

На правах рукописи

КОТЛОВ ВИТАЛИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

**ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ НАПРЯЖЁННО-
ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Иваново, 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» и ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Научный консультант: **Федосов Сергей Викторович**
доктор технических наук, профессор, академик РААСН

Официальные оппоненты: **Травуш Владимир Ильич**
академик, вице-президент РААСН, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора, главный конструктор ЗАО «Горпроект», г. Москва

Рудобашта Станислав Павлович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий" Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева, г. Москва

Лабудин Борис Васильевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Инженерные конструкции, архитектура и графика" Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, Архангельск

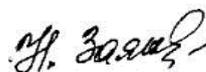
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), г. Казань

Защита состоится 21 мая 2021 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21, аудитория У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета, 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21 и <http://ivgpu.com>.

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Н.В.Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современный опыт малоэтажного строительства за рубежом и в нашей стране показывает, что наибольшим спросом пользуются строительные конструкции, выполненные из экологически чистого материала. Одним из таких материалов является, в частности, древесина.

До восьмидесяти пяти процентов индивидуальных жилых домов в мире выполняются с применением деревянных конструкций с использованием нагельных соединений (металлических зубчатых пластин, цилиндрических и пластинчатых нагелей).

Анализ современных способов сборки элементов деревянных конструкций показывает явное преимущество нагельных соединений по сравнению с другими видами соединения, поскольку их можно выполнять как в заводских условиях, так и непосредственно на строительных площадках. Используя данный вид соединения элементов, можно создавать балки, рамы, фермы, арки и многие другие строительные конструкции, последующая эксплуатация которых может осуществляться как в стационарном режиме, так и в режиме с циклически изменяющимися параметрами внешней среды – температуры и влажности.

В большинстве трудов, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям деревянных конструкций, отмечается негативное влияние повышенных значений температуры и влажности на материал древесины, но мало уделяется внимания их воздействию на нагельные соединения эксплуатируемых конструкций. Сознавая перспективность данного вида соединения в деревянных конструкциях, можно сказать, что учет процессов теплопереноса в нагельных соединениях элементов деревянных конструкций является актуальной задачей, решение которой позволит уточнить методику их расчета и повысить надежность, долговечность и устойчивость строительных конструкций.

Степень разработанности темы

Общая проблема исследования работоспособности нагельных соединений включает несколько составных частей: исследование свойств металлических нагелей и изучение вопросов механических взаимодействий в системе «металл-древесина», а также исследование свойств деловой древесины, используемой для производства стропильных конструкций.

Разработкой методик определения несущей способности, прочности, устойчивости и надежности деревянных конструкций, в том числе и нагельных соединений, занимались такие учёные, как Т. Гестеши, В.Ф. Иванов, А. Жаксон, В.Н. Маслов, Б.Л. Николаи, П.П. Ершов, М.Е. Каган, Г.Г. Карлсен, В.М. Коченов, А.В. Леняшин, И.А. Цыплёнков.

За рубежом основоположником современных нормативных документов по расчёту деревянных конструкций Еврокода был К.В. Йохансен. Он разработал методику расчёта, в которой была применена теория пластичности для определения прочности соединения. Впоследствии в своих работах Т. Moller, N.J. Larsen, P.Aune и M. Patton-Mallory. R.J. Whale и В.О. Nilson экспериментально подтвердили адекватность этой теории.

Исследованию свойств древесины и изготовлению разнообразных строительных конструкций из нее посвящено большое количество работ российских ученых: Ю.М. Иванова, А.Ф. Богдановича, А.А. Муратова, А.С. Прокофьева, С.В. Поветкина, Г.Г. Никитина, П.Л. Леонтьева, Б.С. Чудинова, Г.С. Шубина, Ю.В. Пискунова, В.Г. Миронова, В.И. Травуша, А.С. Фрейдина, Б.В. Лабудина, К.П. Пятикрестовского, И.С. Инжутова, Д.К. Арленинова, В.М. Вдовина, В.Н. Волынского, П.А. Дмитриева, В.В. Ермолаева, В.И. Жаданова, Л.М. Ковальчука, В.Г. Леннова, А.А. Титунина, С.Б. Турковского, В.В. Пуртова, С.И. Рощиной, А.Б. Шмидта, а также зарубежных ученых.

Решением проблем математического моделирования процессов теплопереноса в системах «газ-твердое тело», в том числе применительно к процессам термической обработки древесины, занимались: А.В. Лыков, В.В. Красников, С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов, А.С. Гинзбург, П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, Б.С. Сажин, А.А. Долинский, Г.С. Шубин, С.В. Федосов, Р.Р. Сафин, Т. Шервуд, О. Кришер, Г. Карслоу, Д. Егер, А. Маджумдар, Ч. Струмилло и многие другие российские и зарубежные исследователи.

Целью диссертационного исследования является обобщение и развитие научных основ создания нагельных соединений деревянных строительных конструкций и обеспечения их прочности, надежности и долговечности в процессе эксплуатации на основе разработки и применения математических моделей процессов теплопередачи в древесине таких соединений при динамических знакопеременных эксплуатационных условиях.

Поставленная цель требует решения следующих задач.

1. Формирование методологии обеспечения эксплуатационной надежности и долговечности деревянных строительных конструкций, отличающейся от известных тем, что в ее состав введены этапы, посвященные теоретическому исследованию циклических процессов теплопереноса в соединенных нагелями элементах из древесины, определению ресурса и применению автоматизированных систем контроля эксплуатационных характеристик нагельных соединений в условиях динамического изменения климатических факторов.

2. Формулировка теоретических представлений и разработка численно-аналитической математической модели нестационарного теплопереноса в системе «цилиндрический нагель – древесина» при произвольном законе изменения температуры среды эксплуатации.

3. Разработка теоретических представлений и численно-аналитической математической модели нестационарного теплопередачи в древесине болтового нагельного соединения, осложненного капиллярной конденсацией и испарением влаги.

4. Разработка двумерной математической модели взаимосвязанного теплопередачи в древесине нагельных соединений с металлическими зубчатыми пластинами (МЗП).

5. Формирование инженерной методики расчета ресурса и мониторинга теплообменных процессов в древесине нагельных соединений для определения их эксплуатационных показателей.

6. Программно-алгоритмическая реализация разработанных математических моделей и расчетных методик и их апробация в целях проверки их работоспособности и адекватности реальным процессам.

7. Разработка и реализация лабораторной экспериментальной установки для комплексного исследования циклических процессов теплопереноса в древесине нагельных соединений при их нарыженно-деформированном состоянии и автоматизированной системы мониторинга климатических, температурно-влажностных и механических показателей эксплуатации нагельных соединений строительных конструкций из древесины.

8. Изучение закономерностей процессов теплопереноса и их воздействия на показатели и характеристики нагельных соединений; разработка на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований научно обоснованных рекомендаций по практическому применению результатов работы для создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных строительных конструкций из древесины; оценка показателей технико-экономической эффективности полученных результатов.

Объектом исследования являются соединения элементов деревянных конструкций, выполненные с помощью нагелей.

Предмет исследования составляют теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплопереноса в нагельных соединениях элементов деревянных конструкций.

Теоретическая и методологическая основа исследования. Теоретической базой выполненной диссертации являются современные представления о закономерностях теплопереноса; методы математической физики, включающие решение дифференциальных уравнений в частных производных на основе интегральных преобразований и, в частности, с помощью преобразования Лапласа; современные методы оценки технико-экономических показателей производственных процессов.

Для решения задач экспериментальных исследований процессов переноса теплоты и влаги в древесине нагельного соединения использовались стандартные методики определения теплофизических характеристик материалов в соответствии с ГОСТ, а также современные приборы и оборудование.

Научная новизна. В работе содержатся следующие существенные результаты, имеющие научную новизну и полученные лично соискателем.

1. Методология обеспечения эксплуатационной надежности и долговечности деревянных строительных конструкций, отличающейся от известных тем, что в ее состав введены этапы, посвященные теоретическому исследованию циклических процессов теплопереноса в соединенных нагелями элементах из древесины, определению ресурса и применению автоматизированных систем контроля эксплуатационных характеристик нагельных соединений в условиях динамического изменения климатических факторов.

2. Теоретические представления и численно-аналитическая математическая модель нестационарного теплопереноса в системе «цилиндрический нагель – древесина» при произвольном законе изменения температуры среды эксплуатации.

3. Теоретические представления и численно-аналитическая математическая модель нестационарного теплового переноса в древесине болтового нагельного соединения, осложненного капиллярной конденсацией и испарением влаги.

4. Двухмерная математическая модель взаимосвязанного тепло- и влагопереноса в древесине нагельных соединений с металлическими зубчатыми пластинами (МЗП).

5. Инженерная методика расчета ресурса и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения определения его эксплуатационных показателей.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

Теоретическая значимость работы состоит в дальнейшем развитии общей теории процессов тепломассопереноса в твердых средах, а также методологии и математического моделирования процессов теплового переноса в нагельных соединениях строительных конструкций из древесины. Практическая значимость заключается в том, что полученные результаты позволяют создавать и обеспечивать в процессе эксплуатации надежные и долговечные строительные конструкции из древесины, а также прогнозировать их ресурс как теоретическими методами, так и на основании мониторинга эксплуатационных показателей нагельных соединений этих конструкций.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Полученные научные положения и выводы, приведенные в работе, основаны на результатах многолетних экспериментов, выполненных в лабораторных и производственных условиях с применением современных методов исследований, и их статистической обработки, подтверждены сходимостью результатов компьютерного моделирования и результатов эксперимента, а также их корреляцией с известными закономерностями.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно поставлены цели и задачи, выбраны объекты и методы исследований, разработана программа теоретических и экспериментальных изысканий, лично выполнены, обработаны и проанализированы основные результаты, практическая реализация которых проводилась также при непосредственном участии автора, автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и обсуждении их результатов.

На защиту выносятся:

1. Предложенные теоретические разработки, составляющие научную новизну и представляющие собой удобный и эффективный инструмент создания и обеспечения эксплуатации надежных и долговечных деревянных строительных конструкций на основе всестороннего исследования процессов теплового переноса в древесине с нагельными соединениями.

2. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований, доказывающие эффективность предложенной (усовершенствованной) общей методологии создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных строительных конструкций из древесины.

3. Рекомендации и средства по практическому применению результатов выполненной работы.

Апробация результатов исследования

Основные научные положения и результаты исследований докладывались, обсуждались и были одобрены на: научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Поволжского государственного технологического университета (г. Йошкар-Ола, ПГТУ, 1987, 1996, 2011, 2015-2018 гг.); Межрегиональной научно-практической конференции «Региональные проблемы строительного и дорожного комплексов» (г. Йошкар-Ола, МарГТУ, 2000 г.); Международной междисциплинарной научной конференции «Вавиловские чтения» (г. Йошкар-Ола, ПГТУ, 2003, 2005, 2007, 2010, 2011, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов» (г. Йошкар-Ола, МарГТУ, 2004, 2013 гг.); Всероссийской конференции «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции» (г. Чебоксары, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2005, 2012, 2014, 2015 гг.); II Международной научно-практической конференции «Инновации и технологии в лесном хозяйстве» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, 2012 г.); Всероссийской научной конференции преподавателей, аспирантов, соискателей и студентов по проблемам архитектуры и строительства (г. Казань, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2012, 2014, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения» (г. Йошкар-Ола, МарГТУ, 2012 г.); 14-й Международном научно-промышленном форуме «Великие реки» (г. Нижний Новгород, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2012-2014, 2016 гг.); Международной научно-технической конференции, посвященной 30-летию юбилею кафедры строительных конструкций ОГУ, 45-летию юбилею архитектурно-строительного факультета «Инновационные строительные технологии, теория и практика» (г. Оренбург, Оренбургский государственный университет, 2013, 2015 гг.); VIII Академические чтения РААСН – Международной научно-технической конференции «Механика разрушения строительных материалов и конструкций» (г. Казань, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2014 г.); V Международной научно-практической конференции «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014 г.); Всероссийской (с международным участием) научной конференции студентов и молодых ученых «Модернизирующая Россия: культура, техника, человек» (г. Йошкар-Ола, ПГТУ, 2015 г.); III Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса» (г. Кострома, Костромской государственный технологический университет, 2015 г.); Первых Международных Лыковских научных чтениях, посвященных 105-летию академика А.В. Лыкова «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе» (г. Москва, Российский государственный аграрный университет

имени К.А. Тимирязева, 2015 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности» (г. Москва, Московский государственный университет дизайна и технологии, 2015 г.); Межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием) «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера» (ПОИСК-2017) (г. Иваново, Ивановский государственный политехнический университет, 2017г.); VII Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения») (г. Москва, Российская академия архитектуры и строительных наук, 2018 г.); XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (г. Новосибирск, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2018г.); V Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт», направление конференции «Цифровые технологии: декларации и реальность» (г. Тамбов, Тамбовский государственный технический университет, 2018 г.); VII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (г. Новосибирск, Сибстрин, 2018 г.); XX Международной конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры» (г. Тула, Тульский государственный технический университет, 2019 г.); VI Международной сетевой научно-практической конференции «Интеграционные процессы в научно-техническом и образовательном пространстве» вузов-участников Российско-Кыргызского консорциума технических университетов (РККТУ) (г. Бишкек, 2020 г.).

Разработан «Лабораторный комплекс для определения теплотехнических характеристик образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний в климатических условиях Республики Марий Эл», удостоенный Государственной премии Республики Марий Эл в области архитектуры и строительства им. А.А.Сурикова (2017 г.).

Публикации по предмету исследований включают 76 научных работ, в том числе 3 монографии, 5 статей – в изданиях, индексируемых в международной цитатно-аналитической базе данных Scopus, 16 статей – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 37 статей опубликованы в сборниках трудов международных, всероссийских конференций и межвузовских сборниках, 6 авторских свидетельств и 10 патентов.

Структура и объём диссертации. Работа включает введение, 6 глав, заключение, библиографический список и приложения. Библиографический список содержит 234 источника. Общий объём диссертации составляет 342 страницы, из них основной текст – 286 страниц, библиографический список – 33 страницы, приложения – 22 страницы.

Во введении содержится обоснование актуальности темы, цель и основные задачи исследования, раскрываются научная новизна и практическая ценность работы, её структура.

В первой главе произведен анализ литературных сведений о краткой истории применения строительных конструкций из древесины, структурно-механических и теплофизических характеристиках древесины как строительного материала, основных способах крепления узловых элементов строительных конструкций из древесины (нагельными соединениями), современных теоретических представлениях о напряжённо-деформированном состоянии конструктивных элементов нагельных соединений, воздействии среды эксплуатации на физико-механические и теплофизические характеристики нагельных соединений, физико-теоретических методах изучения процессов переноса теплоты и влаги в древесине строительных конструкций, а также приведена информация по другим вопросам создания и применения строительных конструкций из древесины.

Показано, что общая проблема создания и обеспечения надежной и долговечной эксплуатации деревянных строительных конструкций сводится к исследованию работоспособности нагельных соединений с учетом влияния эксплуатационных факторов.

Нагельные соединения (как болтовые, так и с применением МЗП) получили к настоящему времени широкое применение при возведении деревянных строительных конструкций благодаря своей технологичности, простоте, прочности, надежности и долговечности. Отрицательной стороной нагельных соединений является их старение с течением времени вследствие коррозии металлических элементов и разрушения древесины под действием процессов тепловлагопереноса, протекающих при постоянном напряженно-деформированном состоянии материалов соединения под действием эксплуатационных факторов.

Современные знания свидетельствуют о том, что срок службы нагельных соединений, который может колебаться в широких пределах в зависимости от конкретных условий эксплуатации, как правило, определяет ресурс деревянной строительной конструкции, поскольку такие соединения в большинстве случаев представляют собой слабые места этой конструкции.

Исследователями установлено, что механическая прочность и эксплуатационные характеристики нагельных соединений во многом определяются физико-механическими и теплофизическими свойствами древесины, которые в свою очередь однозначно характеризуются двумя важнейшими факторами: температурой и влажностью как самого материала, так и среды эксплуатации.

Изменение температурно-влажностных параметров материалов нагельных соединений в процессе их эксплуатации имеет сложный характер, поскольку происходит в результате явлений тепломассопереноса в неподвижных и движущихся средах, которые нередко сопровождаются фазовыми или химическими превращениями, а также другими физико-механическими и теплофизическими эффектами. Хотя в настоящее время общие представления о характере таких процессов разработаны достаточно полно, тем не менее, практически отсутствуют конкретные расчетные методики и математические модели процессов тепловлагопереноса в нагельных соединениях.

В связи с этим актуальной задачей является создание таких теоретических инструментов, которые позволили бы квалифицированно решать вопросы изготовления прочных нагельных соединений и обеспечения их надежной и долговечной эксплуатации.

В настоящее время существуют благоприятные предпосылки создания упомянутых выше математических моделей благодаря существованию теории взаимосвязанного тепломассобаропереноса, описываемого системой трех дифференциальных уравнений, которую можно использовать в качестве основы перспективных теоретических разработок. Решение такой задачи может быть существенно упрощено с помощью ряда обоснованных допущений, в результате чего изучение процессов тепломассовлагопереноса сводится к решению только двух дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений. Краевые условия решения этих уравнений определяются параметрами окружающей среды и характеристиками металлических нагельных соединений.

Вторая глава посвящена разработке и обоснованию методов создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных нагельных соединений. Предлагаемая методология представлена в виде блок-схемы на рис. 1, на которой отмечены как существующие математические модели и методы, так и подлежащие разработке согласно приведенным задачам диссертационной работы.

К числу вновь предложенных элементов методологии относятся математическая модель нестационарных процессов тепловлагопереноса в древесине болтовых нагельных соединений, математическая модель нестационарных процессов тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений с применением МЗП и инженерная методика расчета и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения для определения его эксплуатационных показателей.

В настоящей главе рассмотрены две математические модели из числа требующих создания: численно-аналитическая математическая модель нестационарного теплопереноса в древесине болтового нагельного соединения и численно-аналитическая математическая модель нестационарного влагопереноса в древесине такого соединения, в том числе осложненного капиллярной конденсацией и испарением влаги.

Важным преимуществом предложенных математических моделей является то, что они позволяют определять не только изменение температуры и влагосодержания в пространстве (в объеме древесины) и во времени, но также изменение градиентов температуры и влагосодержания, так как в некоторых случаях знание градиентов этих величин может иметь большее практическое значение, чем знание самих этих показателей.

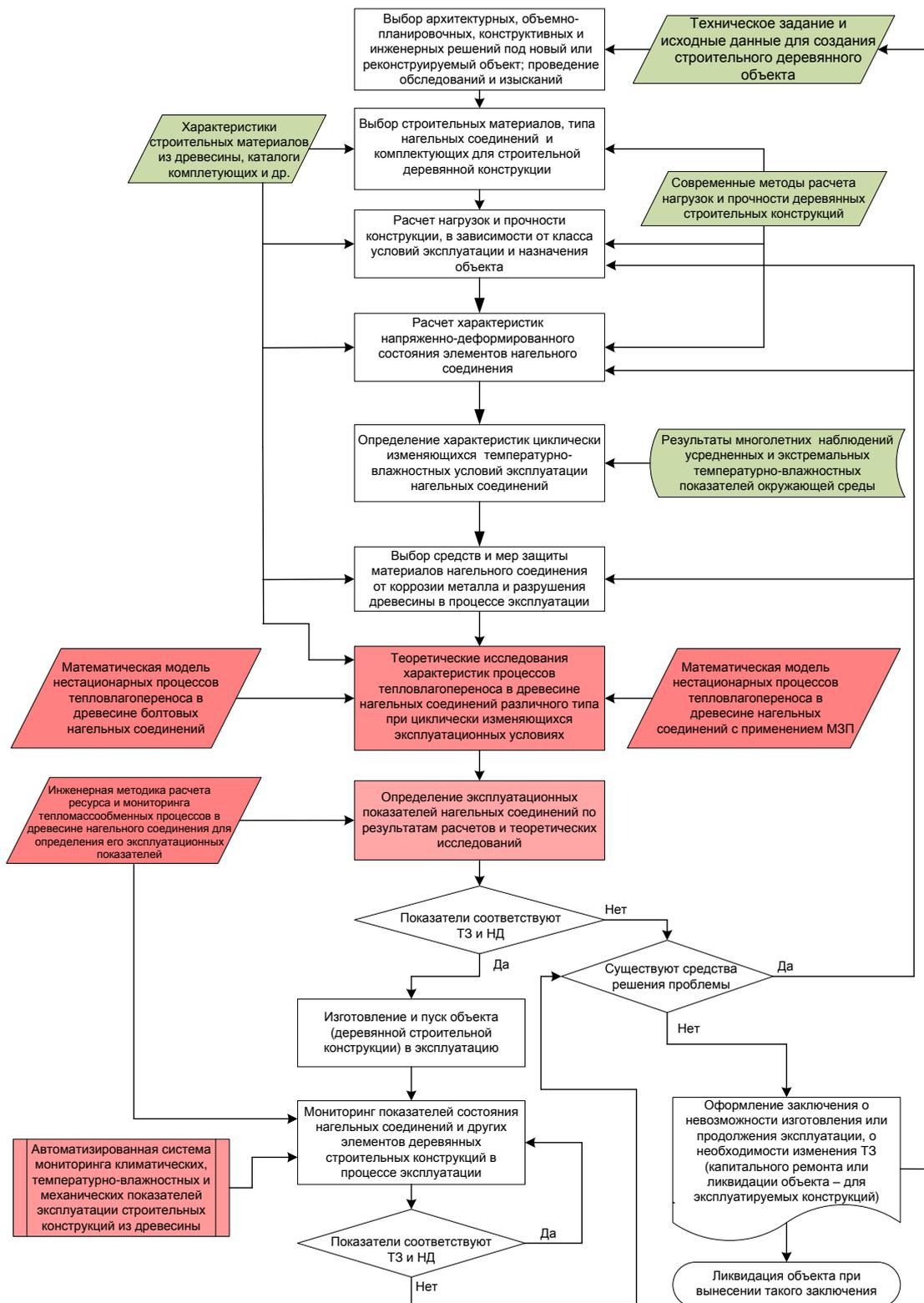


Рисунок 1. Блок-схема процесса создания надежных и долговечных строительных конструкций из древесины на основе изучения процессов теплопередачи в нагельных соединениях и обеспечения требуемых эксплуатационных показателей: ТЗ – техническое задание; НД – нормативный документ. Условные обозначения: зелёный цвет – существующие модели и методы; красный – модели и методы, подлежащие разработке; белый – процессы решения проблемы

При разработке указанных математических моделей использовалась расчетная схема, представленная на рис. 2.

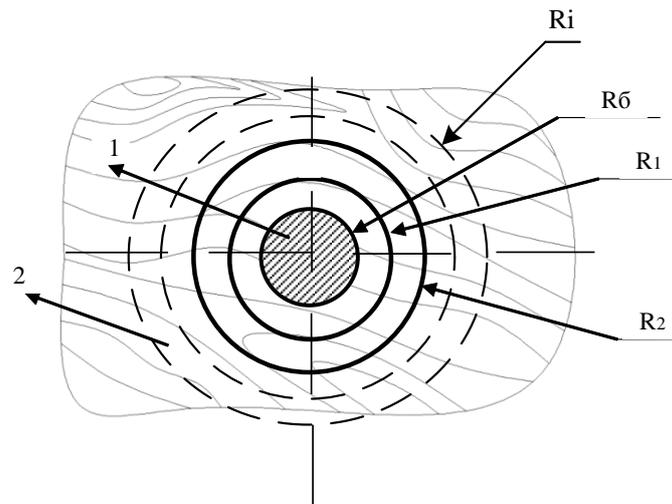


Рисунок 2. Моделирование древесины системой колец, удовлетворяющих условию $R_0 < R_1 < R_2 < \dots < R_i$, где радиусы колец возрастают от радиуса R_0 нагеля (болта) 1 до некоторого i го радиуса R_i в неограниченной пластине 2

Разработка математической модели основана на использовании теории «микропроцессов», в соответствии с которой процесс взаимодействия конструкции с окружающей средой представляется дискретной цепью последовательных стадий процесса («микропроцессов»), на каждой из которых температурно-влажностные параметры среды считаются постоянными, но скачкообразно меняющимися при переходе от одного «микропроцесса» к другому. При этом начальными условиями для расчета тепло-влажностного переноса на каждом последующем этапе являются результаты расчета на предыдущем этапе. В цилиндрической системе координат при пространственном разделении «микропроцессов» отдельные фазы ограничиваются пределами колец древесины (рис. 2). Известно, что при определенных соотношениях геометрических размеров задача теплопереноса в цилиндрической системе координат может быть с успехом заменена плоской (одномерной) задачей. Например, в соответствии с рис. 2 при соотношении $R_0 / R_1 < 0,5$ краевая задача теплопроводности в древесине может быть рассмотрена в системе слоев неограниченных пластин. При этом решение плоской задачи распространяется на всю многослойную систему. Такой подход позволяет упростить решение поставленной задачи.

Метод «микропроцессов» относится к полуаналитическим методам и позволяет свести краевую задачу к системе линейных однородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Основными полуаналитическими методами прикладной математики, используемыми для решения подобных задач, являются: вариационные методы, например, методы Рунге и Канторовича; методы взвешенных невязок, включая методы Галеркина или коллокаций; конечно-разностные методы, включая преимущественно методы конечных или граничных элементов. Это так называемые прямые методы, сводящие решения

дифференциальных уравнений к системам алгебраических линейных уравнений. Метод «микропроцессов» примыкает к этой группе полуаналитических методов.

Для первого слоя (см. рис. 2) за ноль координаты целесообразно принять значение R_0 (поверхность болта). При этом изменение координаты будет происходить в пределах $0 \leq r \leq \delta_1$. И тогда для первого этапа расчетов и первого «кольца» древесины краевую задачу нестационарного процесса теплопроводности в безразмерных величинах можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(\bar{r}, Fo_1)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_1(\bar{r}, Fo_1)}{\partial \bar{r}^2} \text{ при } Fo_1 > 0 \text{ и } 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad (1)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo_1) \Big|_{Fo_1=0} = T_{1,0}(\bar{r}); \quad (2)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo_1) \Big|_{\bar{r}=0} = T_{0,0}; \quad (3)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo_1) \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (4)$$

Безразмерная температура и влажность i -го слоя древесины определяются соответственно в виде $T_i(\bar{r}, Fo_i) = \frac{t_i(r, \tau) - t_{R,i}}{t_{0,i}}$ и $U_i(\bar{r}, Fo_i) = \frac{u_i(r, \tau) - u_H}{u_H}$, где \bar{r} – безразмерный радиус произвольной точки в цилиндрической или полярной системе координат в плоскости относительно центра болта, $\bar{r} = \frac{r}{R_0}$; r – радиус точки от центра нагеля в слое древесины, м; u_H – начальная (равновесная) влажность древесины; R_0 – наружный радиус болта, м; τ – текущее время, с; $Fo = \frac{a \cdot \tau}{r^2}$ – число Фурье; $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; $\lambda(u, t)$ – теплопроводность, Вт/(м·К); $\rho(u, t)$ – плотность, кг/м³, $c(u, t)$ – теплоемкость, Дж/(кг·К), материала древесины в общем зависящие от влагосодержания и температуры, кг/м³. Индекс i приобретает значения $i=1, 2, \dots, n$, где n – число слоев древесины (см. рис. 2).

Решение краевой задачи (1)–(4) производится методом интегрального преобразования Лапласа. В результате такого решения получено следующее выражение для температуры в пространстве (в пределах первого слоя– $R_0 \dots R_1$) и во времени:

$$T_1(\bar{r}, Fo_1) = T_{R_1} \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1) \right] + \\ + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1). \quad (5)$$

Кроме температуры, практическое значение имеет знание величины градиента температуры, которую можно определить с помощью выражения

$$\frac{dT_1(\bar{r}, Fo_1)}{d\bar{r}} = -T_{R,1} - 2T_{R,1} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1) + \\ + 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \cos(\pi n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1). \quad (6)$$

Для продолжения вычислений в пределах второго слоя $R_1 \div R_2$ (см. рис.2) необходимо знать величину $Ki = Ki_1^*$, а для её определения – значение плотности теплового потока q_1 на границе первого и второго слоев. Используя выражение (5), нетрудно получить формулу для определения искомых величин:

$$Ki_1^* = - \left. \frac{dT_1(\bar{r}, Fo_1^*)}{d\bar{r}} \right|_{\bar{r}=1} = T_{R,1} + \quad (7)$$

$$+ \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1^*) \cdot \left[T_{R,1} - \pi n \int_0^1 T_0(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \right] \right\}.$$

В полученных выражениях символом «*» обозначено, что данная величина относится к моменту времени, когда температурная кривая достигнет безразмерной координаты $\bar{r} = 1$.

Для второго слоя (см. рис. 2) по аналогии с первым слоем за ноль координаты необходимо принять значение R_1 .

Задача для второго слоя будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T_2(\bar{r}, Fo_2)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_2(\bar{r}, Fo_2)}{\partial \bar{r}^2} \text{ при } Fo_2 > 0; \quad 0 < \tau \leq \Delta \tau_2; \quad \bar{r} = \frac{r}{\delta_2}, \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad (8)$$

$$T_2(\bar{r}, Fo_2) \Big|_{Fo_2=0} = T_{2,0}(\bar{r}); \quad (9)$$

$$- \lambda_2 \frac{\partial T_2(\bar{r}, Fo_2)}{\partial \bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = q_1; \quad (10)$$

$$T_2(\bar{r}, Fo_2) \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (11)$$

В результате решения этой задачи получено выражение для определения величины температуры в пространстве и во времени в пределах второго слоя (рис. 2), т.е. в пределах второго «микропроцесса»:

$$T_2(\bar{r}, Fo_2) = Ki_1 \left\{ (1 - \bar{r}) - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{r} \right] \cdot \exp \left[- \frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_2 \right] \right\} + \quad (12)$$

$$2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{r} \right] \cdot \exp \left[- \frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_2 \right] \cdot \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi$$

В целях проверки полученных решений были выполнены вычисления с использованием представленных выражений в безразмерных величинах и преобразованием в размерные величины.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты таких вычислений, которые демонстрируют адекватность разработанной математической модели тепловых процессов и алгоритма реализации модели реальным физическим явлениям.

Если продолжить выкладки по аналогии с первым и вторым слоями, можно получить расчетные соотношения для третьего и последующих слоев и выполнить дальнейшие вычисления. Полное количество слоев в расчетной схеме, представленной на рис. 2, и их толщина определяются исходя из особенностей конкретной практической задачи.

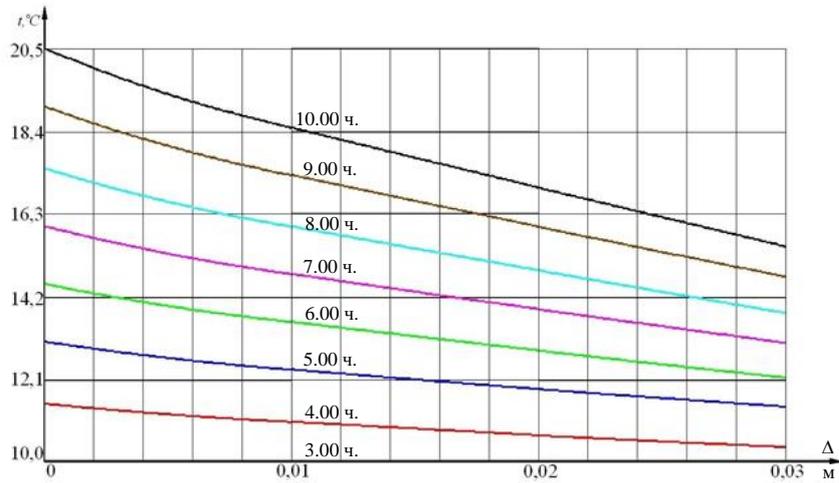


Рисунок 3. Результаты расчетов теплопереноса в древесине болтового нагельного соединения в физических переменных во временном интервале с 03.00 до 10.00 ч. (июль 2012 года, Йошкар-Ола): Δ – расстояние от поверхности болта (R_0); $R_0=0,008$ м (болт М16); $R_1=0,023$ м; $R_2=0,038$ м

Решение нестационарной задачи влагопереноса в болтовом нагельном соединении можно выполнить аналогично тому, как решается задача теплопроводности. В результате такого решения получены следующие выражения для определения значения влагосодержания во времени и пространстве в пределах первого и второго слоев соответственно:

$$U_1(\bar{r}, Fom_1) = U_H \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fom_1) \right] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fom_1); \quad (13)$$

$$U_2(\bar{r}, Fom_2) = Ki_{m1} \left\{ (1 - \bar{r}) - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\bar{r}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2m-1)^2 Fom_2\right] \right\} + 2 \int_0^1 U_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\bar{r}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2m-1)^2 Fom_2\right] \cdot \int_0^1 U_{2,0}(\xi) \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\xi\right] d\xi. \quad (14)$$

Вычисления с использованием выражений (13) и (14) подтвердили их адекватность существующим физическим представлениям влагопереноса в древесине.

Наряду с рассмотренными в этой главе численно-аналитическими моделями нестационарного теплопереноса в древесине болтового нагельного соединения и нестационарного влагопереноса в древесине такого соединения, в том числе осложненного капиллярной конденсацией и испарением влаги, в работе также получено решение задачи по численной реализации математической модели взаимосвязанных процессов конденсации, испарения и массопроводности влаги.

Третья глава посвящена разработке математической модели процессов тепловлагопереноса в древесине узлового соединения в форме металлических зубчатых пластин (МЗП).

При изучении процесса теплопереноса в такой системе следует учитывать, что зубья МЗП, которые заглубляются в толщу древесины при запрессовке пластин, будут иметь всегда такую же температуру, что и сами пластины, из-за значительно более высокой теплопроводности металла по сравнению с древесиной. А это значит, что наряду с тепловыми потоками и температурным полем в объеме деревянной детали в промежутке между двумя пластинами аналогичные явления будут иметь место между соседними зубьями в направлении параллельном поверхности пластин. Это означает, что применительно к данному случаю необходимо решить задачу нестационарного тепловлагодпереноса в двухмерном пространстве объема древесины. Расчетная схема такого случая приведена на рис. 4.

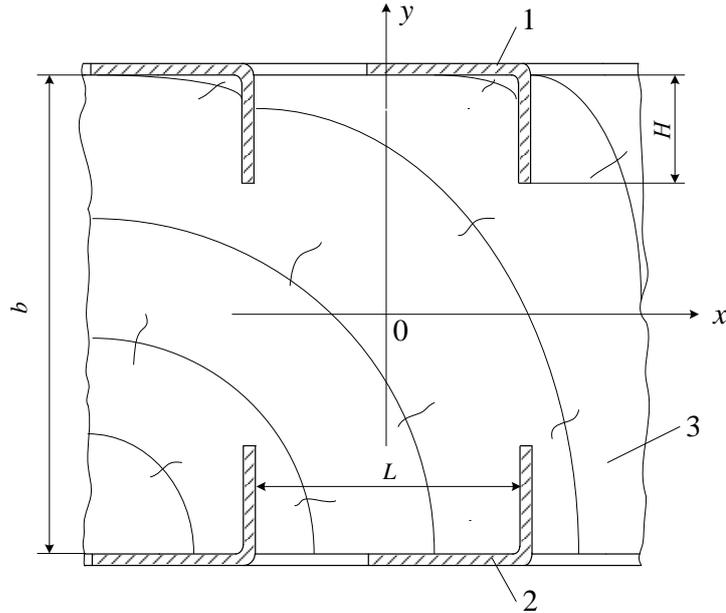


Рисунок 4. Фрагмент нагельного соединения с МЗП: 1,2 – встречные МЗП; 3 – древесина

В результате постановки и решения задачи нестационарного тепловлагодпереноса в рассматриваемой системе (рис. 4) по аналогии с тем, как это было сделано для болтового соединения, получены расчетные соотношения для определения температуры и влагосодержания соответственно в произвольный момент времени и произвольной точке расчетной схемы:

$$\begin{aligned}
 T(\bar{x}, \bar{y}, Fo_x, Fo_y) = & \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_x \right] + \right. \\
 & \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{2} (2n-1)^2 Fo_x \right] \right\} \times \\
 & \times \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_y \right] + \right. \\
 & \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\bar{\xi}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{\xi} \right] d\bar{\xi} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{2} (2n-1)^2 Fo_y \right] \right\}; \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U(\bar{x}, \bar{y}, Fom_x, Fom_y) = & \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fom_x \right] + \right. \\
& + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{2} (2m-1)^2 Fom_x \right] \left. \right\} \times \\
& \times \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{y} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fom_y \right] + \right. \\
& + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{y} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{2} (2m-1)^2 Fom_y \right] \left. \right\}.
\end{aligned} \tag{16}$$

В работе получены зависимости для градиентов температуры и влагосодержания по осям абсцисс $(\frac{dT}{d\bar{x}}, \frac{dU}{d\bar{x}})$ и ординат декартовой системы координат $(\frac{dT}{d\bar{y}}, \frac{dU}{d\bar{y}})$. В автореферате эти зависимости не приводятся в связи с их громоздкостью. В рукописи диссертации градиенты температуры и влагосодержания определяются формулами (3.111)-(3.113).

С использованием полученных соотношений (15) и (16) выполнены вычисления указанных параметров, отдельные результаты которых представлены на рис. 5.

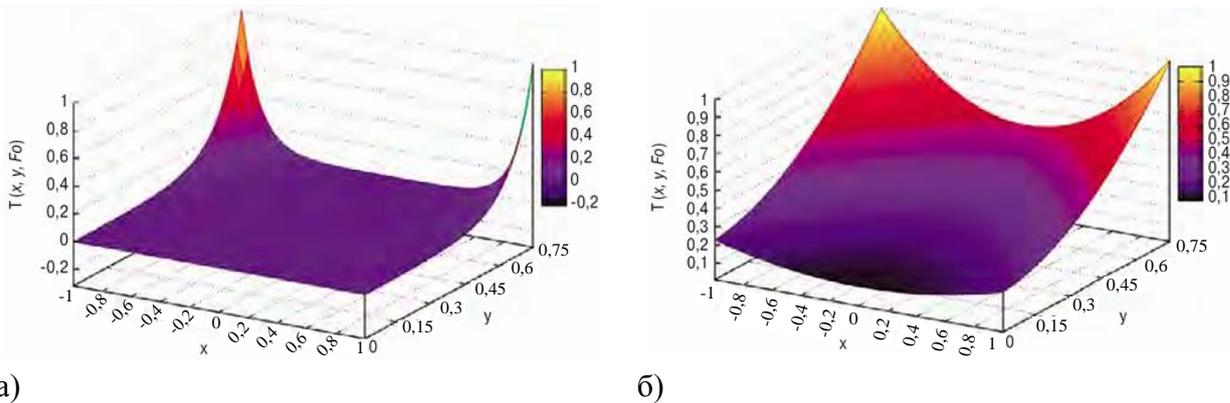


Рисунок 5. Температурное поле при значении числа Фурье: $Fo = 0,01$ (а) и $Fo = 0,2$ (б)

Полученные зависимости соответствуют качественным представлениям о процессах тепловлагопереноса во влагопроницаемых материалах, к которым можно отнести древесину. Эти зависимости в сравнении с аналогичным результатом для болтовых нагельных соединений позволяют сделать заключение, что для нагельных соединений с МЗП характерны более неоднородные температурные поля и поля влагосодержаний, а максимальная неоднородность имеет место на кончиках зубьев МЗП, запрессованных вглубь древесины.

Предложенные математические модели тепловлагопереноса позволяют досконально изучать циклические процессы увлажнения и высыхания древесины нагельных соединений при наличии колебаний температуры. Однако сами получаемые при этом характеристики таких процессов еще не позволяют дать ответ на вопрос о том, каковы состояние и ресурс нагельного соединения.

Для решения этого вопроса была разработана методика расчета допустимого ресурса нагельного соединения, которая представлена в настоящей главе. Построение методики основано на известных сведениях о структуре древесины и той роли, которую играют органические составляющие в обеспечении механической прочности ее материала. С этой точки зрения интерес представляют важнейшие соединения – целлюлоза и лигнин, практическое значение которых состоит в том, что волокна целлюлозы создают пространственный каркас материала, воспринимающий нагрузки, а лигнин выполняет функцию связующего для элементов целлюлозного каркаса. Эти составляющие в основном обеспечивают механическую прочность древесины.

Известно также, что целлюлоза обладает значительно большей химической стойкостью, чем лигнин. Соединения лигнина имеют склонность к разрушению под действием различных факторов, например, повышенной температуры, увлажнения древесины и др. Можно предположить, что циклические процессы тепломассопереноса и температура являются основными факторами, приводящими к постепенному ухудшению механических характеристик древесины нагельных соединений в условиях напряженно-деформированного состояния вплоть до разрушения. Причем для учета влияния температуры на химический процесс разрушения молекул лигнина удобно использовать один из фундаментальных законов химии – уравнение Аррениуса. Поэтому полученная расчетная методика сформирована таким образом, что она позволяет определять предельно допустимое число циклов увлажнения и высыхания древесины с учетом температуры, при которой происходили эти циклические процессы, с помощью следующих выражений:

$$n_{\text{дон}} = \frac{\ln K_3}{A \cdot \Delta t} \exp\left(\frac{E}{k \cdot T}\right). \quad (17)$$

– для случая, когда следующие друг за другом процессы увлажнения и высыхания древесины имеют одинаковую продолжительность $\Delta t_i = \Delta t = \text{const}$ и протекают при одинаковой температуре $T_i = T = \text{const}$, и

$$\ln K_3 = A \cdot \sum_{i=1}^{n_{\text{дон}}} \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_i}\right). \quad (18)$$

– для случая произвольных значений Δt_i и T_i в каждом цикле, где K_3 – отношение величины предела прочности к величине допускаемого механического напряжения в нагельном соединении; A и E – постоянные уравнения Аррениуса; m – число циклов увлажнения и высыхания.

Для того чтобы воспользоваться формулой (18), весь период эксплуатации разбивается на m участков с приблизительно неизменным значением температуры T_i на основании сведений государственных метеослужб о колебаниях климатических факторов в месте нахождения строительной конструкции из древесины. В процессе эксплуатации производится регистрация фактического температурно-влажностного режима работы нагельных соединений. На основании

этих сведений с помощью предложенных математических моделей определяется фактическое число циклов увлажнения и высыхания древесины нагельных соединений. Если этот показатель превысит предельное значение, то решается вопрос о принятии мер по повышению работоспособности нагельных соединений или прекращению их эксплуатации (согласно рис. 1).

В четвертой главе рассматриваются оборудование и методики экспериментального исследования процессов тепломассопереноса и физико-механических характеристик материалов нагельных соединений. Другой важной целью этих исследований было определение ряда констант разработанных математических моделей и экспериментальное подтверждение предложенных в работе методологии, математических моделей и методик.

Рассмотрены характеристики пород и сортов древесины и металлических крепежей, использованных в экспериментах. Описаны методики и инструментарий для измерения характеристик тепло- и массопереноса и теплофизических параметров объектов исследования, методики исследования сорбционных характеристик древесины промышленного назначения, методики исследования механических характеристик древесины, методики изучения процессов тепломассопереноса в древесных материалах при воздействии среды эксплуатации. В частности, для изучения температурных полей в нагельных соединениях обосновано использование тепловизионной техники, а для исследования полей влагосодержания в древесине выбрано применение электронного влагомера.

Оригинальным и основным экспериментальным оборудованием настоящей работы является специально разработанный и изготовленный лабораторный стенд, для которого сформирована методика исследования процессов тепловлагопереноса в нагельных соединениях при длительных натуральных испытаниях. Стенд позволяет выполнять экспериментальные исследования влияния циклических изменений температуры и влажности на несущую и деформационную способность соединений на металлических зубчатых пластинах (МЗП) и болтовых нагельных соединений. В качестве основы стенда используется специальная климатическая камера с рычажным устройством для создания требуемых параметров температуры и влажности внутри камеры и задания необходимой нагрузки на испытываемые образцы, конструкция которой представлена на рис. 6.

В экспериментальных исследованиях использовались испытываемые образцы двух типов: макеты нагельных соединений на МЗП и болтового нагельного соединения. В ходе экспериментов образцы нагельных соединений постоянно находились под расчетной (разрушающей) растягивающей нагрузкой, создаваемой рычагом с грузами. Внутри камеры, имеющей водостойкую и теплоизоляционную обшивку, создавались переменные во времени температурно-влажностные условия вплоть до разрушения образца. В ходе экспериментов фиксировались различные параметры эксперимента с обработкой их при помощи персонального компьютера.

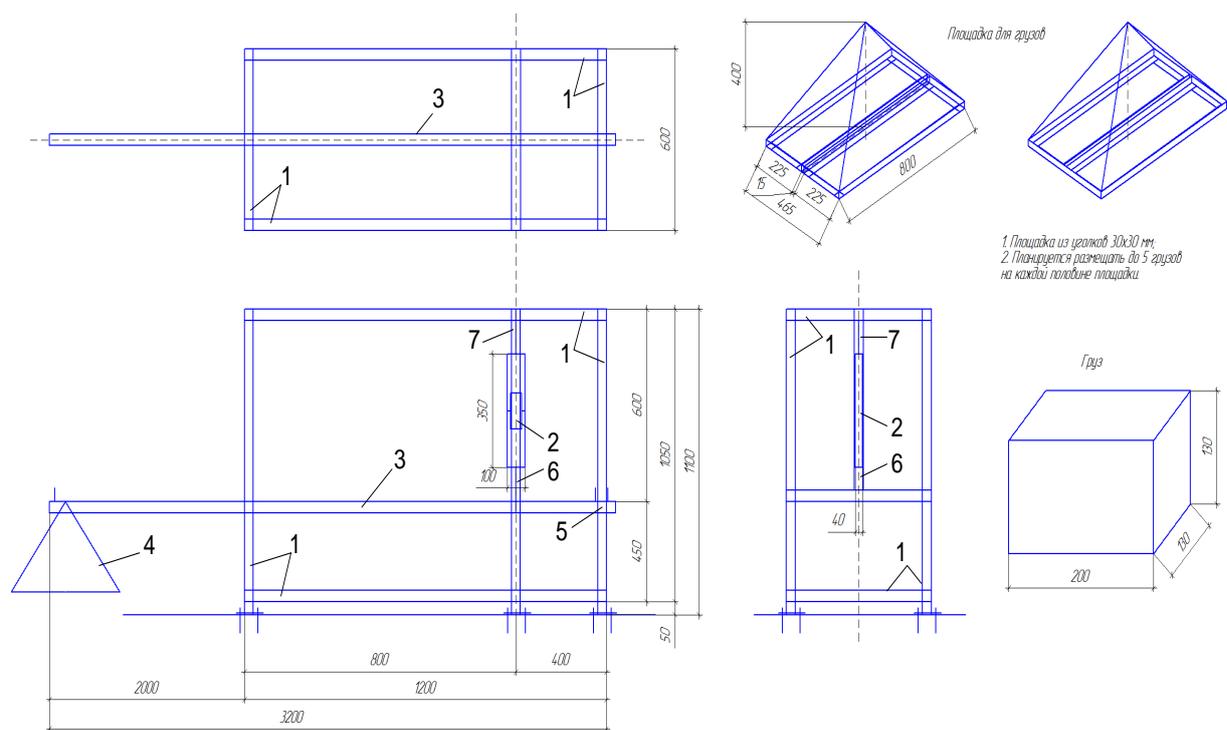


Рисунок 6. Конструкция лабораторной установки и ее элементов:

1 – каркас климатической камеры; 2 – испытуемый объект (макет нагельного соединения); 3 – нагрузочный рычаг; 4 – площадка для грузов; 5 – ось вращения нагрузочного рычага; 6 – металлический крепежный элемент для соединения макета нагельного соединения с нагрузочным рычагом; 7 – элемент крепления макета к каркасу климатической камеры

Пятая глава посвящена исследованию процессов тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений, сравнению результатов расчета и эксперимента в целях проверки достоверности математических моделей и расчетных методик, предложенных в работе, а также уточнению некоторых постоянных величин расчетных формул, полученных в теоретической части диссертации.

Для примера на рис. 7 представлены характерные инфракрасные изображения болтового нагельного соединения после нагрева болта, которые наглядно демонстрируют влияние времени и анизотропии древесины.

Действительно, теплота заметно быстрее распространяется вдоль волокон, поскольку в этом направлении теплопроводность материала, как известно, выше. Обработка полученных данных (рис. 7) и результатов вычислений с использованием разработанной математической модели показала хорошее согласование опытных и расчетных характеристик температурного поля.

Наибольший практический интерес представляют результаты экспериментов, выполненных с помощью лабораторной установки (см. рис. 6).

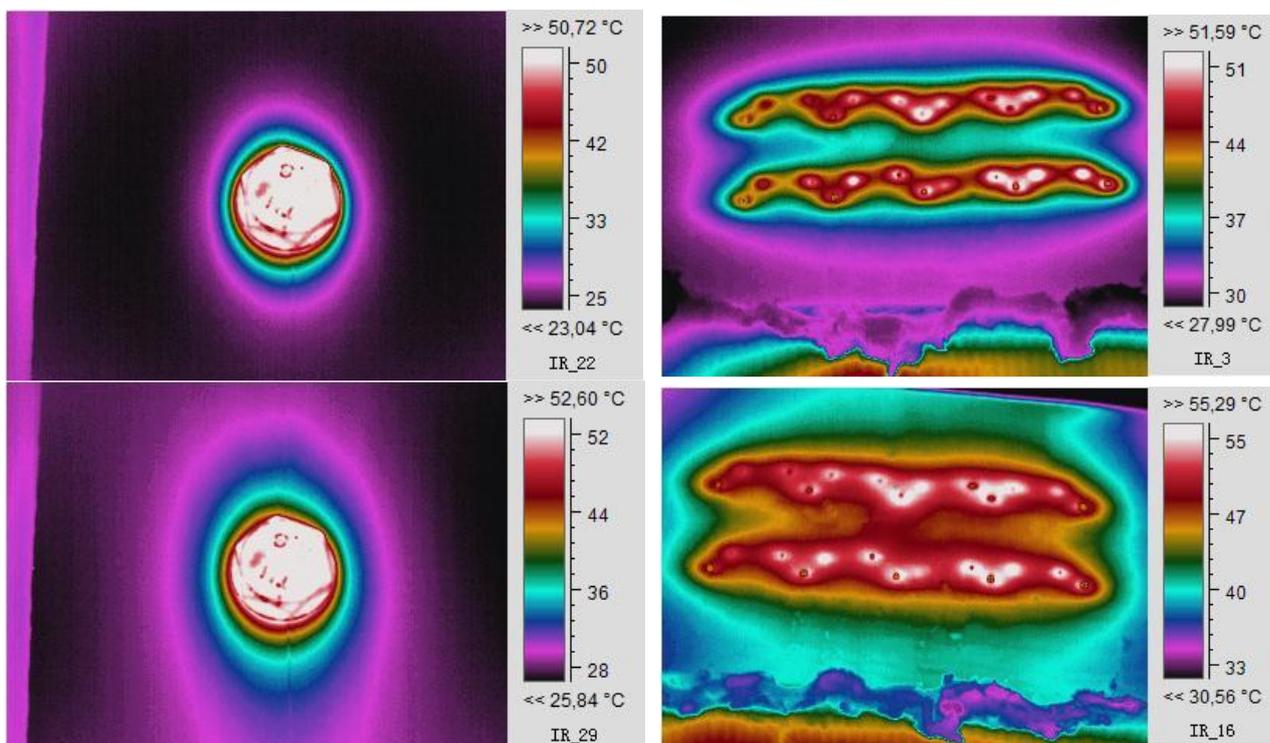


Рисунок 7. Инфракрасные изображения нагельного соединения после нагрева болта (слева) и МЗП (справа) спустя 10 мин (вверху) и 40÷45 мин (внизу) от начала опыта

На рис. 8 представлен внешний вид лабораторной установки в процессе выполнения экспериментов, а на рис. 9 показана внутренняя часть климатической камеры с установленным для испытания образцом нагельного соединения на МЗП.



Рисунок 8. Внешний вид лабораторной установки в процессе экспериментов

На рис. 10 представлен вид испытуемого образца, разрушенного в ходе экспериментов под действием большого числа циклов увлажнения и высыхания древесины образца в климатической камере.



Рисунок 9. Внешний вид образца нагельного соединения на МЗП, установленного для испытаний внутри климатической камеры с датчиками деформаций

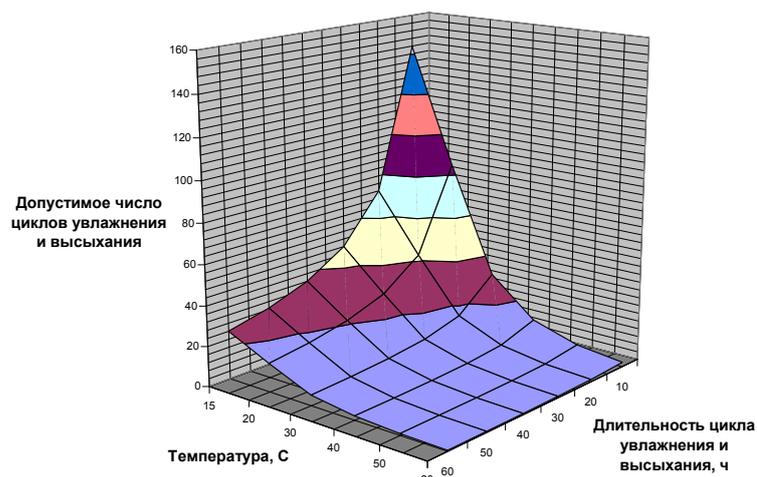


Рисунок 10. Нагельное соединение на МЗП, разрушенное в ходе экспериментов

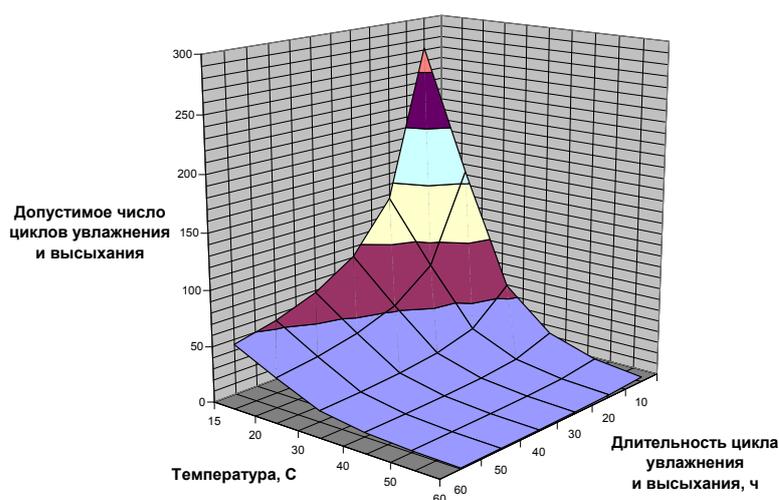
Анализ большого объема сведений, полученных в ходе экспериментов, позволил уточнить значения некоторых постоянных коэффициентов математических моделей и расчетных методик, а также описать предельные деформационные параметры циклического воздействия температурно-влажностных условий эксплуатации. Кроме того, были определены постоянные коэффициенты формул (17) и (18) и выполнены расчеты значения n_{don} , результаты которых приведены на рис. 11 и свидетельствуют о значительном влиянии на этот параметр температуры и показателя K_3 .

Зависимости на рис. 11 полностью подтверждают справедливость центральной гипотезы настоящей работы о существенном влиянии циклически меняющихся температурно-влажностных условий эксплуатации на долговечность нагельных соединений. Показано также, что для оценки состояния нагельных соединений целесообразно использовать еще и величину их абсолютной деформации Δ .

В главе шестой разработаны вопросы промышленного применения результатов диссертационного исследования. Представлены варианты использования результатов работы, рассмотрены многочисленные примеры их внедрения в практику, а также технические решения, предложенные на основании анализа и обобщения этих результатов и оформленные патентами.



$$K_3 = 3$$



$$K_3 = 8$$

Рис. 11. Расчетные зависимости допустимого числа циклов увлажнения и высухания древесины нагельного соединения от температуры и длительности такого цикла при различных значениях коэффициента запаса K_3

Одна из наиболее важных практических разработок, представленных в рассматриваемой главе, – это автоматизированная система (см. рис. 1) мониторинга климатических, температурно-влажностных и механических показателей эксплуатации строительных конструкций из древесины, которая может быть использована как для периодической оценки эксплуатационных показателей эксплуатируемой строительной конструкции из древесины, так и для непрерывного мониторинга этих показателей с использованием интернета или мобильной связи. Представлена процедура оценки пригодности строительной конструкции из древесины вообще и ее нагельных соединений в частности на основе результатов мониторинга и с использованием теоретических разработок. В основе этой процедуры лежит приведение реальных условий эксплуатации нагельных соединений к базовым показателям, полученным в ходе экспериментов ($\Delta t_0 = 40,42$ ч, 20 °С ($T_0 = 293$ К)). Приведенные показатели сравниваются с допустимыми, полученными исходя из вероятности безотказной работы нагельного соединения: $P_{Н6р} = 0,85 \div 0,9$, после принимаются практические решения.

В заключении диссертации сформулированы положения и выводы, сделанные автором по результатам выполненных исследований.

1. Представлена методология создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных деревянных строительных конструкций, отличающаяся от известной тем, что ее состав введены этапы, посвященные исследованию теоретическими методами циклических процессов теплопереноса в нагельных соединениях, определение ресурса нагельных соединений в условиях циклического изменения климатических факторов и применения автоматизированных систем контроля эксплуатационных характеристик нагельных соединений.

2. Составлены теоретические представления об особенностях физических процессов распространения тепла и влаги, а также разработана численно-аналитическая математическая модель нестационарного теплопереноса, в системе «цилиндрический нагель-древесина» при произвольном законе изменения температуры среды эксплуатации и произвольном изменении во времени и в пространстве теплофизических параметров древесины.

3. Разработаны теоретические представления и выполнена разработка численно-аналитической математической модели нестационарного влагопереноса в древесине болтового нагельного соединения, осложненного капиллярной конденсацией и испарением влаги.

4. На основе предварительно составленных качественных представлений о картине температурных полей и полей влагосодержания разработана математическая модель взаимосвязанного тепло- и влагопереноса в древесине нагельного соединения с МЗП в двухмерной системе координат, позволяющей изучать, используя методы компьютерного моделирования, процессы тепловлагопереноса в таких узлах любой конфигурации.

5. Разработана инженерная методика расчета ресурса и мониторинга теплообменных процессов в древесине нагельного соединения для определения его эксплуатационных показателей, в которой используется два параметра, характеризующих состояние такого узла (абсолютная деформация и число циклов увлажнения и высушивания древесины) и которая учитывает статистическую природу этих показателей, а их допустимые значения, определяемые с учетом общего количества нагельных соединений m в составе строительной конструкции, соответствуют значениям вероятности безотказной работы (вероятности разрушения) нагельного соединения: $P_{Нбр} = 0,85 \div 0,9$ ($P_H = 0,1 \div 0,15$); при этом для получения практических выводов разработана процедура приведения реального циклического температурно-влажностного эксплуатационного воздействия к эквивалентным параметрам, соответствующим базовым условиям, и сравнения таких параметров с допустимыми значениями; эта процедура базируется на использовании фундаментального закона физико-химических процессов – уравнения Аррениуса.

6. Выполнены программно-алгоритмическая реализация разработанных математических моделей и расчетных методик и их апробация в целях проверки их работоспособности и адекватности реальным процессам; анализ результатов апробации и сравнение результатов вычислений и экспериментов полностью

подтверждают достоверность предложенных в настоящей работе математических моделей.

7. Разработана и изготовлена лабораторная экспериментальная установка для комплексного исследования циклических процессов теплопереноса в древесине нагельных соединений при их нарыженно-деформированном состоянии и автоматизированная система мониторинга климатических, температурно-влажностных и механических показателей эксплуатации нагельных соединений строительных конструкций из древесины

8. Изучены закономерности процессов тепло(массо)переноса и их воздействия на показатели и характеристики нагельных соединений; на основании полученных результатов полностью подтвердилось предположение о существенном влиянии на работоспособность таких узлов вплоть до разрушения циклических процессов увлажнения и высыхания древесины в сочетании с температурным фактором, например, при повышении температуры с 20° С до 60° С число таких циклов, приводящих к разрушению нагельного соединения, снижается практически в 9 раз; на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные рекомендации по практическому применению результатов работы для создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных строительных конструкций из древесины; выполнена оценка показателей технико-экономической эффективности полученных результатов, показавшая высокую эффективность внедрения результатов работы.

Публикации автора по тематике диссертационной работы

Монографии

1. Поздеев А.Г. Автоматизация расчетов процесса сушки древесины: монография / А.Г. Поздеев, В.Г. Котлов, Ю.А. Кузнецова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. 140 с.

2. Теоретические основы и методы повышения энергоэффективности жилых и общественных зданий и зданий текстильной и лёгкой промышленности / С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, В.Г. Котлов, А.Б. Петрухин, Л.А. Опарина, И.А. Мартынов // Иваново: ПресСто, 2018. – 320 с.

3. Котлов, В.Г. Металлические зубчатые пластины в пространственных деревянных конструкциях: монография / В.Г. Котлов. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2020. – 190 с.

Публикации в журналах, индексируемых в Web of Science CC и Scopus

4. Методика экспериментального исследования массопроводных характеристик волокнистых и древесно-волокнистых материалов / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, М.В. Бочков, М.А. Иванова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 5 (365). С. 90-93.

5. Техничко-экономическое обоснование применения конструктивного решения здания из смешанного каркаса в отделочном производстве текстильного

предприятия / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, М.В. Бочков, Р.А. Макаров, М.А. Иванова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 1 (367). С. 143-146.

6. Струенаправляющие системы из текстильных материалов для защиты нижних бьефов гидроузлов / С.В. Федосов, А.Г. Поздеев, В.Г. Котлов, Ю.А. Кузнецова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 1 (367). С. 184-189.

7. Характер изменения надмолекулярной структуры целлюлозы в процессе ее увлажнения / Ю.Б. Грунин, Л.Ю. Грунин, Н.Н. Шевелева, Д.С. Масас, С.В. Федосов, В.Г. Котлов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 2. С. 233-236.

8. Автоматизация теплофизических исследований образцов наружных стеновых ограждений / С.В. Федосов, П.Н. Муреев, В.Г. Котлов, А.Н. Макаров, А.В. Иванов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Т. 14, № 2. С. 65-77.

9. The method of local automatic control of thermophysical parameters of external walls of buildings at the locations of condensate loss / S.V. Fedosov, P.N. Mureev, V.G. Kotlov, A.N. Makarov, A.V. Ivanov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. Т. 15. № 1. С. 41-53.

10. Динамика тепло- и влагопереноса в деревянных конструкциях, связанных металлическими креплениями [Dynamics of heat and moisture transfer in wooden structures tied with metallic fasteners] / С. В. Федосов, В. Г. Котлов // Технология сушки: международный журнал. 2019. С. 1-8; DOI: 10,1080 / 07373937.2019.1604543

Публикации в журналах из Перечня ВАК

11. Котлов В.Г. Деревянные конструкции с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов, С.Л. Машинова // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 3. С. 53-54.

12. Разработка и исследование металлодеревянной двутавровой балки с полумонокрилическими ребрами жесткости, усиленными дополнительными крепежными элементами / И.Л. Кузнецов, А.Н. Актуганов, А.А. Актуганов, В.Г. Котлов // Приволжский научный журнал. 2012. № 4. С. 47-54.

13. Федосов С.В. Индустриальные деревянные конструкции на металлических зубчатых пластинах / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, А.А. Актуганов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 11-12 (659-660). С. 39-43.

14. Работа тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки с ортогональными ребрами жесткости в виде гофр различного сечения / А.Н. Актуганов, А.А. Актуганов, О.А. Актуганов, В.Г. Котлов, И.Л. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 11-12 (659-660). С. 66-72.

15. Моделирование тепломассообмена в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 1. Общая физико-математическая постановка задачи / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М.

Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. 2014. №7. С. 86-91.

16. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 2. Динамика полей температуры при произвольном законе изменения температуры воздушной среды / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 73-79.

17. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 3. Динамика и кинетика влагопереноса / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. 2014. № 9. С. 63-69.

18. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 4. Моделирование и численная реализация процессов конденсации, испарения и массопроводности влаги / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. 2014. № 10. С. 44-50.

19. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в древесине стропильных конструкций с нагелем в форме металлической зубчатой пластины / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 179-185.

20. Федосов, С.В. Некоторые особенности методов расчета стропильных конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах с учетом явлений тепломассопереноса / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Строительные материалы. 2016. № 5. С. 52-58.

21. Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в болтовом нагельном соединении / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, М.В. Бочков, Р.А. Макаров // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 83-85.

22. Жаданов, В.И. Экспериментальные исследования деревянных балок, усиленных витыми крестообразными стержнями / В.И. Жаданов, М.А. Аркаев, В.Г. Котлов // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 5-11.

23. Федосов, С.В. Причины снижения работоспособности деревянных конструкций при эксплуатации в среде с циклически изменяющимися температурно-влажностными условиями / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Жилищное строительство. 2017. № 12. С. 20-25.

24. Автоматизация теплофизических исследований образцов наружных стеновых ограждений / С.В. Федосов, П.Н. Муреев, В.Г. Котлов, А.Н. Макаров, А.В. Иванов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Т. 14. № 2. С. 65-77.

25. Котлов, В.Г. Разработка модели материала древесины для конечно-элементного анализа строительных конструкций (часть 1) / В.Г. Котлов, Б.Э. Шарынин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. № 2. С. 58-63.

26. Условия эффективной работы теплообменных приборов воздушного теплового насоса малой тепло/холодопроизводительности в энергосберегающей системе малоэтажных текстильных и швейных производств / С.В. Федосов, В.Г.

Котлов, В.Н. Федосеев, А.Б. Петрухин, Л.А. Опарина, И.А. Мартынов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. № 3. С. 92-99.

27. Федосов, С.В. Температурные воздействия на строительные конструкции из дерева и пластмасс и их отражение в нормативно-технической документации / С. В. Федосов, С. А. Малбиев, В. Г. Котлов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 3. С. 45-58.

28. Котлов, В. Г. Подбор элементов для встраиваемых измерительных систем на основе тензодатчиков / Б.Э. Шарынин, О.В. Ледяйкина // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 2(14). С. 90-100. DOI: 10.25686/2542-114X.2020.2.90

Публикации в сборниках материалов конференций

29. Наумов, А.К. Метод оптимизации пространственных покрытий из перекрестных ферм / А.К. Наумов, В.Г. Котлов // Научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Марийского ордена Дружбы народов политехнического института им. А.М. Горького по итогам научно-исследовательской работы за 1985-86 учебный год. Тезисы докладов. Йошкар-Ола: Марийское книжное издательство, 1988. С. 22-23.

30. Котлов, В.Г. Узловое соединение деревянных конструкций / В.Г. Котлов // Труды Марийского государственного технического университета. Выпуск 2. Материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов, сотрудников МарГТУ. Часть III. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1996. С. 51-53.

31. Котлов, В.Г. Перспективные направления развития деревянных конструкций / В.Г. Котлов, С.Л. Машинова // Региональные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы межрегиональной научно-практической конференции. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. С. 94-96.

32. Котлов, В.Г. Расчёт деревянных конструкций на МЗП с учётом единичной податливости соединений / В.Г. Котлов, А.В. Скобелев, К.В. Котлов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы Четвертой Всероссийской конференции. Ч. 1. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. С. 94-98.

33. Котлов, В.Г. Определение единичной податливости соединения / В.Г. Котлов, А.В. Скобелев, К.В. Котлов // Глобализация и проблемы национальной безопасности России в XXI веке. Седьмые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции. Часть 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. С. 130-132.

34. Котлов, В.Г. Соединительный элемент для крепления деревянных деталей / В.Г. Котлов, А.В. Скобелев, К.В. Котлов // Сборник статей студентов, аспирантов и докторантов по итогам научно-технических конференций МарГТУ в 2003 г. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. С. 263-265.

35. Напряжённо-деформированное состояние покрытия и перекрытий второго корпуса МарГТУ / А.Ю. Кудрявцев, А.В. Скобелев, А.В. Токарев, К.В. Котлов, А.Н. Актуганов, *В.Г. Котлов* // Сборник статей студентов, аспирантов и докторантов по итогам научно-технических конференций МарГТУ в 2003 г. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. С. 266-268.

36. *Котлов, В.Г.* Влияние податливости узловых соединений на МЗП на работу пространственного покрытия / В.Г. Котлов, А.В. Скобелев, К.В. Котлов // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы Международной научно-практической конференции. Часть 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. С. 127-130.

37. *Котлов, В.Г.* К определению предела огнестойкости деревянных конструкций с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах (МЗП) / В.Г. Котлов, Б.Ю. Петухов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы Пятой Всероссийской конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. С. 77-80.

38. Лазарев, А.И. Усиление деревянных шпал / А.И. Лазарев, *В.Г. Котлов* // Безопасность человека, общества, природы в условиях глобализации как феномен науки и практики. Девятые Вавиловские чтения: сборник статей участников постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Москва – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. С. 349-351.

39. Хинканин, А.П. Об эффективности сельскохозяйственного строительства в Республике Марий Эл / А.П. Хинканин, *В.Г. Котлов* // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения: материалы международной научно-практической конференции. Выпуск IX. Книга II. Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2007. С. 316-318.

40. Исследование узлового соединения на металлических зубчатых пластинах нового типа / С.Н. Васильев, С.В. Васильев, А.К. Наумов, *В.Г. Котлов* // Национальные проекты России как фактор ее безопасности и устойчивого развития в глобальном мире. Одиннадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Часть 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. С. 281-282.

41. Муратова, С.С. Конструктивные особенности металлических зубчатых пластин для соединения деревянных элементов / С.С. Муратова, *В.Г. Котлов*, А.К. Наумов // Сборник статей ежегодной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов, сотрудников МарГТУ «Исследования. Технологии. Инновации». – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. С. 255-258.

42. Павлиди, В.А. Исследования соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах / В.А. Павлиди, *В.Г. Котлов* // Сборник статей ежегодной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов, сотрудников МарГТУ «Исследования. Технологии. Инновации». Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. С. 261-264.

43. Шарынин, Б.Э. Особенности работы зуба Г-образной формы металлической зубчатой пластины в нагельном гнезде / Б.Э. Шарынин, А.К. Наумов, В.Г. Котлов // Сборник статей ежегодной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов, сотрудников МарГТУ «Исследования. Технологии. Инновации». Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. С. 278-281.

44. Павлиди, В.А. Новые технологии в сфере строительства с применением деревянных конструкций / В.А. Павлиди, В.Г. Котлов // Россия в глобальном мире: вызовы и перспективы развития. Четырнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Часть 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. С. 262-263.

45. Шарынин, Б.Э. Оптимизация конструктивных особенностей металлических зубчатых пластин / Б.Э. Шарынин, В.Г. Котлов // Россия в глобальном мире: вызовы и перспективы развития. Четырнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Часть 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. С. 276-278.

46. Расчет поясов тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки / А.А. Актуганов, В.Г. Котлов, А.Н. Актуганов, О.А. Актуганов, И.Л. Кузнецов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы I Международной (VII Всероссийской) конференции. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2012. С. 35-42.

47. Котлов, В.Г. Предпосылки для создания конечно-элементной модели соединения на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов, Б.Э. Шарынин // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы I Международной (VII Всероссийской) конференции. Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2012. С. 97-100.

48. Григорьевых, Е.С. Исследование эффективности армирования деревянных балок композитными материалами / Е.С. Григорьевых, В.Г. Котлов // Инновационные ресурсы и национальная безопасность в эпоху глобальных трансформаций. Пятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Часть 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. С. 149.

49. Муратова, С.С. Исследование прочности характеристик древесины, используемой для изготовления строительных конструкций / С.С. Муратова, В.Г. Котлов, А.К. Наумов // Инновационные ресурсы и национальная безопасность в эпоху глобальных трансформаций. Пятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Часть 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. С. 167-168.

50. Романова, М.В. Исследование деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с использованием лиственных пород древесины / М.В. Романова, В.Г. Котлов // Инновационные ресурсы и национальная безопасность

в эпоху глобальных трансформаций. Пятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Часть 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. С. 176.

51. Качество древесины при плантационном выращивании сосны обыкновенной в условиях сураменей / Т.В. Нуреева, Е.М. Романов, *В.Г. Котлов*, Т.Ф. Мифтахов // Инновации и технологии в лесном хозяйстве: материалы II Международной научно-практической конференции. Часть 1. Санкт-Петербург: СПбНИИЛХ, 2012. С. 319-326.

52. Устройство для определения теплофизических качеств грунта, прилегающего к зданиям и сооружениям по температуропроводности в натуральных условиях / Г.С. Юнусов, Л.С. Полищук, П.Н. Муреев, И.С. Сабанцева, *В.Г. Котлов*, Б.Г. Герасимов, Т.И. Краева, К.П. Муреев, Л.А. Хинканин, В.Е. Глушков, В.Н. Куприянов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения: материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XIV. Йошкар-Ола: МарГУ, 2012. С. 196-197.

53. Устойчивость стенки металлодеревянной тонкостенной балки / А.А. Актуганов, А.Н. Актуганов, О.А. Актуганов, *В.Г. Котлов*, И.Л. Кузнецов // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы Международной научно-практической конференции. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. С. 76-82.

54. *Котлов, В.Г.* Разработка опытно-промышленного образца металлической зубчатой пластины с внедренными решениями по оптимизации / В.Г. Котлов, Б.Э. Шарынин // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы Международной научно-практической конференции. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. С. 131-134.

55. Работа клеевого соединения тонкой стальной стенки с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофров с деревянными полками / А.А. Актуганов, А.Н. Актуганов, О.А. Актуганов, *В.Г. Котлов* // Международная научно-техническая конференция, посвященная 30-летию юбилею кафедры строительных конструкций ОГУ «Инновационные строительные технологии, теория и практика»: материалы конференции. Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2013. С. 25-30.

56. *Котлов, В.Г.* Влияние режима эксплуатации на работу деревянных конструкций с соединениями на металлических нагелях / В.Г. Котлов, С.В. Федосов, И.Л. Кузнецов // Программа. Тезисы докладов 66 Всероссийской научной конференции. Казань: КГАСУ, 2014. С. 51.

57. Федосов, С.В. Теория тепломассопереноса – основа физики процессов разрушения строительных материалов на примере древесины / С.В. Федосов, *В.Г. Котлов* // Механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы VIII Академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции. Казань: КГАСУ, 2014. С. 344-348.

58. Лабораторный комплекс для определения теплотехнических характеристик образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / П.Н. Муреев, Г.С. Юнусов, *В.Г. Котлов*, А.Н. Макаров, И.С. Сабанцева, К.П. Муреев, А.В. Иванов // Проблемы интенсификации животноводства с учетом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза: материалы научно-практической конференции. Фаленты – Варшава: Институт технологических и естественных наук в Фалентах, 2014. С. 178-179.

59. Федосов, С.В. Эксплуатация деревянных конструкций с соединениями на нагелях с учетом циклически изменяющихся температуры и влажности / С.В. Федосов, *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы V международной научно-практической конференции. 17 октября 2014 года. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 14-22.

60. Котлов, В.Г. Исследование кружальных арок из лиственных пород древесины с соединениями на металлических зубчатых пластинах / *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции НАСКР – 2014. Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2014. С. 123-129.

61. Автоматизированный лабораторный комплекс для проведения теплофизических исследований наружных образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / П.Н. Муреев, *В.Г. Котлов*, А.Н. Макаров, И.С. Сабанцева, К.П. Муреев, А.В. Иванов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции НАСКР – 2014. Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2014. С. 28-32.

62. Федосов С.В. Влияние тепловлажностных условий эксплуатации на нагельные соединения элементов деревянных конструкций / С.В. Федосов, *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции. Кострома: Изд-во КГТУ, 2015. С. 165-168.

63. Федосов, С.В. Влияние динамики тепломассопереноса на характеристики эксплуатации нагельного соединения / С.В. Федосов, *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений (22 – 23 сентября 2015 года). РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ЗАО Университетская книга, Курск: 2015. С. 262-270.

64. Разработка изделий для малоэтажного деревянного домостроения на основе отходов деревообрабатывающих производств / *В.Г. Котлов*, Г.Р. Царева, П.Е. Царев, Ю.А. Гилёва // 2-я Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию юбилею архитектурно-строительного факультета

ОГУ «Инновационные строительные технологии. Теория и практика»: материалы конференции (29-30 октября 2015 г.). Оренбург: Университет, 2015. С. 54-58.

65. Методика расчета несущей способности опорного узла с соединением на металлические зубчатые пластины / *В.Г. Котлов*, Г.Р. Царева, П.Е. Царев, Ю.А. Гилёва // 2-ая Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию юбилею архитектурно-строительного факультета ОГУ «Инновационные строительные технологии. Теория и практика»: материалы конференции (29-30 октября 2015 г.). Оренбург: Университет, 2015. С. 59-63.

66. Федосов, С.В. Влияние условий эксплуатации на состояние древесины стропильных конструкций / С.В. Федосов, *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // 2-ая Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию юбилею архитектурно-строительного факультета ОГУ «Инновационные строительные технологии. Теория и практика»: материалы конференции (29-30 октября 2015 г.). Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2015. С. 371 – 374.

67. Исследование процесса водонасыщения деревянных элементов / С.В. Федосов, М.В. Бочков, *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // Россия в пространстве глобальных трансформаций: в фокусе наук о человеке, обществе, природе и технике. Девятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей международной междисциплинарной научной конференции. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. С. 292-295.

68. Федосов, С.В. Физико-химические представления и математическая модель процесса коррозии металла в нагельном соединении стропильной конструкции / С.В. Федосов, *В.Г. Котлов*, Р.А. Макаров // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. Т. 1. Москва: МГУДТ, 2016. С. 291-295.

69. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в древесине стропильных конструкций, соединенных нагелем в форме металлической зубчатой пластины (двумерная задача) / С.В. Федосов, *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. Т. 1. Москва: МГУДТ, 2016. С. 304-308.

70. *Котлов, В.Г.* Влияние степени агрессивности среды эксплуатации на работу деревянных конструкций с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах / *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции НАСКР – 2016. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. С. 250-254.

71. *Котлов, В.Г.* Краевая задача переноса теплоты в составной деревянной балке стропильной конструкции при циклически изменяющихся температурно-влажностных параметрах среды эксплуатации / *В.Г. Котлов*, Р.А. Макаров // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК –

2017): сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием). Ч. 2. Иваново: ИВГПУ, 2017. С. 503-504.

72. Белоусов, Н.М. Коррозия металлических нагелей в деревянных конструкциях / Н.М. Белоусов, *В.Г. Котлов* // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: материалы III Всероссийской студенческой конференции. Часть 5. Инновации в строительстве, природообустройстве и техно-сферной безопасности. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. С. 4-6.

73. Экспериментальные исследования деревянных нагельных конструкций с обшивкой из стекломagneиных листов / Д.А. Украинченко, *В.Г. Котлов*, С.А. Иванов, А.Д. Соболев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург: ОГУ, 2018. С. 512-519.

74. Федосов, С.В. Динамика процессов тепломассопереноса и напряженно-деформированного состояния нагельных соединений строительных конструкций / С.В. Федосов, *В.Г. Котлов*, М.А. Иванова // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности. Часть I. – Иваново: Ивановская пожаро-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. С. 183-188.

75. Сравнительный анализ технологий деревянного строительства / В.И. Жаданов, К.В. Юкова, Е.В. Марсакова, И.С. Инжутов, *В.Г. Котлов* // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург: ОГУ, 2018. С. 159-166.

76. Жаданов, В.И. Деревянные арки – основные этапы эволюции / В.И. Жаданов, И.С. Инжутов, *В.Г. Котлов* // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. 2019. С. 199-205.

Авторские свидетельства и патенты

77. Авторское свидетельство № 916681. СССР. Пространственное покрытие / Марийский политехнический институт им. А.М. Горького; авт. изобр. А.К. Наумов, В.А. Наумов, Д.А. Наумов, *В.Г. Котлов*. № 2889555/29-33; заявл. 04.03.1980; опубл. 30.03.1982. Бюл. № 12. 3 с.

78. Авторское свидетельство № 1020533. СССР. Складная пространственная ферма треугольного сечения / Казанский инженерно-строительный институт и Марийский политехнический институт; авт. изобр. Р.И. Хисамов, А.К. Наумов, *В.Г. Котлов*. № 3340475/29-33; заявл. 01.07.1981; опубл. 30.05.1983. Бюл. № 20. 3 с.

79. Авторское свидетельство № 1196457. СССР. Узел соединения деревянных элементов / Казанский инженерно-строительный институт; авт. изобр. И.Л. Кузнецов, *В.Г. Котлов*. № 3810532/29-33; заявл. 05.11.1984; опубл. 07.12.1985. Бюл. № 45. 2 с.

80. Авторское свидетельство № 1206410. СССР. Способ сборки покрытия из перекрестных ферм / Казанский инженерно-строительный институт и Марийский политехнический институт; авт. изобр. Р. И. Хисамов, А.К. Наумов, *В.Г. Котлов*. № 3436871/29-33; заявл. 03.05.1982; опубл. 23.01.1986. Бюл. № 3. 2 с.

81. Авторское свидетельство № 1596031. СССР. Узел соединения деревянных элементов / Марийский политехнический институт им. А.М. Горького; авт. изобр. А.К. Наумов, *В.Г. Котлов*, А.А. Шарин. № 4603057/31-33; заявл. 09.11.1988; опубл. 30.09.1990. Бюл. № 36. 2 с.

82. Авторское свидетельство № 1604945. СССР. Соединительный элемент для крепления деревянных деталей / Марийский политехнический институт им. А.М. Горького; авт. изобр. *В.Г. Котлов*, Н.Н. Степанов. № 4612756; заявл. 01.12.1988; опубл. 1991. Бюл. № 1. 2 с.

83. Патент на полезную модель 94709. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Устройство для определения теплофизических качеств ограждающих конструкций зданий и сооружений по температуропроводности в натуральных условиях / П.Н. Муреев, Т.И. Краева, В.Н. Куприянов, *В.Г. Котлов*, А.П. Хинканин, И.С. Сабанцева, Б.Г. Герасимов, К.П. Муреев; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. № 2010100388/22; заявл. 11.01.2010; опубл. 27.05.2010. Бюл. № 15. 1 с.

84. Патент на полезную модель 110489. Российская Федерация, МПК G01N 25/18, G01N 33/24. Устройство для определения теплофизических качеств грунта, прилегающего к зданиям и сооружениям, по температуропроводности в натуральных условиях / П.Н. Муреев, В.Н. Куприянов, *В.Г. Котлов*, Б.Г. Герасимов, П.П. Муреев, Т.И. Краева, И.С. Сабанцева, Г.С. Юнусов, Л.С. Полищук, К.П. Муреев, В.Е. Глушков, Л.А. Хинканин; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. № 2011107056/28; заявл. 24.02.2011; опубл. 20.11.2011. Бюл. № 32. 2 с.

85. Патент на полезную модель 124395. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Устройство для определения теплофизических качеств ограждающих конструкций зданий и сооружений в натуральных условиях / П.Н. Муреев, *В.Г. Котлов*, А.М. Феськов, А.Н. Макаров, Б.Г. Герасимов, К.П. Муреев; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. № 2012133073/28; заявл. 01.08.2012; опубл. 20.01.2013. Бюл. № 2. 2 с.

86. Патент на полезную модель 127775. Российская Федерация, МПК E04B 1/49. Крепежный элемент для соединения деревянных деталей / *В.Г. Котлов*, Б.Э. Шарынин, С.С. Муратова; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. № 2012152107/03; заявл. 04.12.2012; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13. 1 с.

87. Патент на полезную модель 135420. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Лабораторная установка для определения теплотехнических характеристик образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / П.Н. Муреев, В.Н. Куприянов, Ю.С. Андрианов, *В.Г. Котлов*, Л.А. Хинканин, Б.Г. Герасимов, А.Н. Макаров, К.П. Муреев; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический

университет. № 2013126263/28; заявл. 07.06.2013; опубл. 10.12.2013. Бюл. № 34. 2 с.

88. Патент на полезную модель 146848. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Измеритель тепловых потоков / П.Н. Муреев, Ю.С. Андрианов, *В.Г. Котлов*, П.П. Павлов, В.Н. Куприянов, Б.Г. Герасимов, К.П. Муреев, А.В. Иванов; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. № 2014115067/28; заявл. 15.04.2014; опубл. 20.10.2014. Бюл. № 29. 2 с.

89. Патент на полезную модель 153276. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Лабораторный комплекс для определения теплотехнических характеристик образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / П.Н. Муреев, В.Н. Куприянов, Ю.С. Андрианов, *В.Г. Котлов*, А.Н. Макаров, И.С. Сабанцева, К.П. Муреев, А.В. Иванов; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. № 2014132293/28; заявл. 05.08.2014; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19. 2 с.

90. Патент на полезную модель 165965. Российская Федерация, МПК E04C 3/14. Многослойный клееный стеновой брус / А.Н. Макаров, П.Н. Муреев, *В.Г. Котлов*; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. № 2016123590/03; заявл. 14.06.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31. 1 с.

91. Патент на изобретение 2454659. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ оценки теплофизических характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений, выполненных из кирпича, в зимний период по результатам испытаний в натуральных условиях / П.Н. Муреев, В.Н. Куприянов, Т.И. Краева, *В.Г. Котлов*, К.П. Муреев; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. № 2010132407/28; заявл. 02.08.2010; опубл. 27.06.2012. Бюл. № 18. 7 с.

92. Патент на изобретение 2607561. Российская Федерация, МПК E04B 1/76. Теплоизоляционная конструкция наружной стены / А.Н. Макаров, П.Н. Муреев, В.Н. Куприянов, *В.Г. Котлов*, Р.А. Макаров, О.С. Гилязова; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. - № 2015131657; заявл. 29.07.2015; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1. 1 с.

93. Патент на изобретение 2650054. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Измерительный комплекс контроля теплотехнических параметров наружной стены при длительных режимах испытаний в натуральных условиях / А.Н. Макаров, П.Н. Муреев, В.Н. Куприянов, *Котлов В.Г.*, Р.А. Макаров, О.С. Гилязова, О.П. Макарова; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. № 2016112653; заявл. 04.04.2016; опубл. 06.04.2018. Бюл. № 10. 1 с.

Автор выражает глубокую признательность научному консультанту академику РААСН, доктору технических наук, профессору С.В. Федосову.

Научно-информационное издание

Котлов Виталий Геннадьевич

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

**Процессы тепломассопереноса при напряжённо-деформированном состоянии
нагельных соединений**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 15.02.2020. Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Плоская печать.

Усл.печ.л. 2,13. Уч.-изд.л. 2,06. Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
политехнический университет»

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ООО «Вертикаль»
424060, Йошкар-Ола, ул. Мира, 21