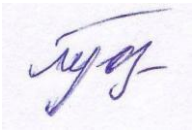


на правах рукописи

Горешнев Максим Алексеевич

ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЯХ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Специальность: 05.09.02 - Электротехнические материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2013

Работа выполнена на кафедре «Техника и электрофизика высоких напряжений» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Лопатин Владимир Васильевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шилько Владимир Казимирович доктор** технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО « Томский Государственный архитектурно-строительный университет», зав. кафедрой «Машины, оборудование и технология деревообработки»

Найден Евгений Петрович
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО НИ «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «18» декабря 2013г. в 15.00 ч на заседании диссертационного совета Д212.269.10 при ФГБОУ ВПО ТПУ «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «7» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.269.10
д.т.н., с.н.с. А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСИТКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Древесина является одним из самых дешёвых и экологичных материалов. Помимо высоких механических свойств, древесина обладает неплохими электроизоляционными свойствами. Сушка древесины является одной из основных технологических операций для изготовления изделий, в том числе и электротехнического назначения. Основные требования к сушке - это качество выходного продукта, снижение энергозатрат при максимальной скорости. Обычно древесину сушат конвективным способом. Для улучшения качества, то есть снижения внутренних механических напряжений, минимизации трещин и градиента влажности, увеличивают время сушки, что приводит к удорожанию продукта. Сушка очень энергоёмкий процесс, так как на испарение воды необходимо затратить большое количество энергии. Для уменьшения энергетических затрат со второй половины прошлого столетия начали применять сушку в вакууме. Это позволило значительно снизить затраты по сравнению с конвективной сушкой. Интенсификация удаления влаги из древесины может происходить за счет использования методов, обеспечивающих её объемный нагрев электромагнитным полем в высокочастотном (ВЧ) и сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Недостатком использования только электромагнитного излучения для сушки древесины является высокая стоимость электроэнергии и сложность оборудования, особенно СВЧ. Для снижения производственных затрат и получения равномерного распределения влажности возможно использование комбинированного способа сушки, который совмещает кондуктивный ввод тепловой энергии от сжигаемых древесных отходов и ВЧ нагрев при пониженном давлении. Сущность данного способа заключается в том, что ВЧ поле нагревает внутреннюю часть заготовки, а тепловая энергия обеспечивает введение энергии через поверхность древесины.

Оптимизацией соотношения энергии, вводимой через поверхность и в объём, можно выравнять влагосодержание и температуру в центральных и поверхностных слоях заготовки. Это снизит механические напряжения и растрескивание древесины, а также позволит увеличить скорость влагопереноса при минимальном градиенте влажности в приповерхностных и внутренних слоях. Поэтому актуальной задачей является разработка оптимальных технологических режимов сушки древесины комбинированным способом.

Основные механизмы движения влаги в древесине обусловлены градиентами влажности, температуры и давления. Направления потоков влаги под действием этих градиентов может быть как сонаправленными, так и противодействующими друг другу. Поэтому необходимо с приемлемой точностью определи5ть

величины движущих сил, под влиянием которых происходит влагоперенос. Отсутствие расчётной модели сушки древесины комбинированным способом при пониженном давлении вынуждает использовать общие уравнения тепломассопереноса капиллярно-пористых сред. Наиболее полно описывает тепломассоперенос система уравнений академика Лыкова А.В., для которых требуется знание теплофизических параметров. Эти параметры невозможно определить априори, не зная основных каналов влагопереноса, обусловленных структурой древесины. Сложность строения древесины требует опытного определения теплофизических параметров для каждого её вида.

Разработанные ранее и используемые технологии объёмной пропитки лиственных пород позволяют улучшить физико-механические свойства древесины, уменьшить гигроскопичность, подверженность к гниению и огнестойкость. Эти свойства важны при использовании древесины в качестве изолятора в электротехнике. Для объёмно-пропитанной, так называемой модифицированной древесины требуется разработка собственных режимов сушки, поскольку при пропитке изменяется структура и свойства материала. Необходимы также исследования электрофизических свойств модифицированной древесины берёзы.

Цель работы:

Разработка режимов сушки комбинированным способом древесины берёзы естественной влажности и модифицированной объёмной пропиткой.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Определить электрофизические свойства объёмно-пропитанной древесины берёзы в зависимости от её влажности.
2. Установить закономерности тепломассопереноса в древесине лиственных пород при комбинированном способе сушки в атмосфере пониженного давления.
3. Экспериментально определить характеристики объёмно-пропитанной древесины берёзы, влияющие на тепломассоперенос.
4. На основе анализа тепломассопереноса в капиллярно-пористых средах разработать феноменологическую модель и программное обеспечение для моделирования сушки древесины в разреженной атмосфере.
5. Разработать практические рекомендации по технологическим режимам сушки древесины.

Основной идеей работы является использование поверхностного и объёмного ввода энергии для снижения внутренних механических напряжений и длительности сушки модифицированной древесины берёзы.

Научная новизна

1. Определены диэлектрическая проницаемость, проводимость, тангенс угла диэлектрических потерь, напряжение пробоя и теплофизические свойства объёмно-пропитанной древесины берёзы в зависимости от влажности.
2. Впервые получены временные зависимости внутреннего избыточного давления для сушки пропитанной древесины берёзы при пониженном давлении, а также экспериментально установлено определяющее влияние внутреннего избыточного давления на движение влаги и рассчитана удельная энергия физико-химической связи влаги и стенок пор.
3. Установлены оптимальные режимы сушки объёмно-пропитанной древесины берёзы и берёзы естественной влажности комбинированным способом.
4. Разработан алгоритм расчёта тепловлагопереноса в древесине берёзы для комбинированного способа сушки в рамках теории тепломассопереноса капиллярно-пористых сред.
5. Получены зависимости электрофизических свойств от влажности объёмно-пропитанной гидрофобными и биозащитными составами древесины берёзы.

Практическая значимость работы

1. Создана универсальная методика исследований тепловлагопереноса в древесине.
2. Измеренные зависимости электрофизических свойств от влажности позволяют прогнозировать использование древесины в качестве изоляционного материала и могут быть использованы при создании изоляции высоковольтных линий электропередачи, трансформаторов и другого оборудования.
3. Показано превалирующее влияние внутреннего избыточного давления паровоздушной смеси на тепловлагоперенос при сушке лиственных пиломатериалов, в частности берёзы, при пониженном давлении.
4. Результаты экспериментальных исследований тепломассопереноса объёмно пропитанной древесины берёзы и берёзы естественной влажности позволяют моделировать её комбинированную сушку.
5. Разработаны оптимальные технологические режимы сушки комбинированным способом естественной влажности и объёмно-пропитанной древесины берёзы.
6. Разработано техническое предложение на создание промышленной технологической карты для сушки древесины комбинированным способом.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Оптимальные режимы введения энергии при сушке древесины комбинированным способом, основанные на результатах измерений динамики влажности, температуры и внутреннего давления.
2. Зависимости электрофизических и теплофизических характеристик, влаго- и пароперепоса древесины берёзы в зависимости от влажности материала.
3. Внутреннее избыточное давление в древесине берёзы достигает 15 кПа и значительно влияет на влагоперенос при сушке в атмосфере пониженного давления.
4. Алгоритм и программа для моделирования тепловлагопереноса в капиллярно-пористых средах при сушке в атмосфере пониженного давления.

Диссертация соответствует пунктам 1,2,3 паспорта специальности 05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия».

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием общепринятых методик эксперимента, сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей, реализацией научных положений при практическом применении режимов сушки. Полученные результаты не противоречат существующим представлениям о механизмах теплофизических процессов в капиллярно-пористых телах.

Личный вклад автора выражается в участии постановки задач и их реализации, проведении экспериментальных исследований. Автором самостоятельно предложена методика определения параметров объёмно-пропитанной древесины, разработан алгоритм расчёта блочного типа тепломассопереноса при комбинированной сушке. Найдены оптимальные режимы сушки лиственных и хвойных пород древесины комбинированным способом. Совместно с коллегами созданы лабораторные и опытно промышленные сушилки, разработано техническое предложение на промышленную сушильную камеру.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на XIV Минском международном форуме по тепломассообмену (Белоруссия, 2012), на XVII , XVIII, XIX международной научно – практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2011, 2012, 2013), на XII Всероссийском студенческом научно-техническом семинаре «Энергетика: экология, надёжность, безопасность» (Томск, 2010).

Публикации.

По результатам исследований было опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК.

Объём и структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Её содержание изложено на 99 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 9 таблиц. Библиографический справочник содержит 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко описывается актуальность работы, сформулированы основные задачи и цели их достижения. Перечислены основные выносимые положения на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор физико-механических и электрофизических свойств древесины, обуславливающих её применение. При влажности более 15-20 % древесина теряет электрофизические свойства и становиться полярным полупроводником, что ограничивает её применение в электротехнике.

Проанализированы различные способы сушки древесины с учётом их достоинств и недостатков. Выделены основные способы сушки: конвективный, кондуктивный, нагрев электромагнитным полем, обезвоживание без перехода жидкости в паровую фазу (электроосмос, центрифугирование, импульсная сушка), а так же сушка древесины при пониженном давлении.

На основе анализа структуры и её свойств сделаны выводы о сложности строения древесины в зависимости от породы и текстуры. Поэтому структурная модель позволяет только качественно рассмотреть тепломассоперенос в древесине, количественное определение параметров, влияющих на тепломассоперенос, возможно только экспериментальным путём.

На основе анализа литературы сформулированы цели и задачи исследований.

Во второй главе описан комбинированный способ сушки, включающий кондуктивный и ВЧ нагрев при пониженном давлении, приведены методики определения электро- и теплофизических характеристик древесины берёзы. Представлены зависимости для расчёта энерговклада резистивной и диэлектрической составляющей при ВЧ нагреве, согласно которым при большой влажности преобладают резистивные потери, а при снижении влажности - диэлектрические.

Описана экспериментальная установка, состоящая из трёх основных компонентов: сушильная камера, ВЧ генератор и измерительный комплекс. Сушильная камера представляет собой стальную цилиндрическую обечайку, объёмом 3м³ и диаметром 1,2 м для загрузки до 1 $м^3$ пиломатериала. Внешняя поверхность обечайки оснащена водяным охлаждением. Внутри камеры располагается штабель из древесины и термоэлементов. Функциональная схема оборудования сушильной камеры представлена на рисунке 1.

Штабель формируется снаружи поочерёдной укладкой слоёв древесины и металлических термоэлементов (рис.2), а затем помещается в камеру с помощью телеги на рельсах. Для исследований использовалась объёмно-пропитанная древесина берёзы и древесина берёзы естественной влажности размером 50×(150-300)×3000 мм. Объём загружаемой в камеру древесины составлял 0,8 $м^3$.Нагреваемые термоэлементы-электроды выполнены в виде плоского змеевика из профильной трубы с протекающим в нём горячим теплоносителем. К плоскостям змеевика приварены две стальные пластины размером 3000•800•1 мм.

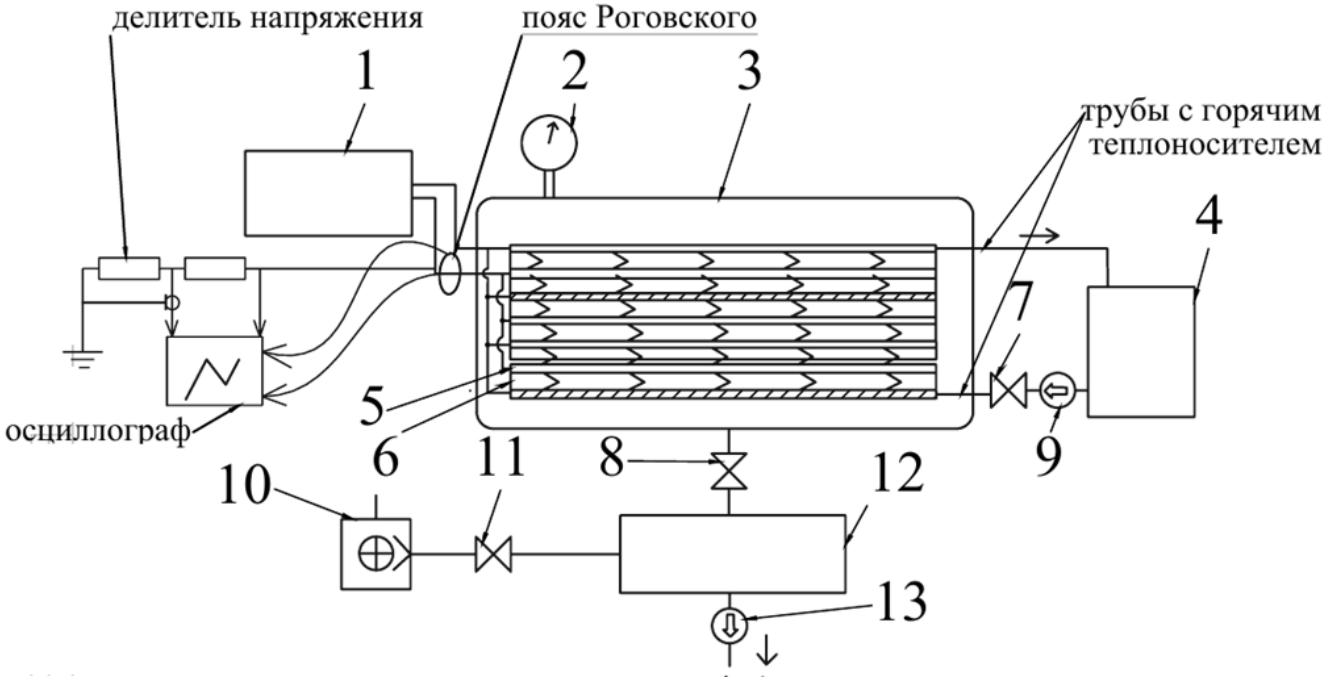


Рисунок 1. Блок-схема установки для сушки древесины комбинированным способом.

1- ВЧ генератор; 2 - мановакуумметр ЭКВ-1У; 3- рабочая камера с объёмом загрузки древесины 1$м^3$; 4 – теплогенератор совместно с измерителем-регулятором температуры ТРМ1; 5– нагреваемые электроды; 6– древесина; 7,8 – шаровые краны;9- центробежный насос К8-18; 10 - насос вакуумный водокольцевой НВВ-75; 11 – электромагнитный вакуумный клапан; 12 – конденсор-сборник; 13 –откачивающий насос.

ВЧ генератор служит для объёмного нагрева древесины электромагнитным полем и выполнен в виде инвертора тока с максимальным рабочим напряжением 2 кВ и частотой 60-100 кГц. Напряжение регистрировалось с помощью резистивного делителя напряжения, находящегося в металлическом заземлённом кожухе для уменьшения электрических помех.

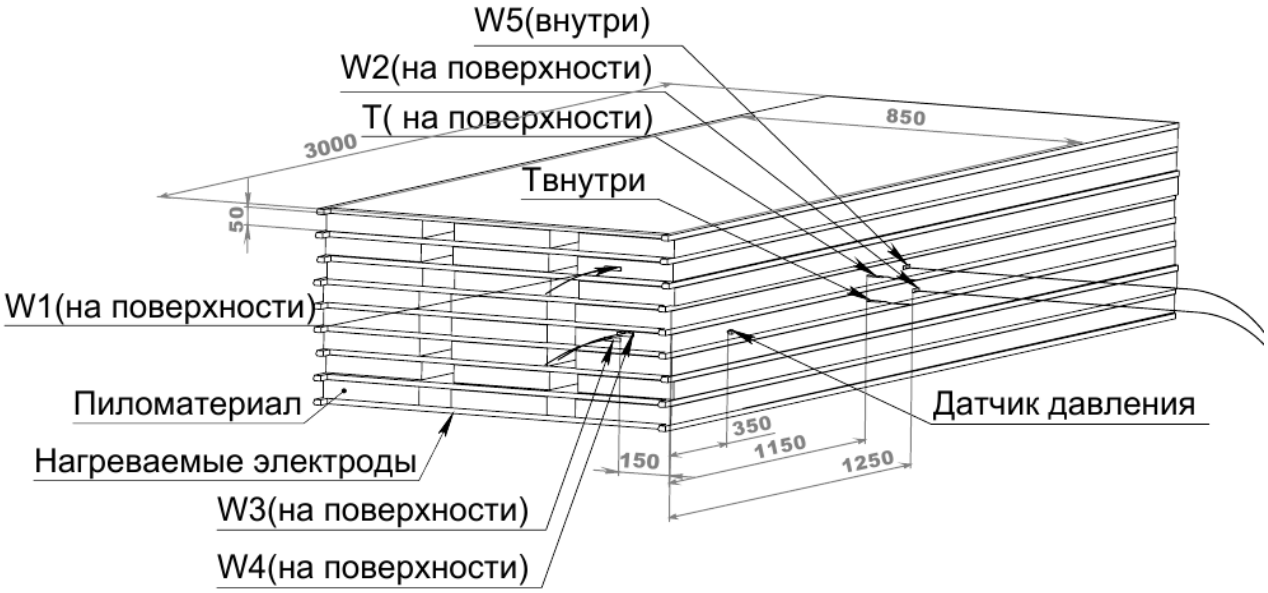


Рисунок 2. Схема формирования штабеля и расположения датчиков температуры (T), влажности (W) и пьезоэлектрического датчика давления.

Измерение тока проводилось с помощью пояса Роговского. Для регистрации показаний использовался двухканальный записывающий осциллограф. Измерение влажности и температуры древесины осуществлялось стационарным кондуктометрическим измерителем влажности СВД-04. Измерения показаний относительной влажности атмосферы производились ёмкостным датчиком со встроенным платиновым термометром сопротивления. Измерения внутреннего избыточного давления выполнялось дифференциальными пьезоэлектрическими датчиками. Датчик давления через пластиковую трубку вставлялся в просверленное отверстие. Затем места стыков герметизировались силиконовым клеем. Непрерывное снятие показаний с датчиков давления и влажности среды под воздействием электромагнитного ВЧ поля осуществлялось с помощью разработанной оптронной гальванической развязки с выводом на цифровой самописец.

Описаны методики определения электрофизических параметров и параметров тепломассопереноса в зависимости от влажности объёмно-пропитанной древесины берёзы.

<u>В третьей главе</u> представлены результаты экспериментальных исследований тепломассопереноса при комбинированной и кондуктивной сушке древесины, а также электрофизических параметров и параметров тепломассопереноса в зависимости от влажности.

Результаты измерений динамики влажности, температуры и внутреннего избыточного давления (ВИД) комбинированной сушки при вакуумировании для древесины берёзы естественной влажности представлены на рис. 3.

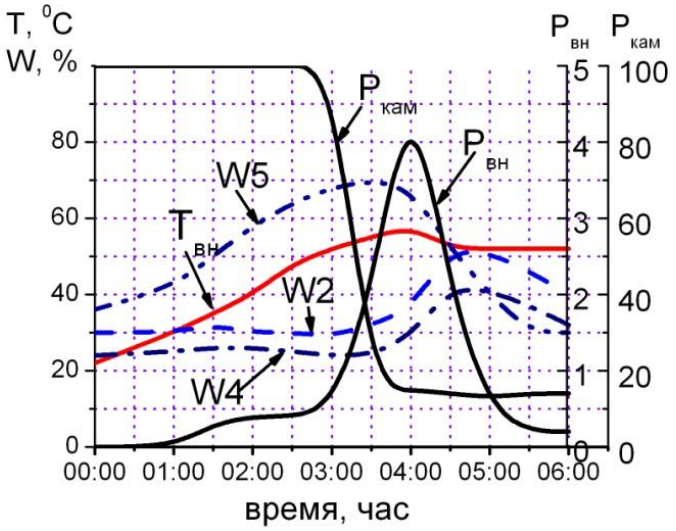


Рисунок 3. Фрагмент кривых изменения внутреннего давления ($P_{вн}$), температуры (T) и влажности (W) в объеме и на поверхности заготовки при понижении давления в камере ($P_{кам}$). W4, W2 – датчики влажности на торце и сбоку заготовки; W5 - датчик влажности в объёме заготовки.

Исследования динамики параметров, показали, что при вакуумировании внутренне избыточное давление (ВИД) увеличивается. Влажность древесины в объёме (W5) снижается, а на поверхности увеличивается (W4, W2). При вакуумировании величина ВИД возрастает до 3-4 кПа (рис. 3), а затем снижается и не поднимается выше 1 кПа. Это вероятно связано с тем, что: во-первых – защемлённого газа, находящегося в порах, становится меньше; во-вторых - энтальпия пиломатериала меньше, чем при первичном прогреве, что снижает генерацию пара. До гигроскопичной влажности (30 %) величина пиков ВИД приблизительно одинакова, но при влажности ниже 30 % она начинает снижаться. Это объясняется тем, что при влажности выше 30-35% жидкость в древесине находится в основном в свободном состоянии, а ниже - в связанном. Измерения показывают, что на торце (W4) при вакуумировании влажность изменяется быстрее и значительнее, чем на боковой поверхности (W2), хотя характер их временных зависимостей аналогичен. Это объясняется тем, что вдоль волокон влагопроводность значительно выше, чем поперёк.

Полные характерные зависимости изменения усредненных значений влажности (W), температуры (T) и вводимой мощности ВЧ генератора (N), приведенные на рис. 4 показывают, что включение ВЧ генератора вызывает снижение влажности внутри заготовки. Температура в объеме заготовки становится несколько выше, чем на поверхности.

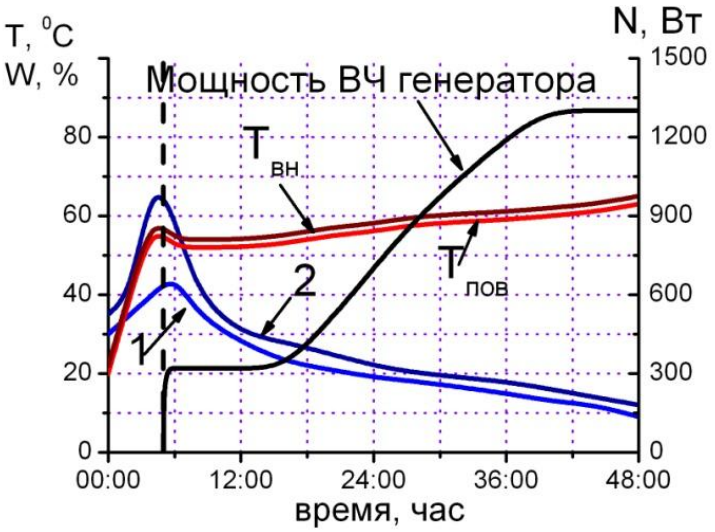


Рисунок 4. Типичные зависимости влажности (W), температуры древесины (T) и вводимой мощности ВЧ генератора (N) от времени; 1 – усреднённое влагосодержание торцевой и боковой поверхностей заготовки W1-W4; 2 – усреднённое влагосодержание в объеме заготовки, W5; пунктирной линией показано время включения ВЧ генератора и вакуумирования камеры.

Разница конечной влажности внутри заготовки и на поверхности составляла не более 4 %. Сушка длилась 48 часов. Общая затраченная энергия составила 466 кВт·ч/м^3. Из них 392 кВт·ч/м^3- тепловая энергия и 74 кВт·ч электрическая. Температура древесины при сушке не превышала 70 ^{0}C, что минимизирует деструкцию органических компонентов.

На рис. 5 представлены результаты исследований сушки объемно-пропитанной древесины березы с начальной влажностью 100-120 % кондуктивным способом. Датчики влажности, в начальный период, регистрируют предельные для них значения (90%), которые ниже истинных. На фрагменте временных зависимостей (рис. 5,б) наблюдается максимум $P_{вн}$ при включении вакуумного насоса. При этом влажность и температура внутренних слоёв снижается, а на торцах повышается (рис. 5, б). В отличие от сушки древесины естественной влажности, судя по уменьшению влагосодержания в объёме и повышению на торце, влагоперенос происходит быстрее. Кроме того, следует отметить высокий разброс значений влажности вдоль заготовки, достигающий 40%. За 120 часов сушки влажность поверхностных слоёв достигала 9-10 %, а внутренних 15-18 %. Затраты тепловой энергии на сушку составили 575 кВт·ч.

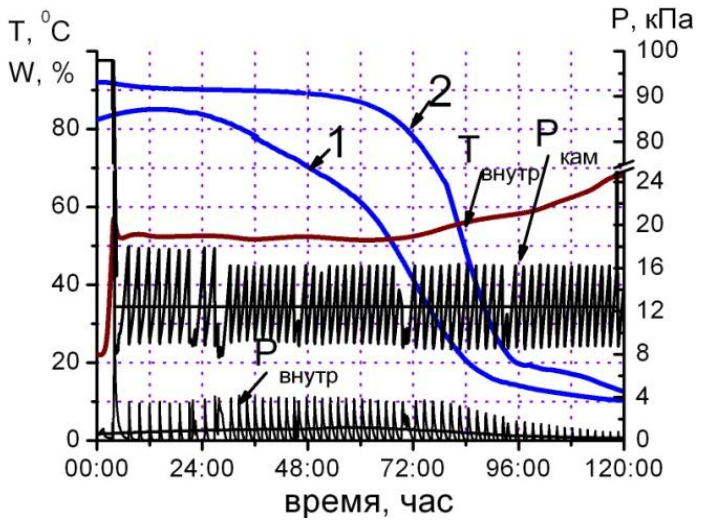


Рисунок 5,а. Зависимость средней влажности, температуры, давления в камере и внутреннего избыточного давления в древесине от времени сушки. 1 – усреднённое влагосодержание поверхности заготовки, W1-W4; 2 – усреднённое влагосодержание внутри заготовки, W5.

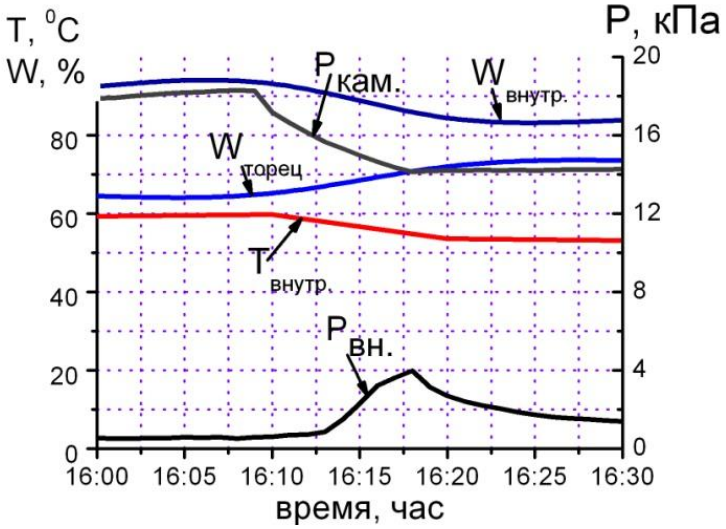


Рисунок 5,б. Фрагмент зависимостей представленных на рис 5, а.

На рис. 6 представлены результаты исследований сушки объемно-пропитанной древесины березы с начальной влажностью 100-120 % комбинированным способом. Дискретность кривых на графике объясняется невозможностью постоянного измерения при работающем ВЧ генераторе. Вследствие высокого импеданса ВЧ генератора на резистивно-ёмкостную нагрузку, его напряжение, при малом сопротивлении штабеля, близко к нулю. Поэтому включение ВЧ генератора осуществлялось после достижения влажности в штабеле 70-80 %

В начальный момент времени $P_{вн}$ доходит до значений 15 кПа, а затем постепенно снижалось до 1-2 кПа. Разница влажности вдоль доски в процессе

сушки не превышала 20%, а по толщине 30 % (рис. 6). После 84 часов сушки разница влажности не превышала 1-4%, что близко к точности измерений.

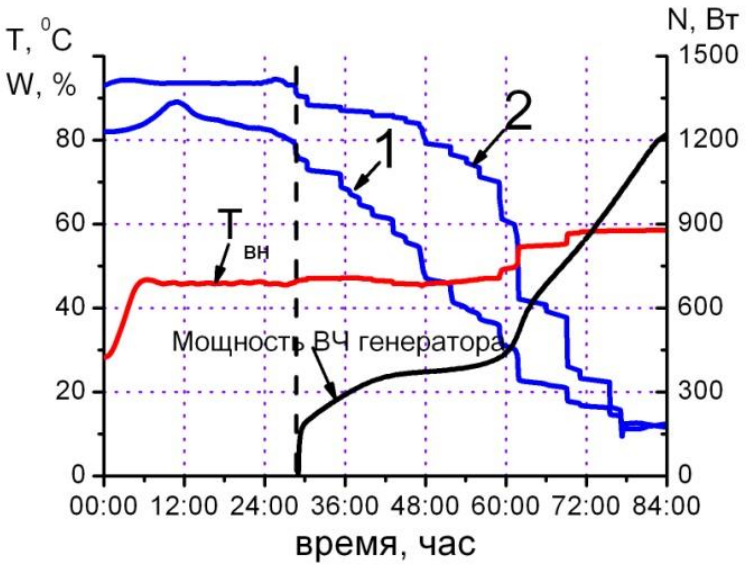


Рисунок 6. Зависимости влажности и температуры от времени комбинированной сушки объемно-пропитанной древесины. 1 – усреднённое влагосодержание на поверхности заготовки, W1- W4; 2 - усреднённое влагосодержание внутри заготовки, W5; пунктирной линией показано время включения ВЧ генератора.

Общая затраченная энергия составила 570 кВт·ч. Из них 416 кВт·ч - тепловая энергия, 154 кВт·ч - электрическая. Конечная влажность составила 8-12 %, с градиентом по толщине 2-4%.

При сравнении комбинированного и кондуктивного способа сушки общая затрачиваемая энергия эквивалентна, но скорость при комбинированном способе сушки на 40 % выше.

Изменения влажности внутри и на поверхности древесины под действием давления (рис. 3, рис 5,б) свидетельствуют о значительном влиянии ВИД на движение влаги. Благодаря совпадающим направлениям влаги под действием градиентов температуры и ВИД при введении энергии через поверхность и объёмно в древесину, происходит ускорение сушки. Кроме того появляется возможность регулирования теплового поля и влагопереноса во внутренних и внешних слоях древесины. Временные изменения значения ВИД необходимо учитывать при моделировании тепломассопереноса в древесине, например, в качестве коэффициентов в системе дифференциальных уравнений теории тепломассопереноса в капиллярно-пористых средах академика Лыкова А.В.

Изменение влажности при сушке объёмно пропитанной древесины происходит значительно быстрее, чем у естественной, что видно из сравнения *W(t)* рис. 3 и рис. 5,а. Этот эффект объясняется тем, что при пропитке часть

перегородок между капиллярами разрушаются, что увеличивает открытую пористость древесины и как следствие влагопроводность.

Применение ВЧ нагрева совместно с кондуктивной сушкой позволяет ускорить процесс влагопереноса и сократить время сушки древесины не менее чем на 35-40%. Градиент конечной влажности поверхностных и центральных слоёв составляет менее 4%. Использование комбинированного способа введения энергии уменьшает риск изгибов и трещинообразования. Комбинированный способ сушки экономически более выгоден по сравнению с нагревом ВЧ и СВЧ полем, так как позволяет использовать тепловую энергию от сжигания отходов деревообрабатывающего производства и не создаёт перегрева центральных слоёв древесины.

Далее в главе представлены результаты измерений электрофизических параметров и параметров тепломассопереноса в зависимости от влажности объёмно-пропитанной древесины берёзы. Показаны зависимости пробивного напряжения (табл.1) и удельного сопротивления (рис.7) от анизотропии и влажности древесины.

Таблица 1. Пробивное напряжение древесины берёзы в зависимости от анизотропии.

	Радиальное	Тангенциальное	Вдоль волокон
Пропитанная антипиреном	52 ±15% кВ/см	67 ±15% кВ/см	18,6 ±20% кВ/см
Пропитанная красителем	71 ±15% кВ/см	61 ±15% кВ/см	13,8 ±20% кВ/см
Естественной влажности	55,1 ±15% кВ/см	62,7 ±15% кВ/см	15,9 ±20% кВ/см

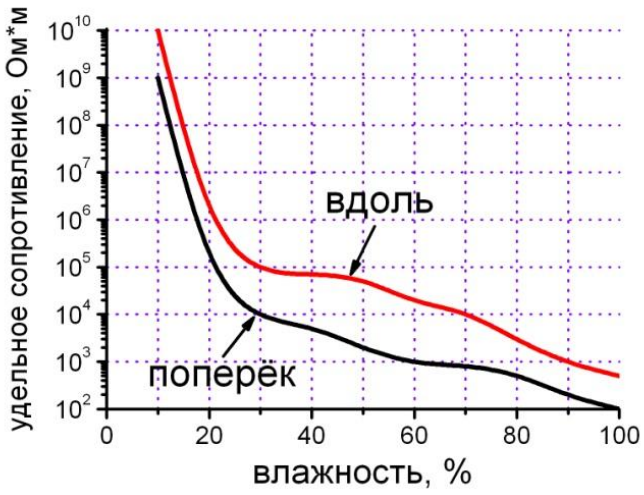


Рисунок 7. Зависимость удельного сопротивления вдоль и поперёк волокон от влажности объёмно пропитанной красителем древесины берёзы.

При влажности более 20% сопротивление поперёк волокон снижается ниже 10^6 Ом·м, что делает древесину непригодной для изоляции. Поэтому при использовании древесины для наружной изоляции необходимо пропитывать её гидрофобными растворами.

Приведены экспериментально найденные режимы сушки комбинированным способом объёмно-пропитанной древесины берёзы, древесины берёзы естественной влажности и древесины хвойных пород. Представлен технологический регламент и требования к выбору технологического и измерительного оборудования для комбинированной сушки. Требуемая тепловая мощность теплогенератора - 6 кВт/ м^3 и ВЧ генератора - 2 кВт/м^3.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию. Представлены общие принципы моделирования, основывающиеся на физических законах тепломассопереноса. Был проведён анализ известных моделей и выбрана модель в рамках системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса Лыкова А.В (1-3) [1].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T + kr\frac{c_m}{c}\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \acute{a}\delta_\theta \Delta T + \acute{a}\Delta\theta + \acute{a}\delta_{p\theta}\Delta P \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a_p\Delta P + k\frac{c_m}{c}\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

,где θ - химический потенциал переноса влаги.

P - внутренне избыточное давление

c - приведённая удельная теплоёмкость тела

c_m-удельная изотермическая массоёмкость (влагоёмкость).

$\acute{a}$ – коэффициент массопереноса жидкости и пара

δ – коэффициент термовлагопроводности.

k — критерий внутреннего испарения ($0 < k < 1$). Если перемещение влаги только в виде жидкости $k = 0$, если только в виде пара $k = 1$.

a_p - коэффициент конвективной диффузии;

δ_p – коэффициент, учитывающий влияние давления на движение влаги.

На основе выделенных трёх периодов сушки [2] построен блочный алгоритм расчёта тепломассопереноса в программе (рис.8).

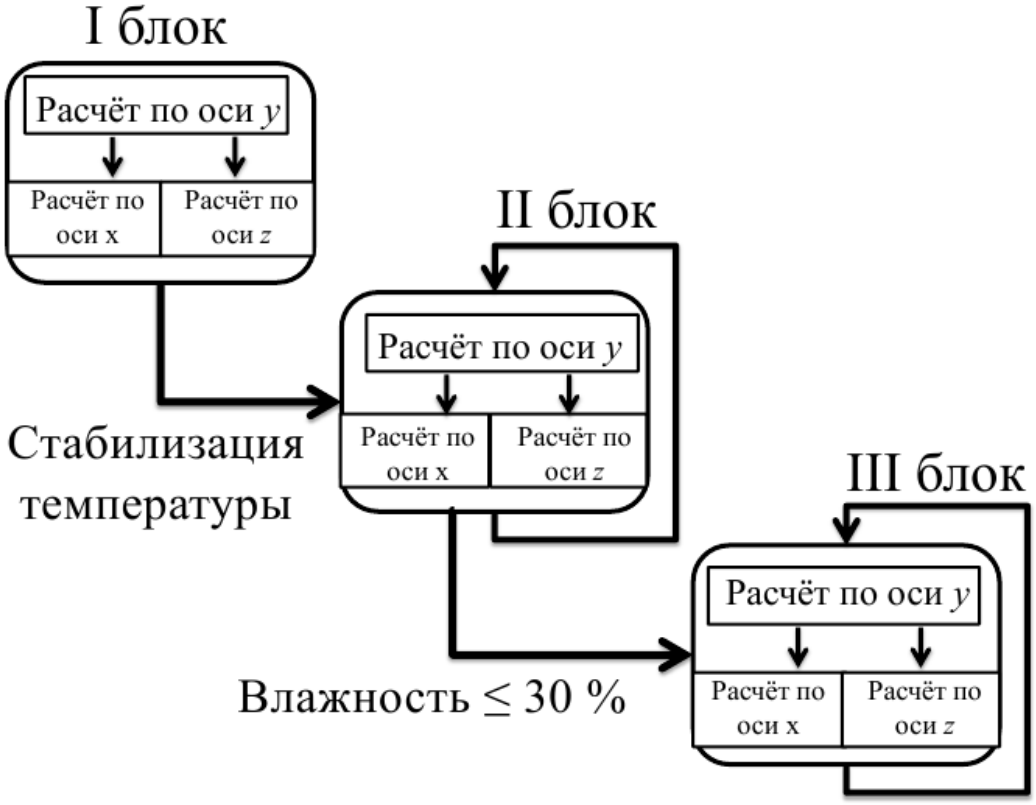


Рисунок 8. Блок-схема программы.

Эти периоды называются: период прогрева (I), период постоянной скорости сушки (II), период убывающей скорости сушки (III). Каждый блок соответствует своему периоду сушки и включает уравнения, граничные условия и зависимости параметров древесины, в соответствии с происходящими процессами.

1 блок – период нагрева. В соответствии с представленными режимами, нагрев производиться при атмосферном давлении, вследствие этого внутренним избыточным давлением и коэффициентом парообразования можно пренебречь. Использована упрощённая система уравнений:

$$\frac{dT}{dt} = a(T,U)\Delta T \tag{4}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \acute{a}(T,U)\delta(T,U)\Delta T + \acute{a}(T,U)\Delta U \tag{5}$$

Система уравнений (4,5) описывает тепловлагоперенос при нагреве древесины. Используются граничные условия первого и третьего рода.

2 блок - период постоянной скорости сушки наступает при стабилизации температуры древесины в зависимости от давления в камере. В этот период влага в древесине начинает интенсивно испаряться, поэтому внутреннее избыточное давление значительно влияет на влагоперенос. Используется полная система уравнений Лыкова А.В. (1-3)

3 блок - период падающей скорости сушки, характеризуется отсутствием свободной влаги в древесине, то есть отсутствием капиллярного влагопереноса. Третий период начинается по достижению влажности 30 % для большинства

пород древесины. Использованы те же уравнения, что и во втором блоке, но ε, в отличие от второго периода, зависит от влажности и стремится к нулю.

В таблице 2 представлены регрессионные зависимости коэффициентов, используемых в уравнениях (1-3), от влажности. Описан синтаксис программы, её особенности и выбор точности и устойчивости решения.

Таблица 2.

Наименование коэффициента	Направление волокон	Регрессионная зависимость от влажности (W)
Коэффициент паровлагопроводности δ_p, 1/кПа	вдоль	$-24+1{,}27W-0.00866W^2-3{,}62\cdot10^{-4}\cdot W^3+6{,}425\cdot10^{-6}\cdot W^4-3\cdot10^{-8}\cdot W^5$
Температуропроводность a, м^2/с	вдоль	$(1{,}64-0{,}00232\cdot W)\cdot10^{-7}$
	поперёк	$(1{,}45-0{,}00353\cdot W)\cdot10^{-7}$
Коэффициент влагопроводности $\acute{a}$, м^2/с	вдоль	$15\cdot10^{-9}$
	поперёк	$4{,}2\cdot10^{-9}$
Коэффициент термовлагопроводности δ, град$^{-1}$	вдоль	$-0{,}72432+0{,}0755\cdot W-8.22\cdot W^2$
	поперёк	$1{,}573+0{,}09663\cdot W+6\cdot10^{-4}\cdot W^2-1.58261\cdot10^5\cdot W^3-7.732\cdot10^{-9}\cdot W^4$
Удельная энергия связи влаги с древесиной, А, кДж/кг		$209{,}5-21{,}57\cdot W+0{,}8543\cdot W^2-0{,}012\cdot W^3$
Коэффициент конвективной диффузии $a_р$, м^2/с	вдоль	$0{,}0171+1{,}79\cdot W-0{,}27\cdot W^2-0{,}018\cdot W^3-6{,}5733\cdot10^{-4}\cdot W^4+1{,}45\cdot10^{-4}\cdot W^5-1{,}97\cdot10^{-7}\cdot W^6+1{,}6\cdot10^{-9}\cdot W^7-7{,}23\cdot10^{-12}\cdot W^8+1{,}378\cdot10^{-14}\cdot W^9$

Сравнение рассчитанной динамики изменений температуры, влажности и ВИД с экспериментальной проводилось на примере кондуктивной сушки объёмно-пропитанной древесины берёзы при пониженном давлении. Сравнение проводилось в рамках периода между включениями ваккумного насоса, что соответсвтует одному циклу в программе. Рассчитанные и экспериментальные данные динамики изменения температуры и влажности пиломатериала представлены на рисунке 9.

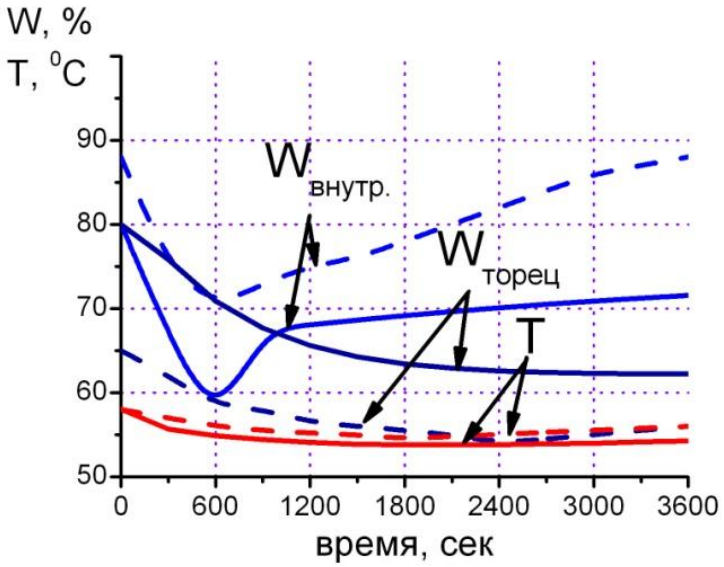
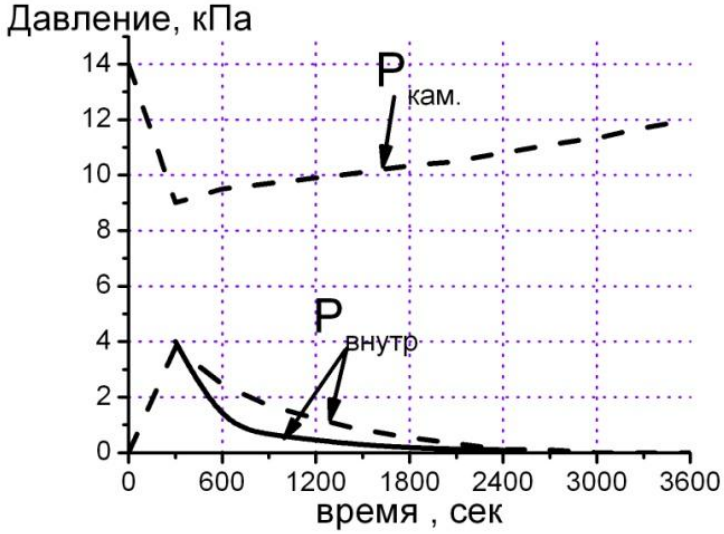


Рисунок 9. Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктирная линия) зависимости влажности и температуры от времени в рамках одного цикла.

Динамика изменения давления в камере и ВИД в древесине при вакуумировании представлена на рис. 10. Время работы насоса не учитывалось, поэтому вначале расчета внутреннее давление принимает максимальное значение.



\

Рисунок 10. Зависимости давления в камере и внутреннего давления в древесине от времени при вакуумировании камеры

На рис. 11 представлено сравнение экспериментальных и рассчитанных значений средней влажности и температуры внутри пиломатериала для всего времени сушки объёмно-пропитанной древесины берёзы кондуктивным способом. Точками обозначены расчётные значения температуры и влажности.

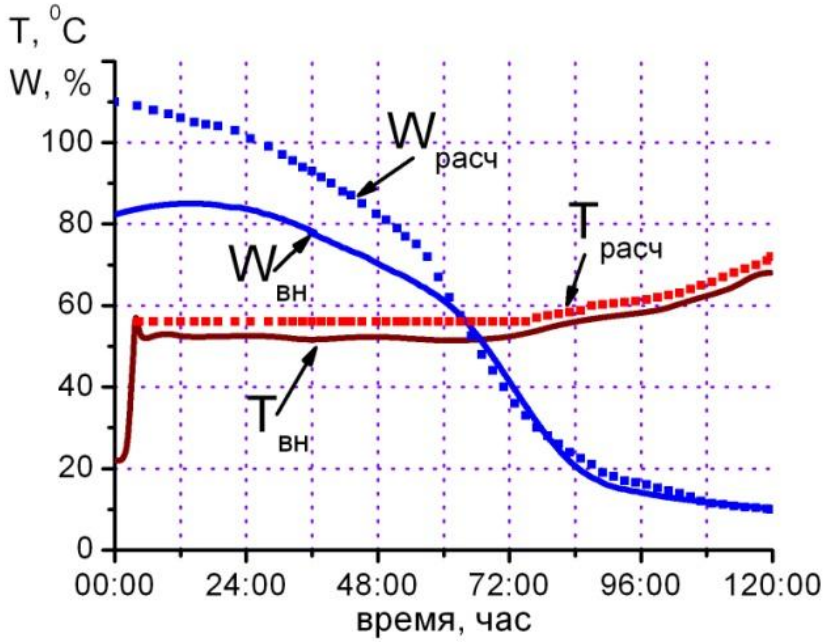


Рисунок 11. Расчетные (точки) и экспериментальные (сплошная линия) временные зависимости влажности и температуры внутри доски за все время сушки.

Сравнение показало удовлетворительную сходимость математического расчёта и опытных данных. Основной проблемой моделирования является невозможность должным образом варьировать граничные условия в используемом программном пакете, а также невозможность изменить код программы для более точного расчёта уравнений.

Выводы по работе:

1. Исследование давления в сушильной камере, высокочастотного тока и напряжения, температуры, влажности, внутреннего избыточного давления в древесине, при её сушке, позволило установить оптимальные режимы сушки.
2. Установлено значительное влияние ВИД на влагоперенос при сушке в разреженной атмосфере, что особенно выражено для объёмно-пропитанной древесины.
3. Определена удельная энергия физико-химической связи влаги и стенок пор.
4. Определены общие энергозатраты при комбинированной сушке, из которых 70-80 % - тепловые, 20-30 % - электрические энергозатраты, при скорости на 40 % выше по сравнению с кондуктивной сушкой.
5. Разработаны методики и определены зависимости диэлектрической проницаемости, паровлагопроводности, термовлагопроводности и парообразования в древесине в зависимости от влажности.

6. Сконструирована схема оптической развязки позволяющая регистрировать внутреннее избыточное давление в древесине, температуру и влажность в камере под воздействием ВЧ поля.

7. Исследования электрофизических свойств древесины показали, что при влажности более 20% она теряет изоляционные свойства. Применение древесины для внешней изоляции возможно только при объёмной пропитке гидрофобными растворами.

8. Создана и реализована модель тепломассопереноса для сушки при пониженном давлении, используя разработанный алгоритм в рамках теории тепломассопереноса капиллярно-пористых сред Лыкова.

9. Разработаны требования к оборудованию и технологический регламент комбинированной сушки древесины берёзы.

Основные содержание диссертации изложено в работах:

В изданиях рекомендованных ВАК:

1. M. A. Goreshnev, A. N. Kazarin, V. V. Lopatin, F. G. Sekisov, and O. V. Smerdov. Combined timber drying method//Journal of Engineering Physics and Thermophysics.-2013 - Vol. 86 - No. 2 - P. 336-339
2. Горешнев М.А., Лопатин В.В., Секисов Ф.Г., Смердов О.В. Объёмная пропитка и сушка в тепловом и высокочастотном электромагнитных полях древесины берёзы // Известия ВУЗов. Физика.- 2012 – Т. 55 - № 6/2- С. 177-182
3. Секисов Ф.Г., Смердов О.В., Казарин А.Н., Ли Хунда, Веснин В.С., Горешнев М.А. Исследования импульсной объёмной пропитки древесины берёзы // Вестник ТГАСУ. Физика.-2010- №1- С.158-164.

В других изданиях:

4. Горешнев М.А., Казарин А.Н., Лопатин В.В., Секисов Ф. Г., О. В. Смердов. Комбинированный метод сушки древесины// ИФЖ.-2013 - Т. 86 - № 2 – С. 318-321
5. Горешнев М.А., Лопатин В.В., Секисов Ф.Г., Смердов О.В. Закономерности сушки древесины комбинированным методом при пониженном давлении// XIV Минский международный форум по тепломассообмену. – Минск-2012- С. 462-466
6. Горешнев М.А., Секисов Ф. Г. Исследование динамики влагоудаления при сушке комбинированным методом в вакууме.// Ползуновский альманах.- Алтайский государственный политехнический университет, Барнаул. – 2010 .- №2. - С. 257-259.
7. Горешнев М.А. Определение коэффициента парообразования при вакуумной сушке пористых материалов// XIX международная научно –

практическая конференция студентов и молодых ученых СТТ-2013.- Томск.-2013.- Т. 3 – С. 205-206

8. Литвишко Е.С., Горешнев М.А., Система непрерывного измерения температуры под действием высоковольтного напряжения// XIX международная научно – практическая конференция студентов и молодых ученых СТТ-2013.- Томск .- 2013 – Т. 1 – С. 178-179
9. Горешнев, М. А., Шишков И. В.. Динамика изменения избыточного внутреннего давления при вакуумной сушке древесины // Современные техника и технологии : сборник трудов XVIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск. — 2012. — Т. 3 . — С. 175-176
10. Горешнев, М. А., Казарин А. Н.. Исследование влияния ВЧ нагрева при сушке древесины комбинированным методом в вакууме // Современные техника и технологии : сборник трудов XVII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск. — 2011. — Т. 3 . — С. 193-194
11. Горешнев М. А., Казарин А. Н., Алексеев М. В.. Моделирование тепломассопереноса древесины при нагреве в камере с пониженным давлением // Современные техника и технологии : сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск. — 2010. — Т. 3 . — С. 172-173.
12. Горешнев М.А., Казарин А.Н., Алексеев М.В. Исследование физических зависимостей сушки древесины кондуктивным и ВЧ способами// XII Всероссийский студенческий научно-технический семинар «Энергетика: экология, надёжность, безопасность».- Томск, 2010.- т.4.- с. 215-218

Цитируемая литература

1. Лыков А.В. , Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. / М. – Л. Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
2. Кречетов И. В. Сушка и зашита древесины.- М.: Лесн. промышленность, 1987.- 328 с.