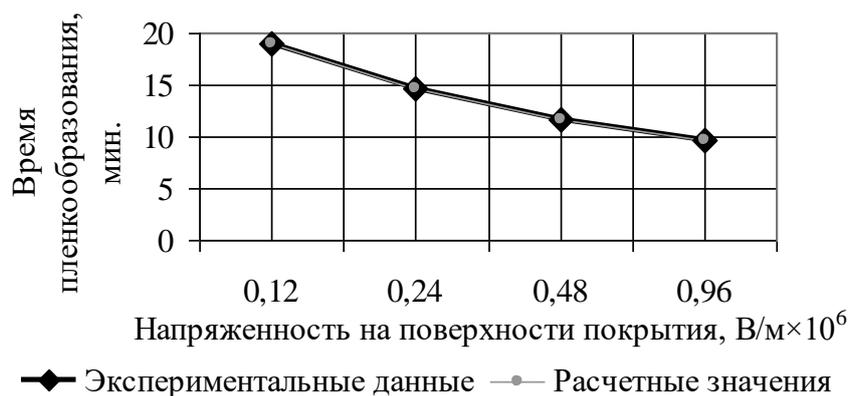


Рисунок 24 - Влияние аэроионизации на времена пленкообразования ЛКП, образованного полиуретановым лаком CEROPAC 20 Gloss

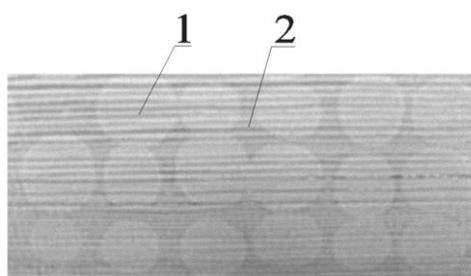


Рисунок 25 – «Отпечатки» на поверхности ЛКП при аэроионизационном пленкообразовании:  
1 – участок ЛКП, расположенный непосредственно под электродом во время пленкообразования; 2 – участок ЛКП на некотором расстоянии от электродов

Для получения равномерного распределения электрического поля на поверхности сохнущего ЛКП при расстоянии от электрода 0,025 м и шагом между электродами 0,04 м необходимо добиться перекрытия полей от соседних электродов. Такое воздействие возможно при перемещении образца относительно электродов по синусоидальной траектории (для перекрытия отпечатков их полей) в горизонтальной плоскости, что позволило перекрыть влияние электромагнитных полей от соседних электродов и обеспечить равномерность формирования покрытия (рисунок 26 а). В результате наблюдается сокращение времени пленкообразования ЛКП на всей поверхности образца в 1,5 – 2 раза по сравнению с естественными условиями. Покрытие приобретает при таком режиме сушки матовость. Применение двойной электродной сетки (рисунок 26 б) при попеременной подаче электрического тока на дополнительные и основные электроды также обеспечит перекрытие полей и их равномерное влияние от электродов излучателей. Энергетическое воздействие электромагнитного поля и образующихся в нем направленных потоков аэроионов способствует перемешиванию ЛКМ в поверхностном слое ЛКП, повышению скорости испарения растворителя и протекания химической реакции пленкообразования. Предложенная теория распределения напряженности электрического поля на поверхности ЛКП подтверждается результатами экспериментальных исследований при отверждении полиуретанового лака. На время пленкообразования и равномерность распределения покрытия на древесине оказывает влияние шаг между электродами и напряженность электрического поля. Следует отметить, что при

Для получения равномерного распределения электрического поля на поверхности сохнущего ЛКП при расстоянии от электрода 0,025 м и шагом между электродами 0,04 м необходимо добиться перекрытия полей от соседних электродов. Такое воздействие возможно при перемещении образца относительно электродов по синусоидальной траектории (для перекрытия отпечатков их полей) в горизонтальной плоскости, что позволило перекрыть влияние электромагнитных полей от соседних электродов и обеспечить равномерность формирования покрытия (рисунок 26 а). В результате наблюдается сокращение времени пленкообразования ЛКП на всей поверхности образца в 1,5 – 2 раза по сравнению с естественными условиями. Покрытие приобретает при таком режиме сушки матовость. Применение двойной электродной сетки (рисунок 26 б) при попеременной подаче электрического тока на дополнительные и основные электроды также обеспечит перекрытие полей и их равномерное влияние от электродов излучателей. Энергетическое воздействие электромагнитного поля и образующихся в нем направленных потоков аэроионов способствует перемешиванию ЛКМ в поверхностном слое ЛКП, повышению скорости испарения растворителя и протекания химической реакции пленкообразования. Предложенная теория распределения напряженности электрического поля на поверхности ЛКП подтверждается результатами экспериментальных исследований при отверждении полиуретанового лака. На время пленкообразования и равномерность распределения покрытия на древесине оказывает влияние шаг между электродами и напряженность электрического поля. Следует отметить, что при

уменьшении напряженности поля на поверхности покрытия под электродом с  $0,96 \cdot 10^6$  В/м до  $0,12 \cdot 10^6$  В/м эффективность аэроионизации для ускорения сушки полиуретановых ЛКМ сокращается.

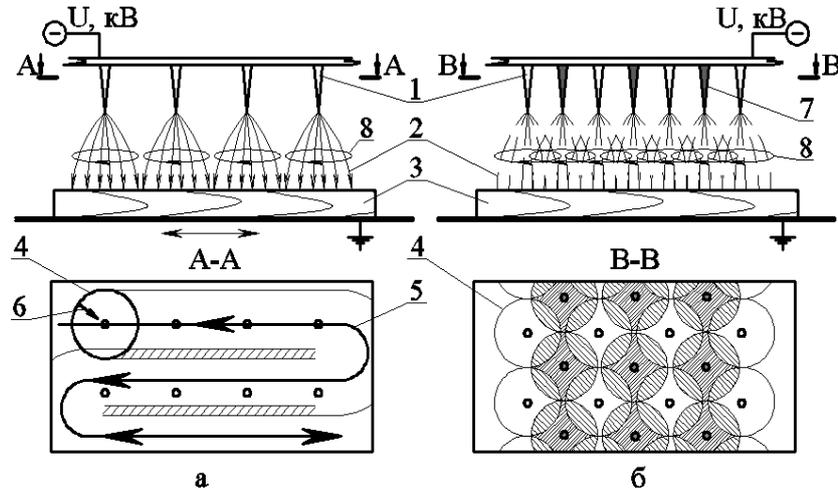


Рисунок 26 – Способы «равномерного» распределения электрического поля от электродов ЭЭАУ: а – движения образца относительно электродов; б – использование двойной сетки электродов; 1 – электроды; 2 – поток ионизированных молекул воздуха; 3 – образцы с ЛКП; 4 – «отпечатки» электромагнитного поля; 5 – направление движения образца; 6 – направление силы Лоренца; 7 – дополнительные электроды; 8 – направление линий магнитной индукции

Энергия электрического поля ионизатора  $W$  – это его работа, затраченная на пленкообразование ЛКП. Электрическое поле ЭЭАУ при некотором приближении можно условно считать однородным, тогда его энергию на поверхности ЛКП можно рассчитать по приведенной выше формуле (4). Расчет количества его энергии  $W$  на поверхности подложки с ЛКП от одного электрода с радиусом проекции поля на поверхность  $R = 0,02$  м представлен на рисунке 27.

По определению, скорость пленкообразования или реакции полимеризации – это число элементарных актов химических превращений, происходящих в единицу времени в единице объема. Возможность химических превращений возникает при столкновении определенным образом ориентированных молекул, обладающих достаточной энергией. Количественно это требование выражается энергией Гиббса активации  $\Delta G$  и определяется выражением, Дж:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (21)$$

где  $\Delta H$  – энтальпия активации (энергия, необходимая для перехода веществ в состояние активного комплекса), Дж;

$\Delta S$  – энтропия активации (количественная мера беспорядка), Дж/К;

$T$  – температура реакции, К.

Полученные расчетным путем значения  $W$  (рисунок 27) превышают энергию активации химических реакций пленкообразования полимерных ЛКП, которое составляет для полиуретанов  $\Delta H = (3,5 \div 7) 10^{-20}$  Дж.

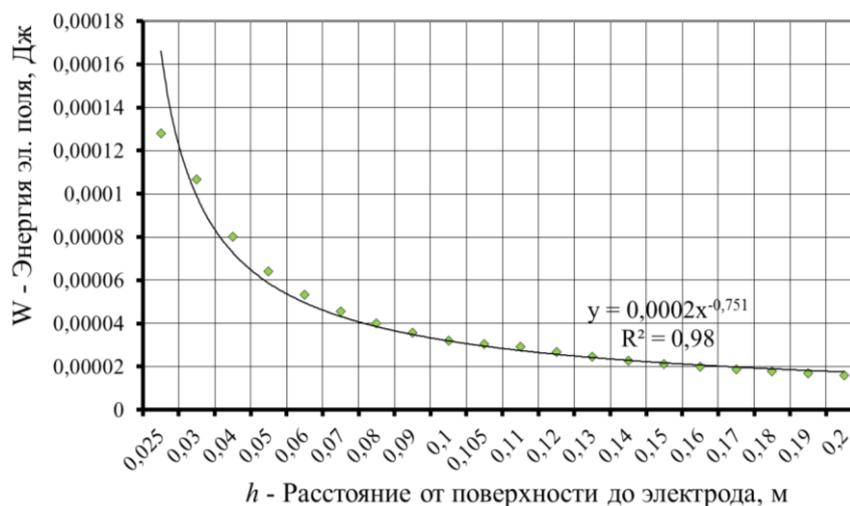


Рисунок 27 – Зависимость энергии электрического поля  $W$ , формируемого одним электродом ЭЭАУ с радиусом поля  $R = 0,02$  м до поверхности с ЛКП

Кроме того, электрическое поле оказывает поляризующее и ориентирующее действие на полярные и неполярные молекулы. Таким образом при аэроионизации происходит повышение энтальпии активации  $\Delta H$  и уменьшение энтропии активации  $\Delta S$ , что ведет к повышению энергии Гиббса активации и более быстрому протеканию химической реакции. Кроме того, влияние аэроионов оказывает модифицирующее действие на полиуретановые ЛКП, позволяет получить матовые покрытия без использования специальных добавок.

**В работе исследовано влияние аэроионизации на процесс пленкообразования пентафталевых лаков на древесине и их свойства.** Алкидные смолы представляют собой высыхающие масла с повышенной функциональностью. В то же время они содержат свободные карбоксильные (-COOH) и гидроксильные группы (-OH). Присутствие этих групп позволяет предположить, что под воздействием внешнего поля молекула алкидной смолы способна поляризоваться, т. е. гидроксильные и карбоксильные группы поворачиваются по направлению линий напряженности поля к древесной подложке, а остальные части молекулы – в противоположную сторону. Таким образом электрическое поле помогает длинным олигомерным молекулам смолы упорядочиться и развернуться двойными связями в сторону АФК.

Предполагаемый механизм влияния электрического поля на молекулу алкидной смолы схематично изображен на рисунке 28. После сближения АФК с реакционными центрами молекулы алкидной смолы начинается процесс присоединения кислорода: происходит разрыв  $\pi$ -связи углерод – углерод и переход ее в  $\sigma$ -связь, при этом на концевом атоме появляется неспаренный электрон (образуется свободный радикал). Образовавшийся радикал присоединяется к другой молекуле алкидной смолы в месте имеющейся у нее двойной связи с

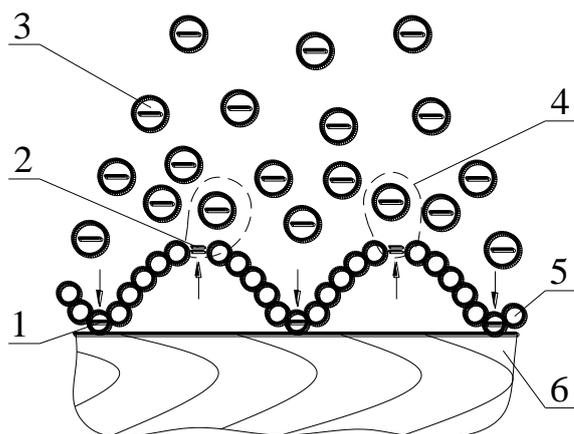


Рисунок 28 – Гипотетический механизм влияния электрического поля на молекулу алкидной смолы. 1 – полярные группы –ОН и –СООН; 2 – двойные связи в молекуле алкидной смолы; 3 – АФК; 4 – сближение АФК и участков молекулы алкидной смолы с двойными связями; 5 – структурные элементы молекулы алкидной смолы; 6 – древесная подложка

образованием нового радикала и т. д. Таким образом происходит рост цепи. Обрыв цепи может произойти в результате столкновения двух растущих радикалов. На механизм иницирования в жидкой фазе (растворе) значительное влияние оказывает и растворитель. Образующиеся радикалы, окруженные молекулами растворителя, находятся как бы в «клетке», препятствующей удалению их друг от друга. До выхода из клетки молекулы соударяются между собой, вступая в обратную реакцию рекомбинации, что значительно тормозит процесс отверждения

ЛКМ. В результате исследования влияния электрического поля ЭЭАУ на процесс испарения уайт-спирита, как растворителя, входящего в состав ПФ ЛКМ установлено, что с повышением напряженности поля время его испарения сокращается в 3,6 раза по сравнению с естественными условиям. Таким образом АФК являются инициаторами реакции радикальной полимеризации, протекающей при отверждении ЛКП на основе алкидных смол.

С другой стороны при интенсификации процесса пленкообразования аэроионизацией очевидно влияние электрического поля:

- во-первых, оно упорядочивает олигомерные молекулы алкидных смол;
- во-вторых, активирует молекулы кислорода, превращая их из стабильных бирадикалов в активные заряженные частицы;
- в-третьих, сокращает время испарения растворителя, исключая его отрицательное влияние на процесс отверждения.

По результатам статистическо-критериальной обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость времени пленкообразования лака ПФ-157 от управляемых факторов при аэроионизационном способе отверждения в натуральных единицах

$$Y=22,72+6,563X_2-0,432X_3. \quad (22)$$

Адекватность уравнения подтверждается критерием Фишера. По уравнению регрессии построена поверхность (рисунок 27), показывающая зависимость времени пленкообразования алкидного лака ПФ-157 от варьируемых факторов.

Анализ поверхности на рисунке 29 позволяет сделать вывод о направлении влияния факторов  $X_2$  и  $X_3$  на выходной параметр  $Y$ . При уменьшении

расстояния между образцом и ионизатором в вертикальной плоскости и увеличении напряжения, подаваемого на излучатель аэроионизатора, время пленкообразования ЛКП сокращается.

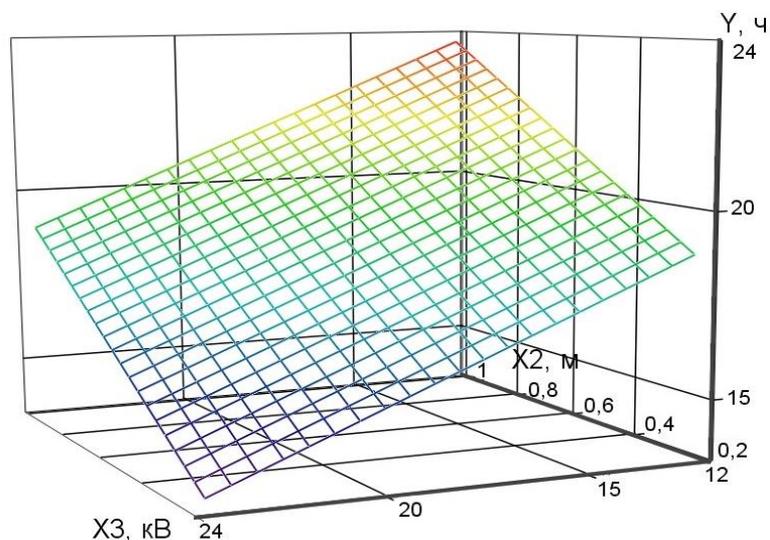


Рисунок 29 – Зависимость времени пленкообразования (Y) алкидного лака ПФ-157 от расстояния между образцом и ионизатором в вертикальной плоскости (X<sub>2</sub>) и напряжением на ВВГ (X<sub>3</sub>)

Получен ИК-спектр лака ПФ-157, отвержденного на древесине при аэроионизации, он показывает меньшую глубину пропускания спектра по сравнению с лаком, отверженным в естественных условиях.

Можно утверждать, что аэроионизация оказывает влияние на упорядочивание молекулы алкидной смолы и при отверждении образуется покрытие с более частыми пространственными связями, что объясняет увеличение физико-механических показателей прочности ЛКП.

**В шестой главе** «Реализация результатов исследований и оценка экономической эффективности» разработан технологический процесс формирования ЛКП на изделиях из древесины с применением аэроионизационного способа пленкообразования ВД-АК, УР и ПФ лаками.

Выполнена оценка физико-механических свойств ЛКП, полученных на древесине по разработанной технологии с применением аэроионизационного способа отверждения. Показатели твердости и внешнего вида покрытий приведены в таблице.

В результате проведенных испытаний ЛКП на адгезионную прочность методом решетчатых надрезов покрытия имеют высокую адгезию к древесной подложке. Значение влагопоглощения показало, что образцы (лак ВД-АК «Эколак»), подвергавшиеся воздействию аэроионизации, способны сорбировать меньшее количество воды, чем образцы, отвержденные в естественных условиях. У всех покрытий, образованных при аэроионизационном способе пленкообразования, наблюдается снижение блеска, но снижение блеска характерно для всех способов ускоренного отверждения ЛКП.

Таблица - Физико-механические показатели ЛКП, полученных в естественных условиях и под действием аэроионизации

| ЛКМ                  | Условия сушки ЛКП (пленкообразования) | Склерометрическая твердость, Н по ГОСТ 27326-87 | Твердость по М-3, усл. ед. по ГОСТ 5233-89 | Внешний вид по ГОСТ 29319-92      |
|----------------------|---------------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| Лак ПФ-157           | Естественные условия                  | 0,65  | 0,41                                       | Поверхность гладкая, без дефектов |
|                      | АЭЭУ                                  | 0,84  | 0,47                                       |                                   |
| Лак ЭКОЛАК           | Естественные условия                  | 0,6   | 0,61                                       | Поверхность гладкая, без дефектов |
|                      | АЭЭУ                                  | 0,7   | 0,64                                       |                                   |
| Лак СЕРОРАС 20 Gloss | Естественные условия                  | 1,27  | 0,57                                       | Поверхность гладкая, без дефектов |
|                      | АЭЭУ                                  | 1,32  | 0,57                                       |                                   |

В технологии формирования ЛКП применение аэроионизации возможно реализовать посредством передвижных стеллажей (рисунок 30), используемых на участках отделки (патент №121709, №148422). В работе выполнен расчет производительности оборудования и определена годовая программа отделки квадратных метров изделий из древесины с применением аэроионизационного способа пленкообразования покрытий.



Рисунок 30 – общий вид стеллажа с АЭЭУ (3D модель слева; фотография справа)

В этом же разделе приведена оценка экономической эффективности внедрения аэроионизации в технологию отделки в расчете на квадратный метр отделки изделий из древесины ВД-АК ЛКМ. В результате сокращения времени процесса пленкообразования ЛКП сокращается общий цикл отделки изделий из древесины и возможно увеличение объема выпуска продукции.

При сравнении технологии отделки изделий из дерева, где применяется ускоренная сушка на стеллажах в конвективной камере с технологией, применяемой специальные стеллажи для аэроионизационной сушки ЛКП получили, что при одинаковом объеме производства в 13826 м<sup>2</sup> цеховая себестоимость отделки 1 м<sup>2</sup> уменьшилась с 224,46 руб. до 203,06 руб.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

Изучение вопросов применения аэроионизации в технологии формирования ЛКП древесины позволяет сделать следующие основные выводы и рекомендации:

1. Аэроионизационный способ позволяет сократить время пленкообразования ЛКП древесины, образованных водно-дисперсионными акриловыми, полиуретановыми и пентафталевыми ЛКМ. Интенсификация процесса пленкообразования достигается за счет воздействия электрического поля ЭЭАУ и АФК. При этом ускоряются процессы, протекающие на всех этапах перехода ЛКМ из жидкого в твердое состояние и повышаются физико-механические показатели ЛКП.

2. Исследования кинетики испарения растворителей ЛКМ показали, что перемещение АФК вдоль линий силового электрического поля от электродов ЭЭАУ к поверхности ЛКП создает ионный ветер в направлении поверхности испарения жидкости, а также приводит к усилению процессов электризации молекул на границе с воздухом, переводя их в возбужденное состояние, повышается поверхностное испарение. Экспериментально подтверждено, что количество испарившегося растворителя с увеличением напряженности электрического поля возрастает. Процесс испарения воды под действием электрического поля напряженностью  $E = 120$  кВ/м протекает в 6,4 раза, а Уайт-спирита в 3,6 раз эффективнее по сравнению с естественными условиями.

3. При наложении электрического поля ЭЭАУ происходит зарядка на молекулярном уровне, возникающие связи вызывают перераспределение электронов на границе раздела двух сред и возникновение двойного электрического слоя в ЛКМ, распределенном на подложке. Граничные слои контактирующих материалов (дисперсная фаза, дисперсная среда, пленкообразователь, растворитель, дерево, воздух) получают разноименные заряды, взаимодействие которых вызывает ускорение процесса перемещения растворителя из слоя ЛКП к поверхности за счет электроосмоса и капиллярных сил у ВД-АК ЛКМ и повышения коэффициента диффузии у ПФ и УР.

4. Экспериментальные и теоретические исследования процесса пленкообразования ЛКП на древесине при аэроионизации позволяют утверждать о

преобладании электрической теории образования адгезионных связей, возникающих между контактирующими поверхностями ЛКП – древесина. Исследования коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  и краевого угла смачивания  $\theta$  позволили утверждать, что аэроионизационный способ интенсификации пленкообразования снижает краевой угол смачивания и, как следствие, повышает адгезию ЛКМ к подложке, что обеспечивается за счет создания на поверхности энергии от электрического поля аэроионизатора. Исследования химического состава ЛКП, образованных при аэроионизации, также подтвердили повышение адгезионной прочности к древесной подложке, что достигается за счет образования водородных связей при взаимодействии гидроксильных групп древесины с карбоксильными группами акрилового сополимера, а также повышением степени полимеризации за счет уменьшения глубины пропуска ИК-спектра.

5. Построенные модели 2D и 3D визуализации электрического поля, создаваемого соседними электродами ЭЭАУ, отражают реальный характер распределения электрического поля на электродах. Поле неоднородно, непосредственно под электродами на расстоянии от 0,025 до 0,044 м, дальнейшее увеличение расстояния до 0,1 – 0,2 м приводит к выравниванию напряженности, что подтверждается расчетами и экспериментом.

6. Разработан способ снятия усадочных напряжений в отвержденном ЛКП, который достигается воздействием электрического поля и сообщения заряда пленкообразующей системе.

7. Определены оптимальные параметры режима интенсификации пленкообразования ЛКП древесины ВД-АК ЛКМ за счет варьирования их расходом и расстоянием от ЭИ до покрытия: время пленкообразования  $Y=11,87$  мин.; расход лака ВД-АК  $80 \text{ г/м}^2$ ; расстояние от ЭИ до ЛКП 0,2 м; напряжение на ЭИ 24 кВ. Оптимальные параметры режима интенсификации пленкообразования ЛКП древесины ВД-АК ЛКМ за счет варьирования скоростью потока ионизированного воздуха и расстояния от ЭИ до покрытия: время отверждения ЛКП  $Y \approx 3 \text{ мин } 23 \text{ с.}$ ; скорость воздушного потока,  $X1 = 1,5 \text{ м/с}$ ; расстояние от ЭИ до поверхности ЛКП,  $X2 = 0,311 \text{ м}$ ; напряжение на ЭИ  $U=24 \text{ кВ}$ .

8. Установлено, что напряженность электрического поля ЭЭАУ и характер его распределения оказывают решающее значение на пленкообразование ЛКП древесины полиуретановыми ЛКМ. Опираясь на теорию дрейфа заряженных частиц в электромагнитном поле, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено влияние распределения электрического поля вблизи электродов ЭЭАУ на процесс пленкообразования полиуретановых ЛКМ. Для получения равномерного распределения электрического поля на поверхности ЛКП необходимо обеспечить перекрытие полей от соседних электродов.

9. В результате расчета энергии электрического поля от электродов электроэффлювального аэроионизационного устройства установлено, что при аэроионизационном способе пленкообразования происходит повышение энтальпии активации  $\Delta H$  и уменьшение энтропии активации  $\Delta S$ , что ведет к

повышению энергии Гиббса активации и более быстрому протеканию химической реакции отверждения полиуретановых ЛКП.

10. Определены оптимальные параметры режима интенсификации пленкообразования прозрачных полиуретановых ЛКП на древесине: напряжение на излучателе ЭЭАУ  $U=24$  кВ; расстояние от поверхности ЛКП до электродов  $h=0,025$  м; шаг между электродами  $S=0,04$  м; перемещение образца по синусоидальной траектории в горизонтальной плоскости (или применении сдвоенного электродного излучателя).

11. Содержание в составе алкидных смол свободных карбоксильных (-COOH) и гидроксильных групп (-OH) позволяет предположить, что под воздействием внешнего поля молекула ненасыщенной алкидной смолы способна поляризоваться, т. е. поворачиваются названными группами по направлению линий напряженности поля к древесной подложке, а остальные части молекулы в противоположную сторону. Таким образом электрическое поле помогает длинным олигомерным молекулам смолы упорядочиться и развернуться двойными связями в сторону АФК и ускорить процесс полимеризации за счет присоединения кислорода. Отрицательные АФК оказывают влияние на сиккативы, входящие в состав пентафталевого лака, и ускоряют их распад на активные радикалы, что интенсифицирует реакцию полимеризации или пленкообразования пентафталевого ЛКП.

12. Определены оптимальные параметры режима интенсификации пленкообразования пентафталевого лака ПФ-157 на древесине при аэроионизации. При соблюдении расстояния от электродов ЭИ до поверхности покрытия 0,2 м и напряжении, подаваемом на излучатель 24 кВ, время отверждения ЛКП составит 13,87 часа.

13. Аэроионизационный способ интенсификации пленкообразования ЛКП на древесине обеспечивает сокращение энергопотребления в сравнении с существующими способами ускоренной сушки ЛКП. При аэроионизации потребление электроэнергии составляет 0,12 кВт·ч.

14. Разработан технологический процесс формирования ЛКП с применение аэроионизационного способа пленкообразования. Реализация которого достигается посредством применения специальных передвижных стеллажей для аэроионизационной сушки ЛКП и разработанных параметров режима для ВД-АК, ПФ и УР ЛКМ.

15. Расчеты технико-экономической эффективности показали, что цеховая себестоимость отделки  $1 \text{ м}^2$  с применением аэроионизационных методов составит 203,06 рубля, что на 19,31 рубля меньше базового проекта и на 21,4 рубля меньше чем, в проекте, предусматривающим сушку в конвективной сушильной камере.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:  
в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Газеев М.В. Аэроионизационный способ отверждения лакокрасочных покрытий, образованных водными лаками / М.В. Газеев, И.В. Жданова, А.В. Старцев // Деревообрабатывающая промышленность. 6. 2007. – С. 19 – 21.

2. Газеев М.В. Физика аэроионизации в технологии формирования лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Выпуск 189.: СПбЛТА, 2009. – С. 172 – 180.

3. Газеев М.В. Исследование процесса пленкообразования полиуретановых лакокрасочных покрытий на древесине при аэроионификации / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Известия высших учебных заведений «Лесной журнал» №5, Материалы, посвященные 80-летию УГЛТУ, Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет. 2010. – С. 97 – 101.

4. Жданова И.В. Влияние аэроионификации на процесс формирования защитно-декоративных покрытий на древесине водными акриловыми лакокрасочными материалами / И.В. Жданова, М.В. Газеев, Н.Ф. Жданов, Н.С. Васянина // Вестник Казанского технологического университета №19, КНИТУ. – Казань, 2012. – С. 56 – 59.

5. Газеев М.В. Исследование отверждения лакокрасочного покрытия образованного пентафталевым лаком на древесине при аэроионизации / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Современные проблемы науки и образования/ технические науки, №6, 2013 г. URL.:<http://www.science-education.ru/113-11598> (дата обращения 20.01.2014).

6. Газеев М.В. Аэроионизационный способ интенсификации пленкообразования лакокрасочных покрытий на древесине и древесных материалах / М.В. Газеев // Вестник московского государственного университета леса – Лесной вестник. МГУЛ, №2, 2014. – С. 117 – 121.

7. Газеев М.В. Смачивание поверхности древесины водно-дисперсионным лакокрасочным материалом при аэроионизации / М.В. Газеев, Е.А. Газеева, Н.Ф. Жданов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4; URL: <http://www.science-education.ru/118-13843> (дата обращения: 08.07.2014).

8. Газеев М.В. Исследование поверхности защитно-декоративного покрытия, образованного водно-дисперсионным лаком на древесине при аэроионизации / М.В. Газеев, Е.А. Газеева, Е.В. Тихонова, В.А. Ушакова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/116-12534> (дата обращения: 27.03.2014).

9. Газеев М.В. Физические основы взаимодействия водно-дисперсионного акрилового лакокрасочного материала с подложкой из древесины при аэроионизации / М.В. Газеев, Е.А. Газеева // Лесотехнический журнал. Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия №1(17) Т. 5, 2015 г. – С. 144 – 152.

10. Газеев М.В. Аэроионизационная сушка как способ снятия внутренних напряжений в лакокрасочных покрытиях / М.В. Газеев, Ю.И. Ветошкин, Е.А. Газеева // Вестник Казанского технологического университета Т. 18, №15, КНИТУ. – Казань, 2015. – С. 88 – 90.

11. Газеев М.В. Исследование режимных параметров интенсификации сушки лакокрасочного покрытия, образованного водно-дисперсионным акриловым лаком, на древесине при электроэфлювиальной аэроионизации / М.В. Газеев, Е.А. Газеева, А.Ф. Яруллин // Вестник Казанского технологического университета Том. 18, №15, КНИТУ. – Казань, 2015. – С. 110 – 112.

12. Игнатъева Г.И. Влияние аэроионизации на водостойкость защитно-декоративного покрытия / Г.И. Игнатъева, М.В. Газеев, Ю.И. Ветошкин, Н.Ф. Жданов, Т.О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. Т.18, №18, КНИТУ. – Казань, 2015. – С. 108 – 110.

13. Сафин Р.Г. Аэроионизация и эффективность её применения для ускорения сушки лакокрасочных покрытий на древесине / Р.Г. Сафин, М.В. Газеев, Т.О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. Т. 18, №22, КНИТУ. – Казань, 2015. – С. 54 – 58.

### **Патенты**

14. Заявка на изобретение №2015129302, Дата подачи 16.07.2015г., Дата публикации 23.01.2017 г., Бюл. №3, Способ снятия внутренних напряжений в полимерных покрытиях. Газеев М.В., Ветошкин Ю.И., Газеева Е.А. // ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» URL: [http://www1.fips.ru/wps/por-tal/IPS\\_Ru#1489220115757](http://www1.fips.ru/wps/por-tal/IPS_Ru#1489220115757) (дата обращения: 10.03.2017).

15. Патент №121709, Российская Федерация, МПК А47В 51/00. Стеллаж для сушки и отверждения лакокрасочных покрытий щитовых щитовых и поганажных изделий из древесины и древесных материалов / Ветошкин Ю.И., Газеев М.В., Жданова И.В., Беспалов Н.Н., Тихонова Е.В. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Уральский гос. лесотехн. ун-т. заявка №2012123580/12, заявл. 06.06.2012г., опубл. 10.11.2012., Бюл. №31. – 2 с.

16. Патент №148422, Российская Федерация, МПК А47В 47/02. Стеллаж для сушки и отверждения лакокрасочных покрытий щитовых и поганажных изделий из древесины и древесных материалов / Газеев М.В., Ветошкин Ю.И., Тихонова Е.В. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Уральский гос. лесотехн. ун-т. №201512932/12, заявл. 05.08.2014г., опубл. 10.12.2014, Бюл. №34. – 2 с.

17. Патент №2557367, Российская Федерация, МПК G01N 5/02, Способ оценки водостойкости защитно-декоративного покрытия / Газеев М.В., Ветошкин Ю.И., Калюжный А.В., Жданов Н.Ф. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Уральский гос. лесотехн. ун-т. заявл. №2014108091/28, опубл. 20.07.2015 г., Бюл. №20. – 5 с.

### **Публикации в прочих изданиях**

18. Газеев М.В. Моделирование электрического поля при аэроионизационной сушке лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев, С.Н. Исаков // Вестник Казанского технологического университета. Т. 19, №20, КНИТУ. – Казань, 2016. – С. 46 – 49.

19. Газеев М.В. Исследование кинетики испарения растворителей лакокрасочных материалов в электрическом поле аэроионизационного устройства / М.В. Газеев, Е.А. Газеева, О.Н. Чернышев, А.П. Золкин // Вестник Казанского технологического университета Том. 20, №4, КНИТУ. – Казань, 2017. – С. 50 – 54.

20. Ветошкин Ю.И. Свойства и применение полиуретановых лакокрасочных материалов / Ю.И. Ветошкин, О.Н. Чернышев, М.В. Газеев, Н.А. Миронов // Дизайн и производство мебели. Научно-производственный журнал – С.-Пб. ООО «Издательский Дом “Ноосфера СПб”», 2005. №1/6. – С. 33 – 37.

21. Газеев М.В. Исследование химического состава лакокрасочного покрытия, образованного ВД-АК ЛКМ на древесине под влиянием ионизированного воздуха / М.В. Газеев, И.В. Жданова // Леса России и хозяйство в них, №4-47, 2013. – С. 36 – 39.

22. Газеев М.В. Моделирование деформаций при высыхании лакокрасочного материала на металлической пластине / М.В. Газеев, С.Н. Исаков // Леса России и хозяйство в них. Екатеринбург: Урал. Гос. Лесотехн. ун-т. №2 (49), 2014. – С. 38 – 40.

23. Ветошкин Ю.И. Лакокрасочные покрытия со спецэффектом на древесине и древесных материалах / Ю.И. Ветошкин, М.В. Газеев, И.Н. Наумова // Дизайн и производство мебели. – С.-Пб., 2006. № 1/10. – С. 26 – 29.

24. Тихонова Е.В. Эффективность применения аэроионификации для интенсификации отверждения лакокрасочных покрытий, образованных водными лаками / Е.В. Тихонова, М.В. Газеев // Сборник аннотаций научно-исследовательских работ студентов. «Научный олимп» XII областной конкурс научно-исследовательских работ студентов ВУЗОВ и ССУЗОВ, Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2008. – С. 86 – 87.

25. Газеев М.В. Исследование режимных параметров ускоренной сушки лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность Изд-во: БГТУ (Минск), №2 (184), 2016. – С. 140 – 144.

### **В материалах и тезисах конференций:**

26. Газеев М.В. Анализ способов интенсификации отверждения лакокрасочных покрытий / М.В. Газеев, И.В. Жданова // Материалы II всероссийской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Матер. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2006. Ч1. – С. 98 – 102.

27. Газеев М.В. Свойства водных лакокрасочных материалов для древесины и покрытий на их основе / М.В. Газеев, Ю.В. Путнева, И.В. Жданова // Сб. матер. междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2006. – С. 73 – 76.

28. Нетрадиционный подход к отверждению лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев, И.В. Жданова, Е.В. Лещев // «Урал промышленный –

Урал полярный: Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса»: Труды евразийского симпозиума. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. – С. 119 – 122.

29. Жданова Ю.В. Аэроионификация в технологии формирования защитно-декоративных покрытий / И.В. Жданова, Ю.В. Путнева, М.В. Газеев, Материалы III всероссийской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Матер. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. Ч. 1. – С.121 – 123.

30. Тихонова Е.В. Совершенствование способов сушки лакокрасочных покрытий, образованных водными лаками / Е.В. Тихонова, И.В. Жданова, М.В. Газеев // Материалы III всероссийской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Матер. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. Ч. 1. – С. 165 – 167.

31. Газеев М.В. Совершенствование технологии склеивания древесины / Газеев М.В., Ю.И. Ветошкин, Н.А. Старикова Сб. матер. II междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. – С. 37 – 40.

32. Газеев М.В. Влияние аэроионификации на процесс пленкообразования полиуретановых лакокрасочных покрытий / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова, Е.Е. Шишкина «Современные проблемы лесозаготовительных производств, производства материалов и изделий из древесины: пиломатериалы, фанера, деревянные дома заводского изготовления, столярно-строительные изделия». Т. 2, Материалы международной научно-практической конференции 27-28 марта 2009 г. – Спб.: НП «НЦО МТД», 2009. – С. 60 – 64.

33. Газеев М.В. Механизм интенсификации отверждения лакокрасочных покрытий аэроионификацией / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова, И.В. Жданова // Сб. матер. II междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. – С. 40 – 44.

34. Газеев М.В. Аэроионификация, как способ интенсификации отверждения лакокрасочных покрытий, образованных водными лаками / М.В. Газеев, Н.Ф. Жданов, И.В. Жданова, Е.В. Тихонова // Сб. матер. II Междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». - Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. – С. 57 – 61.

35. Газеев М.В. Эффективность применения аэроионификации для ускорения отверждения лакокрасочных покрытий / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Материалы IV всероссийской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Урал. Гос. Лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2008. Ч. 1. – С. 120 – 123.

36. Газеев М.В. Эффективность применения аэроионификации для интенсификации отверждения лакокрасочных покрытий, образованных алкидными лаками на древесине / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Сб. матер. III Междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. – С. 37 – 41.

37. Газеев М.В. Механизм интенсификации отверждения лакокрасочных покрытий на основе алкидных смол методом аэроионизации / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса в рамках концепции 2020: Матер. VII Междун. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. Ч. 2. – С. 31 – 34.

38. Газеев М.В. Исследование режимных параметров пленкообразования полиуретановых лакокрасочных покрытий при аэроионизации / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Сб. матер. IV Междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. – С. 126 – 129.

39. Газеев М.В. Интенсификация процесса отверждения полиуретановых лакокрасочных покрытий аэроионизацией / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Материалы V Всероссийской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Урал. Гос. Лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2009. Ч. 1. – С. 169 – 171.

40. Газеев М.В. Процесс пленкообразования полиуретановых лакокрасочных покрытий на древесине при аэроионизации / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник статей студентов и молодых ученых. – Красноярск: СибГТУ, Т. 2, 2009. – С. 3 – 8.

41. Газеев М.В. Аэроионизация как метод интенсификации пленкообразования лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // Тезисы докладов международной научной школы для молодежи «Инновационные технологии в здравоохранении: молекулярная медицина, клеточная терапия, трансплантология, реаниматология, нанотехнологии», Международной научной конференции «Инновационные технологии в реальном секторе экономики» Заседания экспертного Совета по программе «УМНИК» Екатеринбург, 2009. – С. 196 – 197.

42. Газеев М.В. Аэроионизация в технологии отделки изделий из древесины / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова // «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России»: Материалы VI всероссийской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Урал. Гос. Лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2010. Ч. 1 – С. 170 – 172.

43. Газеев М.В. Инновационный подход к отверждению лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев, И.В. Жданова, Е.В. Тихонова // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВПО КГТУ. – Кострома: Изд-во КГТУ, 2012. – С. 62 – 63.

44. Ушакова В.А. К вопросу формирования лакокрасочных покрытий на древесине водно-дисперсионным лаком при электроэфлювиальной аэроионизации / В.А. Ушакова, М.В. Газеев // Научное творчество молодежи лесному комплексу России. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т. – 2013. Ч.1. С. 201 – 204.

45. Газеев М.В. Склеивание массивной древесины при аэроионификации / М.В. Газеев, Н.В. Мосяев // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. VII Всерос. науч.-техн. конф. / Урал. гос. лесотехн. ун-т. - Екатеринбург, 2011. – Ч. 2. – С. 225 – 227.

46. Газеев М.В. Инновационный подход к склеиванию массивной древесины / М.В. Газеев, Н.В. Мосяев // «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России»: матер. VIII Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. Гос. Лесотехн. ун-т. 2012. Ч. 1. – С. 251– 254.

47. Газеев М.В. К вопросу аэроионификации в технологии деревообработки / М.В. Газеев, Н.В. Мосяев // Труды VI междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2011. – С. 119 – 122.

48. Ушакова В.А. Исследование влияния аэронизации на шероховатость поверхности лакокрасочного покрытия, сформированного на подложке древесины / В.А. Ушакова, М.В. Газеев // Научное творчество молодежи лесному комплексу России. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т. – 2014. – Ч.1. – С. 183 – 186.

49. Газеев М.В. Ускоренная сушка лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев, Е.В. Тихонова, И.В. Жданова // MATERIAŁY IX MIĘDZYNARODOWEJ NAUKOWI-PRAKTYCZNEJ KONFERENCJI «PERSPEKTYWICZNE OPRACOWANIA SĄ NAUKĄ I TECHNIKAMI-2013» 07 - 15 listopada 2013 roku Volume 31 Chemia i chemiczne technologie. – P. 43 – 44.

50. Газеев М.В. Исследование химического состава лакокрасочного покрытия, образованного ВД-АК ЛКМ на древесине под влиянием ионизированного воздуха / М.В. Газеев, И.В. Жданова // Труды VIII междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века», URL.:[http://symposium.forest.ru/article/2013/2\\_tehnology/pdf/Gazeev.pdf](http://symposium.forest.ru/article/2013/2_tehnology/pdf/Gazeev.pdf) (дата обращения 16.12.2013).

51. Газеев М.В. Ускоренная сушка лакокрасочных покрытий, образованных на древесине водно-дисперсионным лаком при аэроионизации / М.В. Газеев Прикладные научные разработки - 2014 Химия и химические технологии / 3. Лаки, краски, эмали, пигменты, герметики. 22 - 30 июля 2014 г. Чехия. URL: [http://www.rusnauka.com/Page\\_ru.htm](http://www.rusnauka.com/Page_ru.htm) (дата обращения: 09.09.2014).

52. Газеев М.В. Передвижной стеллаж для ускоренной сушки лакокрасочных покрытий на древесине и древесных материалах / М.В. Газеев, В.В. Илюшин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды IX междунар. евразийского симпозиума / под. научн. ред. В.Г. Новоселова. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2014. – С. 57 – 59.

53. Газеев М.В. Исследование поверхностного натяжения водно-дисперсионных лакокрасочных материалов для древесины / М.В. Газеев, В.А. Ушакова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. XI Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. Гос. Лесотехн. ун-т. 2015. Ч. 1. – С. 95 – 97.

54. Газеев М.В. Распределение электрического поля аэроионизатора при интенсификации отверждения лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев. Лесотехнические университеты в реализации концепции возрождения инженерного образования: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: матер. X Междунар. научн.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т., 2015. – С. 100 – 103.

55. Газеев М.В. Аэроионизация и поверхностные явления, возникающие при формировании лакокрасочных покрытий на древесине / М.В. Газеев, Ю.И. Ветошкин // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции / отв. ред. С.А. Угрюмов, Т.Н. Вахнина, А.А. Титунин. – Кострома: Изд-во КГТУ, 2015. – С. 59 – 61.

56. Газеев М.В. Смачивание ВД-АК лакокрасочным материалом поверхности древесины при аэроионизации / М.В. Газеев, Ю.И. Ветошкин, Е.А. Газеева // Materials of the XI International scientific and practical conference, "Fundamental and applied science", Volume 14. Medicine. Veterinary medicine. Chemistry and chemical technology. Sheffield. Science and education LTD. 2015. – P. 94 – 96.

57. Газеев М.В. Исследование толщины прозрачного лакокрасочного покрытия, отвержденного на древесине при ионизации воздуха / М.В. Газеев, В.А. Ушакова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. XII Всерос. научн.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. Гос. Лесотехн. ун-т. 2016. Ч. 1. – С. 65 – 68.

58. Газеев М.В. Исследование напряжений в лакокрасочных покрытиях, отвержденных при аэроионизации / М.В. Газеев, Е.А. Газеева, Ю.И. Ветошкин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды XI Международного евразийского симпозиума / под науч. ред. В.Г. Новоселова. – Екатеринбург, 2016. – С. 168 – 179.

Просим Вас принять участие в работе диссертационного Совета или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет Д 212.281.02, e-mail: d21228102@yandex.ru.

Подписано в печать 05.06.2017 г. Объем 2 авт. л. Заказ №132 Тираж 100 экз.  
620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет, Отдел оперативной полиграфии.