

**Бочков Михаил Владимирович**

**ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В НАГЕЛЬНЫХ  
СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ СТРОПИЛЬНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2017

Работа выполнена на кафедре «Техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель:** **Федосов Сергей Викторович**  
Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, академик РААСН, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Карташов Эдуард Михайлович**  
Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры высшей и прикладной математики ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (Институт тонких химических технологий)

**Лабудин Борис Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир

Защита состоится 17 марта 2017 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу:  
153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, 20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета [www.ivgpu.com](http://www.ivgpu.com)  
Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Н.В. Заянчуковская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность избранной тематики исследований.** 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, в частности, является древесина. 85% индивидуальных жилых домов в мире выполняются с применением деревянных конструкций с использованием нагелей (цилиндрических нагелей, пластинчатых нагелей, металлических зубчатых пластин). Анализ современных методов соединения элементов деревянных конструкций показывает явное преимущество нагельных соединений по сравнению с другими видами соединения, поскольку их можно выполнять как в заводских, так и в построечных условиях. Используя данный вид соединения элементов, можно создать различные конструкции: балки, рамы, фермы, арки и многие другие. Последующая их эксплуатация может протекать как в стационарном режиме, так и в режиме с циклически изменяющимися параметрами внешней среды – температуры и влажности. В большинстве трудов по теоретическим и экспериментальным исследованиям деревянных конструкций отмечается негативное влияние повышенных значений данных параметров на материал древесины, но мало уделяется внимание их воздействию на нагельные соединения эксплуатируемых конструкций. Учитывая перспективность применения данного вида соединения в деревянных конструкциях, можно констатировать, что исследование процессов тепломассопереноса в нагельных соединениях элементов деревянных конструкций при циклических изменениях температурно-влажностных параметров среды эксплуатации является актуальной задачей, решение которой позволит уточнить методику их расчёта

**Степень разработанности темы.** Общая проблема исследования работоспособности нагельных соединений состоит из нескольких составных частей: исследование свойств металлических нагелей и изучение вопросов механики в системе «металл-древесина»; исследование свойств деловой древесины, используемой для производства стропильных конструкций.

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

За рубежом основоположником современных зарубежных нормативных документов по расчету деревянных конструкций Eurocode был *K.W. Johansen*. Он разработал методику расчета, в которой была применена теория пластичности для определения прочности соединения. Впоследствии в своих работах *T.Moller, N.J. Larsen, P. Aune, M. Patton-Mallory, L.R.J. Whale* и *B.O. Hilson* экспериментально подтвердили адекватность этой теории.

Исследованию свойств древесины и изготовлению разнообразных строительных конструкций из нее посвящено большое количество работ российских и зарубежных ученых: Ю.М. Иванова, А.Ф. Богдановича, А.А. Муратова, А.С. Прокофьева, С.В. Поветкина, Г.Г. Никитина, Н.Л. Леонтьева, Б.С. Чудинова, Г.С. Шубина, Ю.В. Пискунова, В.Г. Миронова, А.С. Фрейдина, Б.В. Лабудина, К.П. Пятикрестовского, С.Б. Турковского, 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, С.Б. Турковского, С.И. Рощиной, А.Б. Шмидта, В.А. Цепалева, а также зарубежных ученых.

---

**Научный консультант – к.т.н., профессор, советник РААСН Котлов Виталий Геннадьевич, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»**

Решением проблем математического моделирования процессов теплопереноса в системах «газ-твёрдое тело», в том числе применительно к процессам термической обработки древесины занимались ученые: 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.М. Алоян, А.А. Титунин, В.Г. Котлов, а также зарубежные исследователи: Т. Шервуд, О. Кришер, Г. Карслоу, Д. Егер, А. Маджумдар, Ч. Струмилло и многие другие.

**Цель и задачи исследования.** Основной целью настоящего диссертационного исследования является разработка методологии инженерного расчета динамики процессов теплопереноса в нагельных соединениях элементов деревянных стропильных конструкций для практической реализации мероприятий по обеспечению безопасности и долговечности зданий и сооружений.

Достижению поставленной цели способствовало решение ряда задач теоретического и экспериментального плана:

1. На основе анализа имеющихся литературных источников по проблемам механики и динамики явлений теплопереноса в нагельных соединениях стропильных конструкций определить направления теоретических и экспериментальных исследований.

2. Сформулировать физическую и математическую модели теплопереноса в системе «металлический нагель – древесина» при циклически изменяющемся температурном режиме эксплуатации нагельного соединения (чередование стадий нагревания и охлаждения металлического цилиндрического нагеля). Осуществить решение сформулированной краевой задачи нестационарной теплопроводности в древесине с целью получения выражения для расчета динамики температурного поля при переменных начальных и граничных условиях задачи.

3. Сформулировать физическую и математическую модели влагопереноса в системе «металлический нагель-древесина» при циклически меняющемся температурно-влажностном режиме эксплуатации нагельного соединения с учетом явлений конденсации и частичного испарения влаги в месте контакта металла и древесины. Осуществить решение сформулированной задачи нестационарной влагопроводности в древесине с целью получения выражения для расчета динамики полей влагосодержаний при фиксированных и переменных начальных распределениях потенциалов влагопереноса.

4. Разработать методику измерения и обработки информации, подобрать измерительное оборудование для экспериментального исследования процессов теплопереноса в древесине при циклически меняющемся температурном режиме эксплуатации (нагревания и охлаждения) металлического нагеля. Провести проверку адекватности разработанной математической модели теплопереноса.

5. Разработать методику измерения и обработки информации, подобрать измерительные приборы для проведения экспериментальных исследований процессов влагопереноса при диффузионном увлажнении образцов древесины; провести снятие кривых кинетики увлажнения для целей определения характеристик массопереноса в материале древесины: значений равновесной и максимальной гигроскопической влажности, а также коэффициентов влагопроводности.

6. Специальной задачей теоретического и экспериментального исследований являлось проведение тестовых расчетов динамики полей температур и влагосодержаний в чередующихся процессах охлаждения и нагревания воздушной среды эксплуатации, сопровождаемых конденсацией и последующим частичным испарением влаги.

7. Разработать практические рекомендации для использования в строительстве в режиме длительной эксплуатации с целью мониторинга состояния строительных конструкций зданий и сооружений, предотвращения угрозы их обрушения и повышения долговечности.

8. Осуществить мероприятия по внедрению результатов исследований в практику эксплуатации нагельных соединений и произвести оценку их экономической эффективности.

**Научная новизна:**

-проведенным анализом литературных источников установлено, что на особенности эксплуатации нагельных соединений в условиях циклически изменяющихся температурно-влажностных параметров среды определяющее влияние оказывают не только статические значения температур и влагосодержаний древесины, но, в гораздо большей степени, градиенты температур и влагосодержаний, вызывающие возникновение потоков субстанции (теплоты и влаги), и кроме того чередование фазовых переходов («конденсация-испарение»);

-для нагеля в форме болтового соединения сформулированы физические представления о механизме процессов тепловлагоденоса в древесине при циклически изменяющихся температурно-влажностных параметрах среды эксплуатации с учетом фазовых переходов «пар-жидкость»;

-сформулирована математическая модель теплопереноса в системе «цилиндрический нагель-древесина» на основе дифференциального уравнения теплопроводности параболического типа с произвольным видом функции начального распределения температур и комбинированными граничными условиями первого и второго рода;

-с помощью комбинированного подхода, реализующего численно-аналитические методы (метод «микропроцессов» и метод интегрального преобразования Лапласа) краевая задача теплопроводности с переменными коэффициентами переноса сведена к системе краевых задач с кусочно-линейной аппроксимацией теплофизических характеристик древесины (плотности, теплоемкости и теплопроводности) в зависимости от температуры и влагосодержания;

-аналогичным образом, на основе разработанного численно-аналитического метода сформулирована и решена краевая задача теплопроводности на основе дифференциального уравнения параболического типа с произвольными начальными условиями и комбинированными граничными условиями;

-разработана и реализована оригинальная методика экспериментального исследования процессов тепломассопереноса в системе «металлический цилиндрический нагель – древесина» с применением тепловизионной аппаратуры высокой чувствительности; в результате получены данные о кинетике и динамике процессов теплопереноса; показана адекватность разработанного метода расчета и экспериментальных данных;

-разработана и реализована методика экспериментального исследования процессов влагоденоса в системе «нагель-древесина» с использованием прибора – влагомера конструкции *Hydromette HT 85*, получены данные по кинетике и динамике сорбционных процессов и процессов диффузионного увлажнения образцов из древесины, на базе которых получены данные о массообменных характеристиках: максимальной гигроскопической и равновесной влажности, а также – коэффициента теплопроводности для выбранного в исследовании сорта древесины.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработанный в диссертации численно-аналитический метод расчета краевых задач тепло- и теплопроводности является базой для последующего теоретического анализа явлений тепломассопереноса в коллоидных капиллярно-пористых телах с учетом влияния влагоденоса на клеточную и пористую структуру древесноволокнистого материала, а также на напряженно-деформированное состояние в системе «металлический нагель-древесина» для всего спектра современных конструкций нагелей.

Разработанный на основе математических моделей метод расчета динамики процессов тепломассопереноса позволяет предложить практические рекомендации по мониторингу

состояния стропильных конструкций при изменении температурно-влажностных параметров среды эксплуатации для проведения своевременных планово-предупредительных ремонтов.

**Методология и методы диссертационного исследования:**

- для осуществления решения теоретических задач применялись методы математической физики, включающие теорию операционного исчисления, метод интегрального преобразования Лапласа.

- для выполнения экспериментальных исследований процессов переноса теплоты и влаги в древесине нагельного соединения использовались стандартные методики определения теплофизических характеристик материалов в соответствии с ГОСТ на современных приборах и оборудовании.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методология и метод численно-аналитического решения задач тепломассопереноса в древесине нагельного соединения при циклическом изменении температурно-влажностных параметров среды эксплуатации строительной конструкции;

- физико-математическая модель процессов теплопереноса в соединении «цилиндрический нагель – древесина», постановка и решение краевой задачи теплопроводности в древесине при произвольном начальном распределении температур и комбинированных граничных условиях;

- численно-аналитический метод решения сформулированной краевой задачи теплопроводности на основе дифференциального уравнения параболического типа с произвольными начальными условиями и комбинированными граничными условиями.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием методов математического моделирования процессов, апробированных в теории тепломассопереноса; совпадением экспериментальных и расчетных данных в пределах допустимой погрешности.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения диссертационного исследования опубликованы в журналах, рецензируемых ВАК Минобрнауки РФ: Строительные материалы №7-10(2014г.), 12 (2016 г.); Известия вузов. Технология текстильной промышленности №5 (2016 г.), №1 (2017г.). Доложены на XXI, XXII, XXIII Международных научно-технических конференциях “Информационная среда вуза” г. Иваново, 2014-2016 гг.; Международной межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера» г. Иваново, 2014-2016 гг.; XVIII и XIX Международном научно-практическом форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)» г. Иваново, 2015 – 2016 гг.; I Международных Лыковских научных чтениях, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе»; Международной, междисциплинарной научной конференции «Девятнадцатые Вавиловские чтения. Тема чтений: Россия в пространстве глобальных трансформаций в фокусе наук о человеке, обществе, природе и технике» г. Йошкар-Ола, 2015 г.

**Внедрение результатов исследований.** Результаты диссертационного исследования обеспечили выполнение более точных инженерных расчетов в реальном проектировании и позволили определять сроки между ремонтными работами в процессе эксплуатации деревянных конструкций на нагелях с учетом циклически изменяющихся параметров внешней среды, что подтверждается актом внедрения на ОА «Проектный институт «Агропроект».

Практические результаты исследований были использованы при проведении обследований, капитальных ремонтов и реконструкции зданий и сооружений компанией ООО «Мараагропромстой», внедрение результатов исследований и разработок позволило

определить причины повышения деформативности деревянных конструкций с соединениями на нагелях, смоделировать работу конструкций под воздействием циклически изменяющихся температуры и влажности, определять фактическую величину деформативности в любой момент эксплуатации конструкции; разработать эффективные мероприятия по обеспечению долговечности узловых соединений деревянных конструкций с соединениями на стальных цилиндрических нагелях (акт о внедрении от 05.12.2016 ООО «Марагропромстой», г. Йошкар-Ола).

**Личный вклад автора.** Автор, совместно с научными руководителем и консультантом, сформулировал цели и задачи, выбрал объекты, методологию и методы исследований, разработал комплекс теоретических и экспериментальных изысканий; лично осуществлял постановку и решение краевых задач тепло- и массопроводности; обработал и проанализировал основные результаты, практическая реализация которых так же проводилась при непосредственном участии автора. В совместных работах, выполненных в соавторстве с академиком РААСН, доктором технических наук, профессором С.В. Федосовым, членом-корреспондентом РААСН, доктором технических наук, профессором Р.М. Алояном, советником РААСН, кандидатом технических наук, профессором В.Г. Котловым, аспирантами Р.М. Макаровым и М.А. Ивановой автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и их обсуждении.

**Публикации.** По материалам выполненных исследований опубликовано 9 работ, в том числе в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ, опубликовано 7 работ, две из них цитируемы в международной базе данных *Scopus*.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений; изложена на 151 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок, 15 таблиц и список литературы из 215 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, а также, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится обзор областей применения древесины, подробно описана классификация используемых лесоматериалов и критерии разделения на сорта древесины, приведен химический состав и строение древесины, а также проанализированы ее физико-механические свойства, кроме того уделено внимание анизотропным свойствам исследуемого материала.

Для соединения стыков деревянных конструкций используются цилиндрические и пластинчатые нагели, а также металлические зубчатые пластины. В данной главе описаны наиболее распространенные виды нагелей и особенности расчета напряженного состояния нагельных соединений.

Основным видом соединения элементов деревянных конструкций в настоящее время являются соединения на металлических нагелях. Несущая способность соединений в значительной мере зависит от физико-механических свойств как древесины, так и металла и от физики среды, в которой она эксплуатируется. Необходимо также учитывать тепломассообменные процессы, непрерывно происходящие в древесине, которые могут быть описаны в виде системы дифференциальных уравнений нестационарного переноса теплоты и массы вещества (в частности, влаги), впервые полученной академиком А.В. Лыковым:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) + \varepsilon \cdot \frac{r^*}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) + \operatorname{div}(k \delta_T \operatorname{grad}(t)) + \operatorname{div}(k \delta_p \operatorname{grad}(p)) \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= \operatorname{div}\left(\frac{\rho_0}{c^*} k \delta_p \operatorname{grad}(p) - \frac{\varphi \rho_0}{c^*} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В системе уравнений (1): первое уравнение (дифференциальное уравнение теплопроводности) показывает, что поле температур в древесине определяется тепло- и температуропроводностью материала конструкции, а также внутренним испарением влаги; второе уравнение (дифференциальное уравнение влагопроводности) отражает тот факт, что движение влаги определяется влагопроводностью, термодиффузией и баропереносом. Для случая малоинтенсивных процессов с температурами до 100°C с эффектами внутреннего испарения влаги, теплодиффузии и бародиффузии можно пренебречь. И тогда система уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса трансформируется в систему двух уравнений невзаимосвязанного переноса теплоты и массы вещества (влаги):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Существуют различные методы решения задач тепло- и массопереноса, теплопроводности и диффузии, а в целом также дифференциальных уравнений в частных производных, иногда сводимых к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Все они в основном дополняют друг друга, учитывая те или иные особенности методов получения решений и их последующей реализации для инженерных расчетов. Для решения нелинейных краевых задач тепломассопереноса можно использовать метод «микропроцессов», который сочетает в себе преимущества аналитических и численных методов математического анализа.

**Во второй главе** приведен анализ исходных материалов, используемых при проведении экспериментальных исследований тепломассообменных процессов, протекающих в нагельных соединениях. Представлены методики получения экспериментальных данных, подготовки образцов к исследованию и последующей обработки результатов.

Физико-химический анализ тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения проводился стандартными методиками: определение концентрации кислоты в процессах изучения сорбции влаги древесиной проводилось методом прямого титрования, влажность древесины определялась с помощью электровлагомера и весовым методом, плотность растворов серной кислоты измерялась при помощи ареометров, процессы теплопереноса исследовались с применением тепловизора.

**В третьей главе** излагаются результаты разработки математической модели процессов тепломассопереноса вблизи цилиндрического нагеля при циклическом изменении параметров воздушной среды.

Выбирается момент времени, с которого воздушная среда начинает прогреваться от солнечных лучей; при этом нагревается и система «металл-древесина». В силу значительного различия коэффициентов теплопроводности (на порядок и более), можно считать, что металлический нагель прогревается практически равномерно, а древесина – существенно медленнее. В определенный период суток температура окружающей среды достигнет максимума, и затем станет понижаться. При этом вследствие теплообмена будет понижаться и температура металла в соединении. Температура древесины, вследствие



тепловой инерции, будет изменяться менее интенсивно. В определенный момент времени температура воздушной среды вблизи металла достигнет значения температуры точки росы. Дальнейшее охлаждение будет сопровождаться неизбежным выпадением капельной влаги. На рисунке 1 представлена упрощенная модель диаграммы состояния влажного воздуха, или  $I-d$  – диаграммы. Процесс охлаждения воздуха от температуры  $t_A$  до

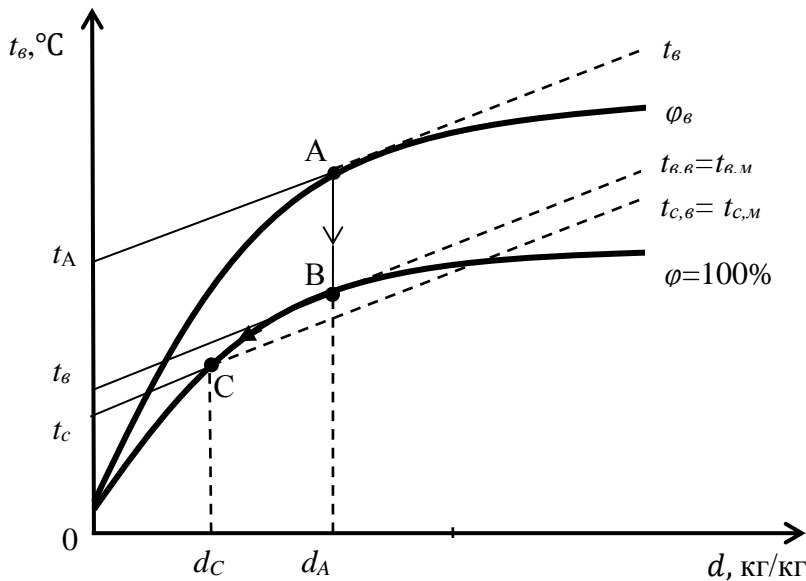


Рис.1. Иллюстрация отражения физической модели процесса охлаждения воздуха на  $I-d$  диаграмме

температуры  $t_e$  происходит по линии постоянного влагосодержания  $AB$ , но при изменяющихся значениях и энтальпии и относительной влажности воздуха. В точке  $B$  пересекаются линия постоянной температуры  $t_e$  и линия постоянной относительной влажности  $\varphi = 100\%$ . Как известно, температура, соответствующая данному состоянию воздуха, называется «температура точки росы». Дальнейшее охлаждение воздуха, например, до температуры  $t_c$  будет характеризоваться линией  $BC$  и

сопровождаться уменьшением влагосодержания воздуха от  $d_A$  до значения  $d_c$  и, соответственно, конденсацией влаги в виде капельной жидкости. Строго говоря, назвать «мгновенным» процесс конденсации влаги, можно только с бытовой точки зрения. В природных процессах при осуществлении фазовых переходов логично полагать о достижении определенной степени перенасыщения, при достижении которой и происходят фазовые изменения. Однако, современных научных знаний в данной области пока недостаточно для получения количественных выводов.

Кроме этого, строго говоря, и древесина никогда не бывает абсолютно сухой. В ней всегда имеется некое содержание влаги, равновесное с окружающей средой. Однако, появление избыточной влаги приводит к процессу ее диффузии внутрь близлежащих к болту слоев древесины. Последующие дни приведут к цикличности описанных процессов теплопереноса.

С точки зрения геометрической конфигурации нагель в форме болта является цилиндрическим телом. Поэтому, математически задача описания теплопереноса в рассматриваемой системе «металл-древесина» должна представляться в цилиндрической системе координат. Такое представление имеет определенные неудобства с точки зрения математического анализа, т.к. решения краевых задач, как правило, получаются в форме Бесселевых функций, которые обладают специфическими особенностями вычислений и создают серьезные трудности для разработки методов практического проектирования.

Вместе с тем известно, что при определенных соотношениях геометрических размеров задача теплопереноса в цилиндрической системе координат может быть с успехом заменена плоской задачей (рис. 2).

В соответствии с рис. 2 при соотношении  $R_2/R_1 < 0,5$  краевая задача теплопроводности в древесине может быть рассмотрена системой неограниченных пластин, с размерами по толщине:

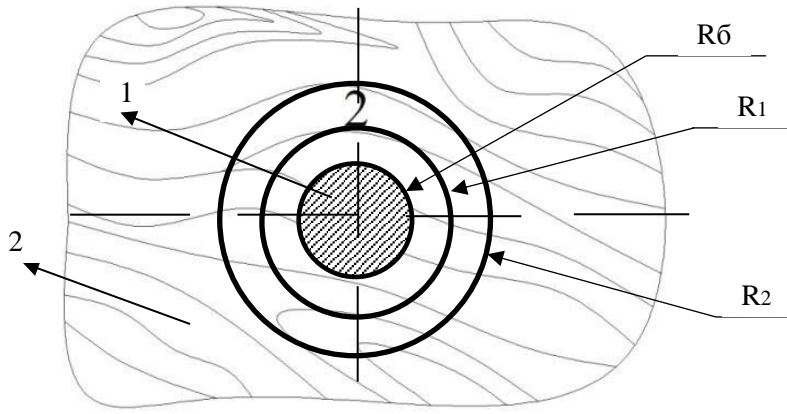


Рис. 2. Моделирование древесины системой колец (неограниченных пластин)  $R_2 > R_1 > R_6$   
1 – нагель (болт); 2 – древесина

$$\begin{aligned} \delta_1 &= R_1 - R_6 \\ \delta_2 &= R_2 - R_1 \\ \dots\dots\dots \\ \delta_i &= R_i - R_{i-1} \end{aligned} \quad (3)$$

Краевая задача теплопереноса в древесине для первого прилегающего к болту «кольца» в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_1(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1 \quad (4)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo) \Big|_{Fo=0} = T_{1,0}(\bar{r}), \quad (5)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo) \Big|_{\bar{r}=0} = T_{R_1}, \quad (6)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo) \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (7)$$

Здесь для упрощения анализа введены безразмерные переменные вида:

$$T_1(\bar{r}, Fo) = \frac{t_1(r, \tau) - t_{R_1}}{t_{R_1}}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_6}; \quad Fo = \frac{a\tau}{(R_1 - R_6)^2}. \quad (8)$$

Краевая задача (4)–(7) решалась методом интегрального преобразования Лапласа:

$$\begin{aligned} T_1(\bar{r}, Fo) &= T_{R_1} \left[ (1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \right] + \\ &+ 2 \int_0^1 \sin(\pi n \bar{r}) T_{1,0}(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение (9) является решением задачи для первого слоя. В начале процесса вычислений расчеты по нему необходимо проводить до момента, пока на границе  $R_1$  не возникнет градиент температур. После этого в рассмотрение включается второй слой с размерами  $R_1/R_2$ . Для этого слоя за ноль координаты будет принято значение  $\bar{r} = R_1$ . Граничное условие для координаты  $R_2$  будет аналогично условию (7); а условие на левой границе изменится. Задача для второго слоя будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T_2(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_2(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq \frac{R_2 - R_1}{R_2}; \quad (10)$$

$$T_2(\bar{r}, Fo) \Big|_{Fo=0} = T_{2,0}(\bar{r}), \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_2(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = -Ki_1, \quad (12)$$

$$T_2(\bar{r}, Fo) \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (13)$$

Получено следующее выражение, позволяющее рассчитывать распределение температур во втором и последующих «кольцах»:

$$\begin{aligned} T_2(\bar{r}, Fo) &= Ki_1 \left\{ (1 - \bar{r}) - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos \left[ \frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{r} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \right\} + \\ &+ 2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[ \frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{r} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cos \left[ \frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \end{aligned} \quad (14)$$

Краевая задача влагопроводности для выделенной зоны, по аналогии с задачей теплопроводности, может быть сформулирована следующим образом:

$$\frac{\partial U_1(\bar{r}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U_1(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_m > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad (15)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = U_{1,0}(\bar{r}), \quad (16)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=0} = U_H, \quad (17)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=1} = 0, \quad (18)$$

где введены в рассмотрение безразмерные комплексы:

$$U_1(\bar{r}, Fo_m) = \frac{W_1(r, \tau) - W_p}{W_p}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_6}; \quad Fo_m = \frac{k_1 \tau}{(R_1 - R_6)^2}. \quad (19)$$

Решение системы уравнений (15)-(18) выглядит следующим образом:

$$U_1(\bar{r}, Fo_m) = U_H \left[ (1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m). \quad (20)$$

В момент времени, характеризуемый значением массообменного числа Фурье, при котором кривая влагосодержаний достигнет границы выделенного слоя ("кольца")  $R_1$ , к рассмотрению подключается второй слой, для которого краевая задача теплопроводности сформулируется следующим образом:

$$\frac{\partial U_2(\bar{r}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U_2(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_m > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq \frac{R_2 - R_1}{R_2}, \quad (21)$$

$$U_2(\bar{r}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = U_{2,0}(\bar{r}), \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 U_2(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}^2} \Big|_{\bar{r}=0} = -Ki_{m,1}, \quad (23)$$

$$U_2(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (24)$$

Данная краевая задача по своей математической формулировке идентична задаче (10)-(13), поэтому и решение будет идентично (14):

$$U_2(\bar{r}, Fo_m) = Ki_{m,1} \left\{ (1 - \bar{r}) - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \cos \left[ \frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{r} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_m \right] \right\} + \\ + 2 \int_0^1 U_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos \left[ \frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{r} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_m \right] \int_0^1 U_{2,0}(\xi) \cos \left[ \frac{\pi}{2} (2m-1) \xi \right] d\xi \quad (25)$$

Когда и во втором "кольце" точка пересечения профиля безразмерных влагосодержаний достигнет границы  $\bar{r}=1$ , к первым двум зонам добавляется третья. При этом, краевая задача теплопроводности (15)-(18) распространяется на две первые зоны, а задача (21)-(24) переходит на треть "кольцо" (зону). В дальнейшем ситуация повторяется с вовлечением в расчет очередного "кольца".

Данный подход дает возможность проследить динамику полей влагосодержаний в увлажненной древесине нагельного соединения при воздушно-капельной конденсации влаги. При этом, кинетика конденсации (а, следовательно, и испарения) влаги на открытой поверхности определяется «законом массоотдачи Щукарева»:

$$\frac{dm_{6,l}}{Fd\tau} = (\pm)\beta [P_H - P_B]. \quad (26)$$

На рис. 3-6 приводятся результаты расчетов по полученным решениям краевых задач теплопроводности и влагопроводности.

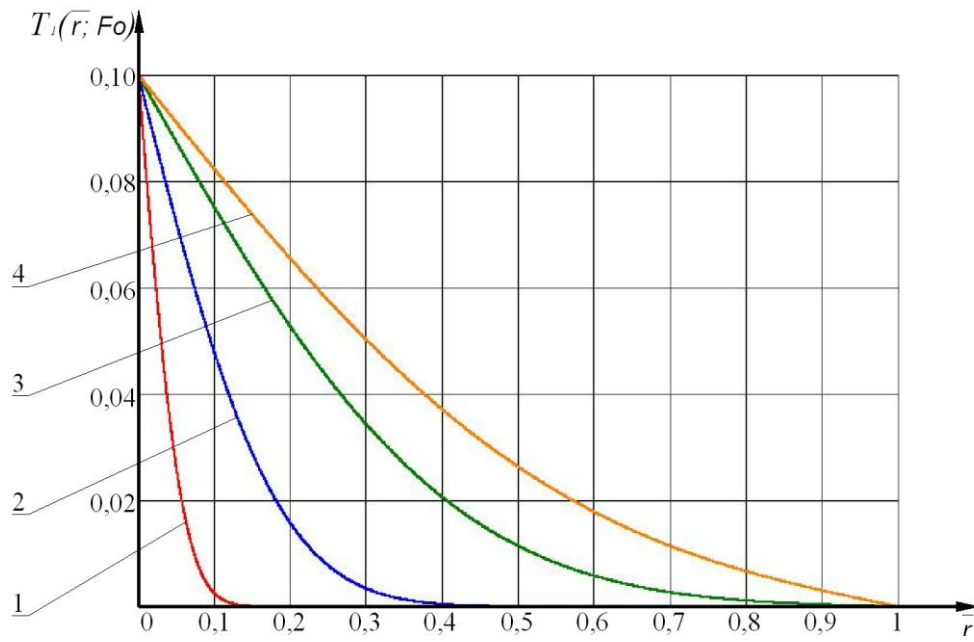


Рис. 3. Иллюстрация расчетов по уравнению (13)  
Значения числа Фурье: 1) 0,001; 2) 0,01; 3) 0,05; 4) 0,1

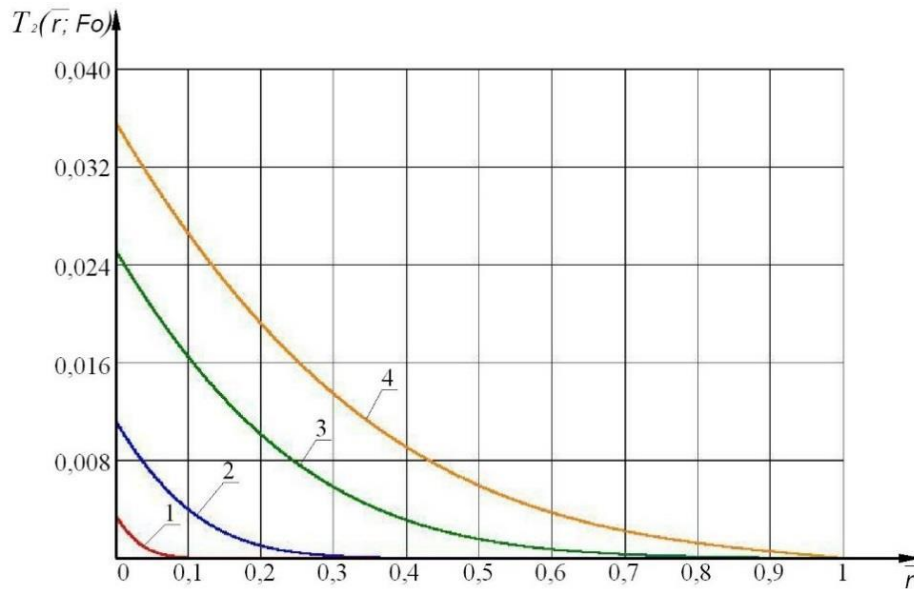


Рис. 4. Профили температур для второго кольца при  $Ki=0,1$ .  
Значения числа Фурье: 1) 0,001; 2) 0,01; 3) 0,05; 4) 0,1.

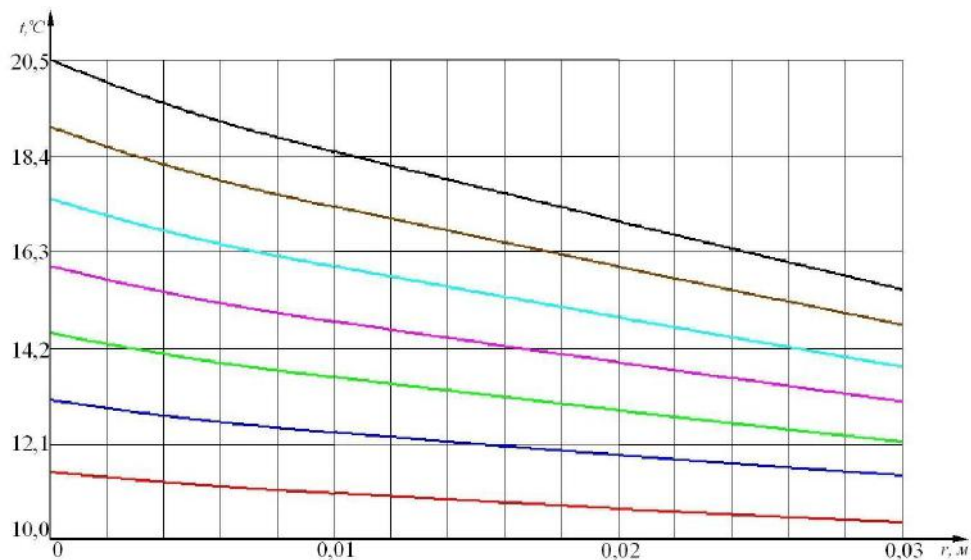


Рис. 5. Результаты расчетов теплопереноса в нагельном соединении в физических переменных

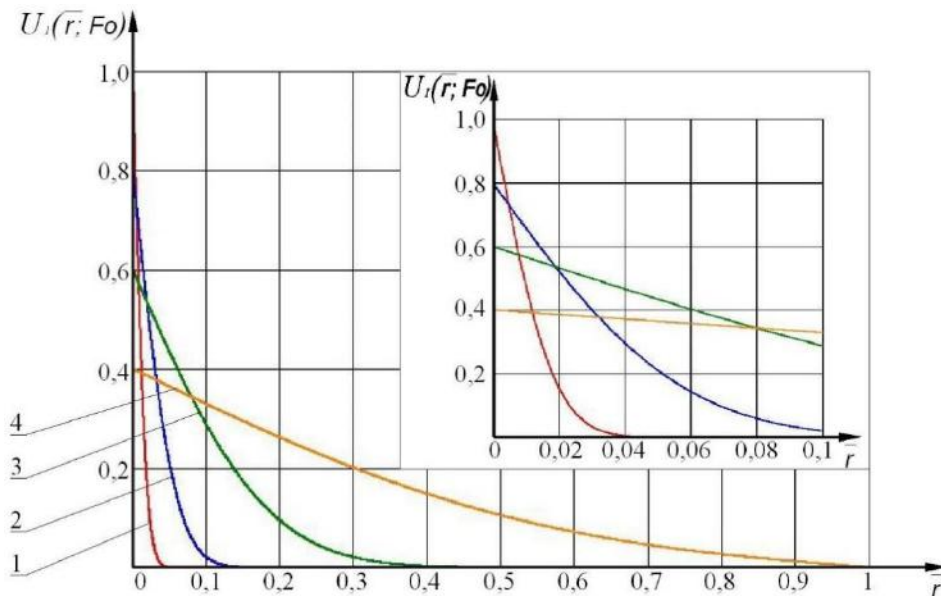


Рис. 6. Динамика полей безразмерных влагосодержаний в древесине при  $W_n \leq W_{мг}$ .  
 $Fo_m = 1$ ) 0,0001; 2) 0,001; 3) 0,01; 4) 0,1.

Все представленные результаты убедительно иллюстрируют качественную адекватность полученных решений краевых задач теплопроводности и диффузии влаги реальной физической картине явлений тепломассопереноса в нагельном соединении.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований тепло- и массопереноса в соединении цилиндрического нагеля.

Для проверки адекватности полученных решений (9) и (14), описывающих распределение температур в древесине сосны при нагревании и охлаждении цилиндрического нагеля, был проведен эксперимент, моделирующий процесс нагрева болта при повышении температуры в чердачном помещении. В предварительно высверленное отверстие в деревянном бруске из сосны помещался нагретый стальной болт, и через равные промежутки времени фиксировалось распределение температуры в древесине около болта с помощью тепловизора марки *SDS HotFind-LR*. Измерения проводились при температуре воздуха в помещении  $29^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха 65 %, измерения полей температур тепловизором проводились с шагом 5 мин. В результате были получены данные о распределении температуры по поверхности древесины (рис. 7) и построены кривые нагрева древесины при остывании болта в условиях естественной конвекции (рис. 8).

Изучение кинетики сорбции влаги в древесине сосны проводилось по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 16483.19-72 «Древесина. Метод определения влагопоглощения». Для исследований использовались образцы из сосны с площадью поверхности  $10 \text{ см}^2$ . В качестве рабочей среды для создания различных значений относительной влажности воздуха выбраны растворы серной кислоты различной концентрации: 0, 1, 10, 50 и 100 %. Предварительно взвешенные образцы помещали в емкости над растворами серной кислоты на 30 суток. По завершению опыта, образцы взвешивали, определяли относительное изменение массы образцов, а растворы кислот оттитровывали для определения изменения концентрации. На рис. 9 показана зависимость увеличения массы образцов от концентрации раствора серной кислоты. Очевидно, что в емкостях с более концентрированными растворами кислоты образцы поглощали меньше влаги, поэтому их масса увеличилась незначительно. Аномальное увеличение массы образцов сосны в 1 %-ом и 10 %-ом растворах серной кислоты объясняется наблюдавшимся образованием на поверхности древесины грибковых микроорганизмов, появляющихся вследствие повышенной относительной влажности воздуха.

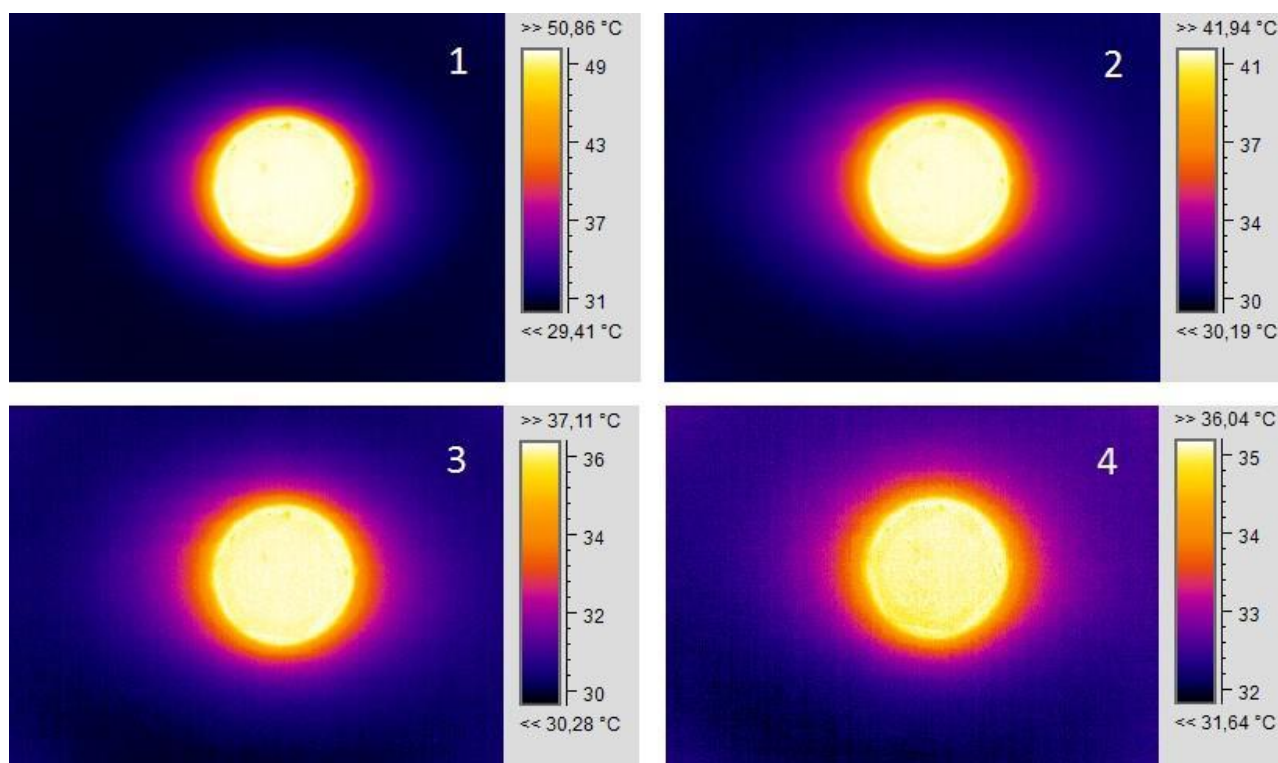


Рис. 7. Инфракрасные изображения нагельного соединения после нагрева болта:  
1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 20 мин; 4 – 30 мин

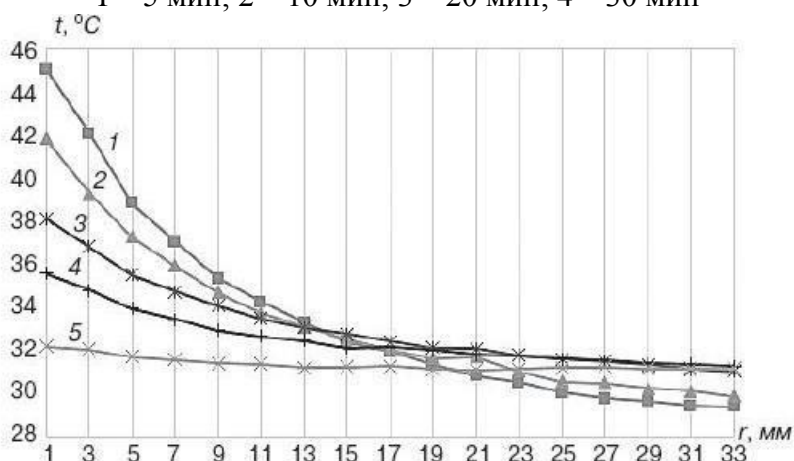


Рис. 8. Кривые нагрева древесины по направлению волокон:  
1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 20 мин; 4 – 30 мин; 5 – 60 мин

Изучение кинетики и динамики процессов увлажнения древесины проводились с помощью кондуктометрического электровлагомера, действие которого основано на зависимости электропроводности древесины от ее влажности. Исследования проводились на образце из древесины сосны в форме прямоугольной призмы с основанием размером  $45 \times 55$  мм и высотой 100 мм вдоль волокон. Вдоль одной боковой поверхности, с шагом 10 мм, высверлены отверстия диаметром 2,5 мм на глубину 18 мм, в которые крепились иглы влагомера. Данный образец закреплялся над поверхностью воды. Через определенные промежутки времени с помощью влагомера *Hydromette HT 85* (GANN, Германия), оснащенного двумя иглами, производили замеры влажности древесины через каждые 10 мм по высоте образца.

Результаты экспериментальных исследований измерения влажности древесины показаны на рисунке 10 в виде кинетических кривых увлажнения образца.

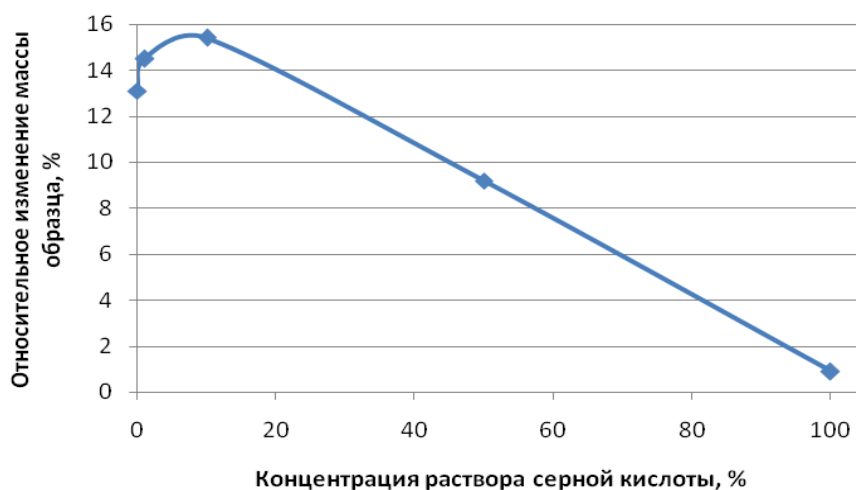


Рис. 9. Изменение массы образца сосны от концентрации серной кислоты

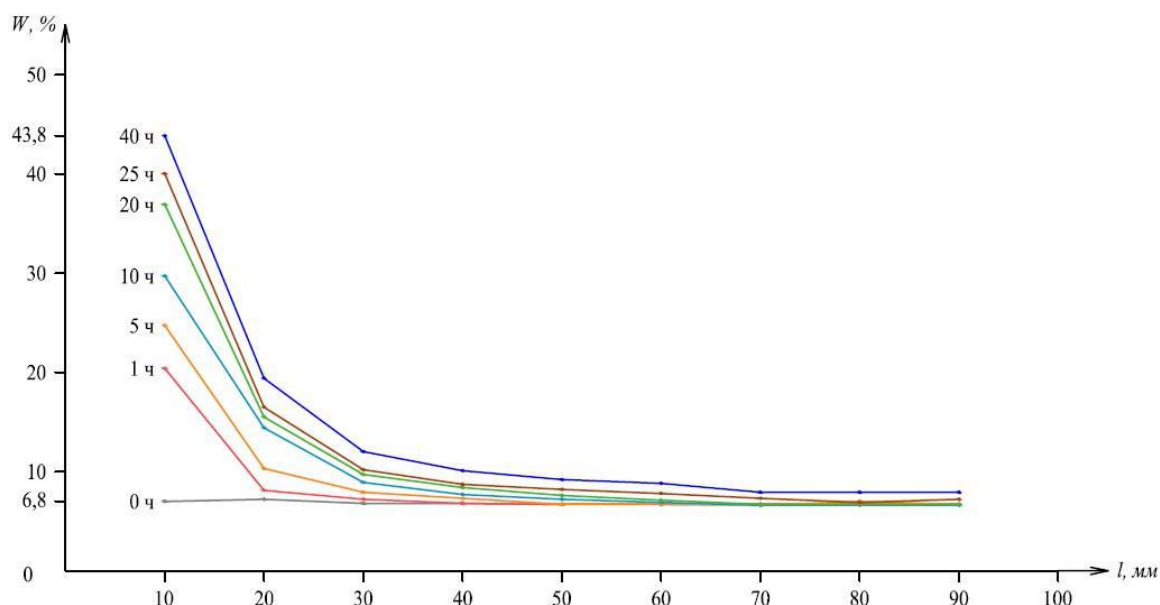


Рис. 10. Изменение влажности древесины

Через 10 часов с начала процесса влагопереноса влажность образца на расстоянии 10 мм от нижнего края составила 30 %. Известно, что данная величина характеризует предел гигроскопичности. При нормальных условиях предел насыщения клеточных стенок практически равен пределу гигроскопичности. Максимальное наблюдаемое нами значение влажности составило 43,8 % (0,438 кг влаги / кг сухого образца) на расстоянии 10 мм от нижнего края образца, что произошло через 40 часов после начала проведения испытания. Это значение и было принято в качестве максимального гигроскопического –  $W_{мг}$ .

Для рассматриваемого образца древесины проведены расчеты по выражению (26), результаты которых приведены на рисунке 11.

Решая обратную задачу массопроводности было определено значение коэффициента влагопроводности древесины. Посредством идентификации приведенной математической модели показано, что данные расчетов адекватны экспериментальным при значении коэффициента влагопроводности  $k = 3,85 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Для подтверждения экономической эффективности результатов проведенного исследования выполнено сравнение возможных видов каркаса (железобетонный, металлический или деревянный) применительно к цехам отделочного производства пред-

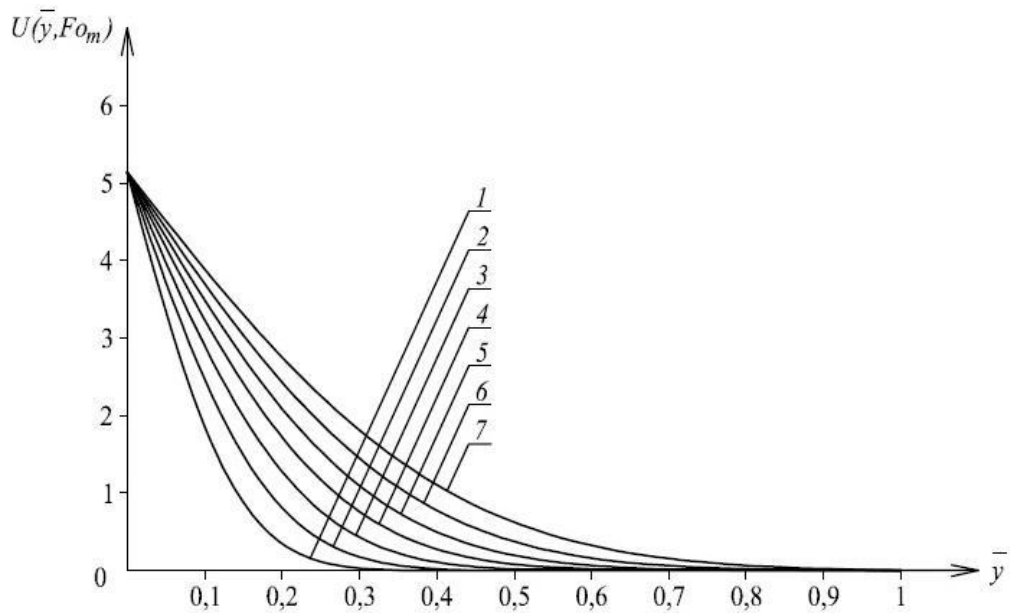


Рис. 11. Динамика полей безразмерных влагосодержаний при значениях массообменного критерия Фурье  $Fo_m$ : 1 – 0,006; 2 – 0,01; 3 – 0,015; 4 – 0,0215; 5 – 0,029; 6 – 0,0388; 7 – 0,052

приятый текстильной промышленности с агрессивной воздушной средой. Воздействия агрессивных сред оказывают негативное влияние на долговечность несущих конструкции из металла и железобетона, на древесину химически агрессивные среды оказывают не столь негативное воздействие. Техничко-экономический анализ применения деревянных конструкций, запроектированных в соответствии с методиками, изложенными в данной работе, показал, что стоимость здания на деревянном каркасе с учетом эксплуатационных расходов ниже стоимости здания на железобетонном каркасе (почти в 2 раза) и ниже стоимости здания на металлическом каркасе (примерно на 30%).

Результаты диссертационного исследования внедрены в процесс проектирования на ОА «Проектный институт «Агропроект», что обеспечивает получение более точных инженерных расчетов в реальном проектировании и позволяет определять сроки между ремонтными работами в процессе эксплуатации деревянных конструкций на нагелях с учетом циклически изменяющихся параметров внешней среды. Практические результаты исследований были использованы при проведении обследований, капитальных ремонтов и реконструкции зданий и сооружений компанией ООО «Марагропромстой», внедрение результатов исследований и разработок позволило определить причины повышения деформативности деревянных конструкций с соединениями на нагелях, смоделировать работу конструкций под воздействием циклически изменяющихся температуры и влажности, определять фактическую величину деформативности в любой момент эксплуатации конструкции; разработать эффективные мероприятия по обеспечению долговечности узловых соединений деревянных конструкций с соединениями на стальных цилиндрических нагелях.

**В заключении** приведены итоги выполненного исследования:

1. Выполнен анализ научно-технической и патентной литературы по проблемам эффективности и долговечности эксплуатации нагельных соединений элементов деревянных стропильных конструкций в условиях постоянно изменяющихся температурно-влажностных параметров воздушной среды. Анализ показал, что причиной преждевременного снижения физико-механических характеристик древесины в местах нагельных соединений являются возникающие в процессе эксплуатации градиентные потоки тепла и влаги в структуре древесины, вследствие различия теплофизических характеристик материалов металлического нагеля и древесины.



2. Разработаны физическая и математическая модели процессов переноса теплоты и массы вещества в древесине, обусловленные физическими переходами конденсации влаги в месте контакта «металл – древесина», и последующим испарением влаги вследствие погодного изменения температурно-влажностного состояния среды эксплуатации.

3. Разработана методология синтеза и решения краевых задач теплопроводности и диффузии в основу которой положен положительно зарекомендовавший себя численно-аналитический метод «микропроцессов», позволяющий сводить решение нелинейной краевой задачи тепло- или влагопроводности к системе чередующихся линейных краевых задач. В пределах каждого «микропроцесса» принимается постоянство теплофизических характеристик материала древесины (коэффициенты теплоемкости, тепло- и влагопроводности), но они ступенчато изменяются при переходе от рассматриваемого микропроцесса к последующему.

4. Сформулирована и решена краевая задача теплопроводности в древесине цилиндрического нагельного соединения при линейном изменении (нагревание или охлаждение) материала нагеля. В основу математической формулировки задачи положено дифференциальное уравнение теплопроводности в частных производных параболического типа с произвольным нелинейным начальным распределением температур и граничными условиями первого и второго рода.

5. Сформулирована и решена краевая задача влагопроводности в древесине цилиндрического нагельного соединения (диффузия в твердом теле) в древесине в окрестностях металлического цилиндрического нагеля в условиях конденсации влаги в месте контакта нагеля с древесиной и последующего частичного испарения влаги из древесины. В основу математической формулировки задачи положено дифференциальное уравнение диффузии в частных производных параболического типа с произвольным нелинейным начальным распределением температур и граничными условиями первого и второго рода.

6. С использованием современных экспериментальных методик и оборудования (тепловизора фирмы *SDS HotFind-LR* и влагомера конструкции *Hydromette HT 85*) выполнен комплекс экспериментальных исследований процессов тепло- и влагопереноса в древесине нагельных соединений. В эксперименте использовались образцы из сосны по ГОСТ 8486-86 «Пиломатериалы хвойных пород» плотность:  $\rho=550\text{кг/м}^3$ , теплоемкость:  $c=2510\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , теплопроводность:  $\lambda=0,17\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Диапазон изменения температур составил  $29 \dots 49 \text{ }^\circ\text{C}$ , диапазон изменения влажности  $W=6 \dots 45\%$ . Проведенные эксперименты показали адекватность разработанных математических моделей и методики расчета реальным физическим процессам.

7. Разработаны и внедрены в практику проектных расчетов рекомендации по изменению нормативно-технической документации и конкретные предложения по организации планово-предупредительных ремонтов в элементах стропильных конструкций зданий и сооружений на предприятиях Республики Марий Эл.

**Перспективы дальнейшей разработки тематики.** Разработанные на основании полученных физико-математических моделей процессов тепломассопереноса в нагельном соединении и экспериментальных данных рекомендации по обеспечению долговечности узловых соединений деревянных конструкций с соединениями на стальных цилиндрических нагелях находят применение на практике: при проведении обследований деревянных конструкций зданий и сооружений; при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройства и материалов, используемых при их изготовлении, объектов предприятий опасных производства и других промышленных объектов; а также для оптимизации сроков межремонтного обслуживания.

**Условные обозначения:**

$t$  – температура, °C;  $\tau$  – время, с;  $W$  – влажность, кг влаги/кг сухого;  $a, k$  – коэффициенты тепло- и влагопроводности древесины;  $\delta_T, \delta_p$  – коэффициенты термо- и бародиффузии, характеризующие влияние градиентов влагосодержания и давления на теплоперенос;  $\rho, c, \lambda$  – соответственно: плотность, теплоемкость и теплопроводность древесины.;  $\varepsilon$  – критерий фазового превращения, показывающий долю влаги, перемещающейся в материале в виде пара;  $r^*$  – скрытая теплота парообразования;  $W_n$  – относительная влажность слоя древесины, прилегающего к нагелю, кг влаги/кг сухого;  $W_p$  – относительная равновесная влажность древесины, кг влаги/кг сухого;  $m$  – масса конденсированной (испарившейся) влаги, кг;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи в газовой фазе, кг/(м<sup>2</sup>Па);  $P_n$  – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре "точки росы", Па;  $P_v$  – парциальное давление водяного пара в воздухе в условиях эксплуатации конструкции, Па;  $F$  – площадь поверхности конденсации (испарения), м<sup>2</sup>.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*публикации, индексируемые в базе данных SCOPUS*

1. Федосов, С.В. 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 вузов. Технология текстильной промышленности. - 2016. № 5. - С. 105-108.

2. Федосов, С.В. 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 // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2017. №1. - С. 32–36.

*публикации, включенные в перечень, определенный ВАК Минобрнауки РФ:*

3. Федосов, С.В. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Ч. 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.

4. Федосов, С.В. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Ч. 2. Динамика полей температур 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.

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

6. Федосов, С.В. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Ч. 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.

7. Федосов, С.В. 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.

*в других изданиях:*

8. **Бочков, М.В.** Тепломассоперенос в процессе эксплуатации нагельных соединений / **М.В. Бочков**, Ю.А. Гилёва, М.А. Иванова // Актуальные проблемы сушки и термо-влажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агро-промышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. – М: Москва, 2015. – С. 272-274.

9. Федосов, С.В. 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. Десятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей международной междисциплинарной научной конференции. - Йошкар-Ола: ПГТУ, - 2016. - С. 292-295.