

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Бочков Михаил Владимирович

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

Специальность 05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки РФ,
Лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники,
Академик РААСН,
доктор технических наук, профессор
Федосов Сергей Викторович

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ДРЕВЕСИНА И НАГЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ	14
1.1. Область применения древесины в строительстве	14
1.2. Основные сорта и свойства древесины Российских лесов	16
1.3. Физико-механические характеристики древесины	20
1.4. Анизотропия свойств древесины	31
1.5. Нагельные соединения	33
1.5.1. Основные виды классификации нагелей	33
1.5.2. Особенности расчета напряженного состояния нагельных соединений	42
1.6. Явления тепломассопереноса в древесине нагельных соединений	47
1.6.1. Перенос теплоты посредством теплопроводности	48
1.6.2. Массопроводность (диффузия в твердом теле)	50
1.6.3. Нагельные и граничные условия к задачам переноса теплоты и массы вещества	52
1.6.4. Элементы теории взаимосвязанного тепломассопереноса	54
1.6.5. Особенности зонального метода и метода «микропроцессов»	55
1.7. Постановка задач теоретического и экспериментального исследования	56
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	58
2.1. Используемые материалы	58
2.2. Краткое описание применяемых экспериментальных методик	60
2.2.1. Определение влажности древесины	60

2.2.1.1. Весовой метод	60
2.2.1.2. Определение влажности электровлагомером	61
2.2.2. Определение влагопоглощения древесины	63
2.2.3. Определение концентрации раствора кислоты методом прямого титрования	64
2.2.4. Определение плотности исследуемых растворов	65
2.2.5. Исследование процессов теплопереноса в древесине	66
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ЭЛЕМЕНТАХ НАГЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ НАГЕЛЕМ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫМ В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ	68
3.1. Физическая картина процессов тепломассопереноса вблизи цилиндрического нагеля при циклическом изменении параметров воздушной среды	68
3.2. Постановка и решение краевой задачи теплопроводности в древесине вблизи цилиндрического нагеля	76
3.3. Постановка и решение краевой задачи влагопроводности в древесине нагеля	89
3.4. Численный эксперимент	95
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В СОЕДИНЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО НАГЕЛЯ	99
4.1. Исследование кинетики процессов теплопереноса в древесине сосны при нагревании и охлаждении цилиндрического нагеля	99
4.2. Изучение кинетики сорбции влаги в древесине сосны	102
4.3. Изучение кинетики и динамики процессов увлажнения древесины	108
4.4. Пример практического расчета тепломассопереноса при конденсации и испарении влаги	112
4.5. Техничко-экономическое обоснование применения зданий из деревянного каркаса в агрессивных средах (на примере от-	120

делочного производства текстильного предприятия)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	127
Приложение 1	149
Приложение 2	150
Приложение 3	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной тематики исследований. Столетиями на Руси древесина являлась основным строительным материалом [1], из которого возводились величайшие храмы (Кижич), замечательные резные терема удельных князей и несметные крестьянские подворья.

Со временем появился камень, естественный и искусственный; с начала двадцатого века в строительство стремительно ворвались металл, железобетон и стекло, ознаменовавшие новую эру строительства небоскребов в богатых Соединенных Штатах Америки и богатейших Арабских Эмиратах.

Патриархальная Россия не оставалась в стороне от новейших тенденций в строительстве, не плелась в хвосте экономически развитых стран 18-19 веков, о чем свидетельствуют величавые сооружения в Москве и Санкт-Петербурге, построенные из естественных каменных материалов. Но, по-прежнему, дерево было и остается материалом, без которого нельзя себе представить ни Киево-Печорскую, ни Сергиев-Посадскую Лавры. Стандартные многоэтажки со стеновыми ограждающими конструкциями из силикатного (керамического) кирпича и железобетона также не обходятся без использования древесины.

Для стропильных систем кровельных покрытий, перекрытий, полов и других элементов строений дерево остается незаменимым материалом в современных сериях многоэтажных домов [2,3].

В средние века, когда металл был дорог и использовался в основном для изготовления оружия и элементов защиты от него, скрепление элементов деревянных конструкций осуществлялось деревянными же нагелями (гвоздями, шпунтами, шпонками), имеющими практически те же самые теплофизические, физико-химические и механические характеристики, что и скрепляемые элементы. Проблем в соединениях не возникало. И вновь «пришли иные времена». Металла стало производиться много, и разного сортамента. Появилась целесообразность применения скрепления деревянных деталей металлом, благо гвоздь, скоба, нагель элементарно под ударом раздвигали слои древесины, образованные годовыми кольцами и крепко соединяли элементы конструкций.

Потребности практики и приобретаемый опыт эксплуатации требовали от строителей объяснения причин и особенностей поведения системы «металл-древесина» для обеспечения условий безопасности зданий и сооружений, а также комфортности проживания людей.

В большинстве трудов по теоретическим и экспериментальным исследованиям деревянных конструкций отмечается негативное влияние повышенной влажности среды эксплуатации нагельного соединения как на саму древесину, так и на соединение деревянных элементов [4-48]. Вместе с тем, влияние процессов циклического изменения температуры и влажности воздуха на прочность и долговечность нагельных соединений изучены недостаточно.

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 учёные, как Т. Гестеши, В.Ф. Иванов, А. Жаксон, В.Н. Маслов, Б.Л. Николаи, П.П. Ершов, М.Е. Каган, Е.Е. Карлсен, В.М. Коченов, А.В. Леняцин, И.А. Циплёнков.

За рубежом основоположником современных зарубежных нормативных документов по расчёту деревянных конструкций *Eurocode* был *K.W. Johansen*. Он разработал методику расчёта, в которой была применена теория пластичности для определения прочности соединения. Впоследствии в своих работах *T. Moller, N.J. Larsen, P.Aune* и *M. Patton-Mallory. 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 и 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, А.С. Фрейдина, Б.В. Лабудина, К.П. Пятикрестовского, И.С. Инжутова, Д.К. Арленинова, В.М. Вдовина, В.Н. Вольнского, П.А. Дмитриева, В.В. Ермолаева, В.И. Жаданова, Л.М. Ковальчука, В.Г. Леннова, А.А. Титунина, С.Б. Турковского, С.И. Рощиной, А.Б. Шмидта, а также зарубежные ученые.

Решением проблем математического моделирования процессов теплопереноса в системах «газ-твердое 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 целей 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 теоретического и экспериментального исследований.

2. Сформулировать физическую и математическую модели теплопереноса в системе «металлический нагель – древесина» при циклически изменяющемся температурном режиме эксплуатации нагельного соединения (чередование стадий нагрева и охлаждения металлического цилиндрического нагеля). Осуществить решение сформулированной краевой задачи нестационарной тепло-

проводности 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 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 (нагрева и охлаждения) металлического нагеля. Провести проверку адекватности разработанной математической модели тепломассопереноса.

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 нагрева 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 тепло-влажностного переноса 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 влагосодержание;

-аналогичным образом, на основе разработанного численно-аналитического метода сформулирована и решена краевая задача влагопровод-

ности 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 тепловизорной 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 влагопереноса в системе «нагель-древесина» с использованием прибора – влагомера конструкции Hydromette НТ 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 влагопроводности для выбранного в исследовании сорта древесины.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанный в диссертации численно-аналитический метод расчета краевых задач тепло- и влагопроводности является базой для последующего теоретического анализа явлений тепломассопереноса в коллоидных капиллярно-пористых телах с учетом влияния влагопереноса 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 разработать практические рекомендации по мониторингу состояния стропильных конструкций при изменении температурно-влажностных параметров среды эксплуатации для целей их своевременных планово-предупредительных ремонтов.

Методология и методы диссертационного исследования:

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

-для выполнения задач экспериментальных исследований процессов переноса теплоты и влаги в древесине нагельного соединения использовались стандартные методики определения теплофизических характеристик материалов в соответствии с ГОСТ и современные приборы и оборудование.

Положения, выносимые на защиту:

- методология и метод численно-аналитического решения задач тепломассо-переноса 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 влагопроводности 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 диссертационных исследований опубликованы в журналах, рецензируемых ВАК Министерства образования и науки РФ: Строительные материалы №7-10 (2014г.), №12 (2016г.); Известия вузов. Технология текстильной промышленности №5 (2016г.), №1 (2017г.). Доложены на XXI, XXII, XXIII Международных научно-технических конференциях “Информационная среда вуза” г. Иваново, 2014-2016гг.; Международной межвузовской научно-технической конференции ас-

пирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера» г. Иваново, 2014-2016гг.; XVIII и XIX Международном научно-практическом форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)» г. Иваново, 2015–2016гг.; 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, 2015г.

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационного исследования обеспечили получение 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 «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 (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 эксперименталь-

ных 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. Алюном, 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.

ГЛАВА 1. ДРЕВЕСИНА И НАГЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

1.1. Область применения древесины в строительстве

Древесина на Руси издревле использовалась в качестве основного строительного материала [1,3]. Из нее можно изготовить многие виды несущих и ограждающих строительных конструкций: стропильные конструкции покрытия (фермы, балки, арки, купола и своды), перекрытия, стены и перегородки, потолки, окна и двери, опалубки, строительные леса [2-10]. Кроме того, в настоящее время активно применяются промышленные отходы из древесины: из опилок и стружек изготавливают прессованные плиты, доски [3].

Спрос на древесину и конструкции из нее обусловлен ее доступностью, простотой обработки и рядом положительных свойств, к которым относятся [3,49,50]:

- небольшая плотность, по сравнению с другими материалами, применяемыми для изготовления несущих строительных конструкций (плотность древесины в 12...16 раз меньше чем у стали и в 4...5 раз меньше чем у бетона);
- высокая удельная прочность (около $26000 \text{ м}^2/\text{с}^2$);
- стойкость к воздействию химически агрессивных сред;
- высокие эстетические и акустические свойства – лучшие концертные залы страны облицованы древесиной (например, концертный зал Мариинского театра г. Санкт-Петербург);
- малый коэффициент теплопроводности поперек волокон (сопротивление теплопередачи стены из бруса толщиной 200 мм эквивалентно по теплопроводности кирпичной стене толщиной 640 мм);
- малый коэффициент линейного расширения вдоль волокон, благодаря чему нет необходимости устраивать температурные швы в деревянных зданиях;
- легко обрабатывается режущими инструментами;
- возможность создания гнутоклееных конструкций;
- является экологически чистым материалом, что способствует созданию хорошего микроклимата в помещениях деревянных зданий;

- древесина является возобновляемым материалом (при производстве других конструкционных материалов используется большое количество исходного сырья и затрачивается много энергии).

К сожалению, древесина, как и другие строительные материалы, обладает недостатками [4,50]:

- неоднородность и анизотропность древесины;
- наличие пороков, снижающих качество изделий и конструкций из нее;
- большое влияние влажности и температуры на физико-механические свойства древесины;
- подверженность гниению и биопоражению;
- малая огнестойкость;
- ограниченность сортамента лесоматериала.

Наилучшим материалом для строительства является древесина хвойных пород, поскольку она меньше подвержена загниванию и имеет более правильную форму ствола. Повышенная сопротивляемость к загниванию и увлажнению объясняется наличием в ней смолы. К хвойным породам относятся сосна, ель, лиственница, кедр, пихта, можжевельник. Запасы ценной для строительства древесины хвойных пород в России составляют около 50 млрд. м³, а общий запас леса – 80 млрд. м³. При этом на долю лиственницы приходится 30%, сосны – 20%, ели и пихты – 16% [4]. Древесина хвойных пород используется преимущественно в строительстве при возведении несущих и ограждающих конструкций стационарных деревянных зданий и сооружений.

Древесина лиственных пород, имеющая по сравнению с хвойной более меньшую прочность и стойкость к загниванию, используется в строительстве временных зданий и сооружений. Широко применяется древесина твердых лиственных пород (дуб, береза) для изготовления соединительных деталей строительных конструкций, в качестве подушек, прокладок и других ответственных деталей конструкций, расположенных в местах, где имеют место большие напряжения сжатия и смятия в направлении поперек или под углом к волокнам древесины [84]. Береза служит основным сырьем для фанерной промышленности страны [88].

Перед изготовлением деревянных строительных конструкций у каждой партии древесины анализируются физико-механические характеристики и имеющиеся дефекты и пороки, от которых зависит сорт древесины.

1.2. Основные сорта и свойства древесины Российских лесов

В связи с тем, что пороки древесины неустранимы, принимаются меры к их ограничению в соответствии с требованиями, изложенными в государственных стандартах и технических условиях на изготовление и возведение деревянных конструкций (приложение 1).

При заготовке леса ствол разделявают по длине на бревна трех качественных категорий. Наилучшую по механическим характеристикам получают древесину с минимальным содержанием сучьев, которая находится в нижней комлевой части ствола.

Лесоматериалы, по поперечному сечению, делятся на круглые (бревна) и прямоугольные (пиломатериалы) [33]. Строительный лес, применяемый в виде бревен или пиломатериала, разделяют на сорта. Сорт – это показатель качества сырья, полуфабрикатов, удовлетворяющий определенным установленным требованиям. Основным (около 70%) сортообразующим признаком является сучковатость.

Бревна – части ствола дерева с опиленными торцами и очищенные от сучков. Они имеют естественное уменьшение диаметра по длине ствола, называемое сбегом [78]. Диаметр круглых лесоматериалов определяется диаметром тонкого кольца.

По диаметру бревна делятся на три группы: мелкие, средние и крупные. Мелкие бревна (подтоварник) имеют диаметр от 6 до 13 см с градацией 1 см. Средние бревна имеют диаметр от 14 см до 24 см включительно с градацией 2 см. К крупным относятся бревна с диаметром от 26 см и выше с градацией 2 см.

Выпускаются также калиброванные бревна с постоянным диаметром по длине. Стандартные длины: 3,0...6,5 м с интервалом 0,5 м. Более длинные бревна (например, для опор линий электропередач) готовятся по специальному за-

казу. Круглые лесоматериалы применяют в качестве стропил, опор ЛЭП, свай, при устройстве конструкций временного назначения и строительных лесов.

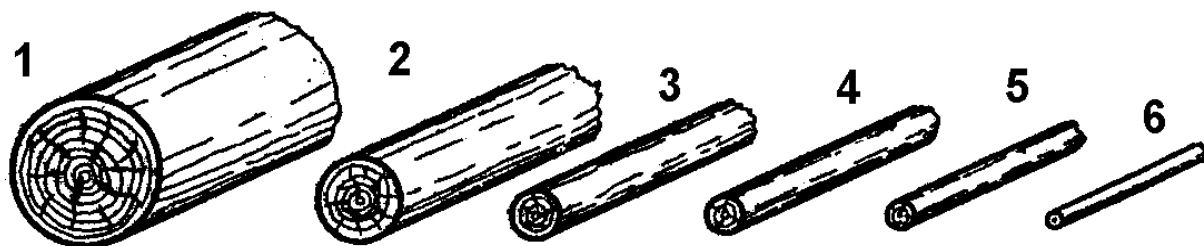


Рис. 1.1. Разновидности круглых лесоматериалов:

1 – бревно; 2 – подтоварник; 3 – слега; 4 – жердь; 5 – кол; 6 – тонкая жердь

Размеры и технические требования к круглым лесоматериалам хвойных пород даны в [6], а к круглым лесоматериалам лиственных пород приведены в [7]. В зависимости от качества древесины лесоматериалы заготавливают 1, 2 и 3-го сорта. Качество, в свою очередь, зависит от количества пороков древесины. В каждой группе выделяют еще виды и разновидности. При определении сорта круглых лесоматериалов, в соответствии с ГОСТ 9462-88 «Лесоматериалы круглые лиственных пород», учитывают только наличие следующих пороков:

- сучки (все разновидности);
- трещины (все разновидности);
- пороки формы ствола (вид кривизна);
- пороки строения древесины (виды пасынок, сухобокость, прорость, рак);
- грибные поражения;
- биологические повреждения (вид червоточина);
- инородные включения, механические повреждения и пороки обработки (виды заруб, запил, отщеп, скол, вырыв).

Все остальные разновидности пороков (химические окраски, покоробленности и т.д. [8]) не влияют на сорт бревен. При наличии на лесоматериалах порока, допускаемого стандартом для нескольких сортов, такие лесоматериалы относят к высшему сорту. При наличии нескольких пороков сортность устанавливают по пороку, характеризующему худший сорт. После определения сорта

по соответствующим нормативным документам [6, 7] и толщины лесоматериалы маркируют.

Пиломатериалы – материалы, получаемые продольным пилением или фрезерованием круглых лесоматериалов с последующим поперечным раскроем. Виды пиломатериалов по сортаменту (приложение 1):

- брус (пиломатериал толщиной 100 мм и более);
- брусок (пиломатериал толщиной до 100 мм и шириной не более двух толщин);
- доска (пиломатериал толщиной до 100 мм и шириной более двух толщин);
- пластины (получают при распиловке бревна вдоль оси на две равные части);
- четвертины (получаются при распиливании бревна в двух взаимно перпендикулярных направлениях или при распиловке пластины на две равные части);
- горбыль (боковая часть бревна, имеющая одну пропиленную, а другую непропиленную или пропиленную не на всю длину поверхность, с нормируемой толщиной и шириной тонкого конца).

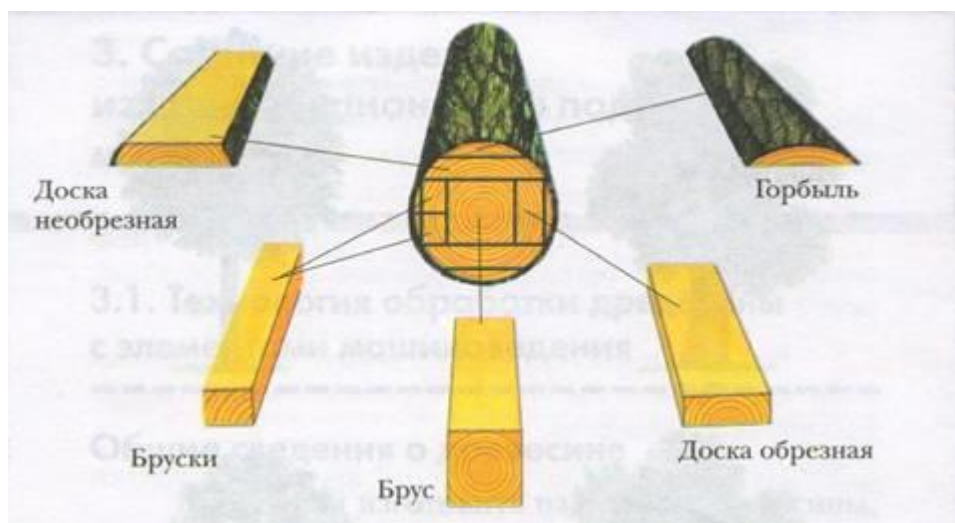


Рис. 1.2. Пиломатериалы

Широкую сторону доски называют пластью, узкую – кромкой, а линию их пересечения – ребром.

По характеру обработки пиломатериалы делится на [33]:

- обрезные (все четыре стороны пропилены, а размеры обзолов не превышают допускаемых);
- необрезные (пласти пропилены, а кромки не пропилены или пропилены частично; величины обзолов больше допустимого в обрезном пиломатериале).

По местоположению пиломатериалов в бревне различают [3]:

- сердцевинные (доски, содержащие сердцевину, пласти которой расположены симметрично по обе стороны от продольной оси бревна);
- центральные (доски, выпиленные из центральной части бревна в количестве двух штук с рассечением сердцевины);
- боковые (все остальные доски, следующие за сердцевинной или центральными).

По отношению к продольной оси бревна:

- радиальные (сердцевинная и центральные, имеющие на пласти полосатый рисунок текстуры);
- полурadiaльные (две доски, следующие за сердцевинной);
- тангенциальные (доски, выпиленные из периферийной части бревна, имеющие на пласти V-образный рисунок текстуры).

Длина товарного пиломатериала может быть до 6,5 м.

Каждый сорт древесины имеет свое применение, в связи с этим и требования для каждого сорта определены индивидуально. Размеры и технические требования к пиломатериалам хвойных и лиственных пород описаны в ГОСТ (приложение 1).

По качеству древесины и обработки доски и бруски разделяются на пять сортов (отборный, 1, 2, 3, 4-ый), а брусья – на четыре сорта (1, 2, 3, 4-ый).

Пиломатериалы отборного, 1, 2, 3-го сортов изготавливают сухими (влажностью не более 22%), сырыми (влажностью более 22%), а также сырыми антисептированными.

Сырые и сырые антисептированные пиломатериалы должны быть заготовлены в холодный период года. Влажность пиломатериала 4-го сорта не нормируется.

Разделение лесоматериала по сортам, рассчитанное на широкое применение древесины в народном хозяйстве, не обеспечивает полностью надежную работу элементов деревянных конструкций под нагрузкой. Необходимо также учитывать механические свойства древесины, среди которых основное значение имеет прочность.

1.3. Физико-механические характеристики древесины

Для полного представления о свойствах древесины рассматривают два основных направления: вдоль волокон (по продольной оси деревянного элемента) и поперек волокон (перпендикулярно продольной оси деревянного элемента), или, по-другому говоря, радиальное (по радиусу ствола дерева) и тангенциальное (по касательной к годовому слою).

Древесина состоит преимущественно из органических веществ [155]. Химический состав древесины разных пород практически одинаков. Абсолютно сухая древесина в среднем содержит 49% углерода, 44% кислорода, 6% водорода, 0,1...0,3% азота и прочие. На изменение химического состава древесины оказывают влияние влажность и температура древесного сырья, удельное давление и продолжительность прессования материала. При сжигании древесины остается ее неорганическая часть – зола. В состав золы входят кальций, калий, магний и другие элементы, которые образуют основные органические вещества – целлюлозу, лигнин и гемицеллюлозу. В состав древесины входит порядка 45...60% целлюлозы, 15...35% лигнина, 15...25% гемицеллюлозы.

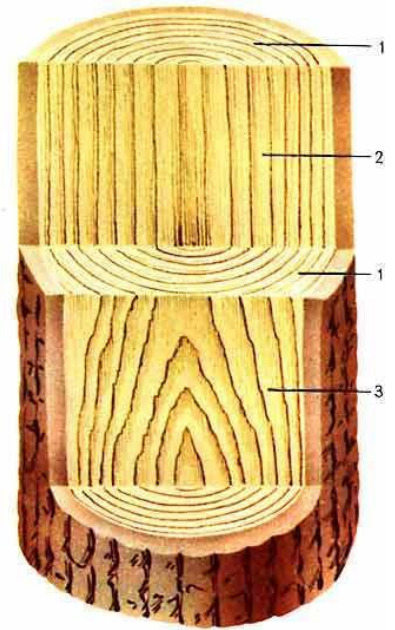


Рис. 1.3. Основные разрезы ствола:
1 – поперечный;
2 – радиальный;
3 – тангенциальный

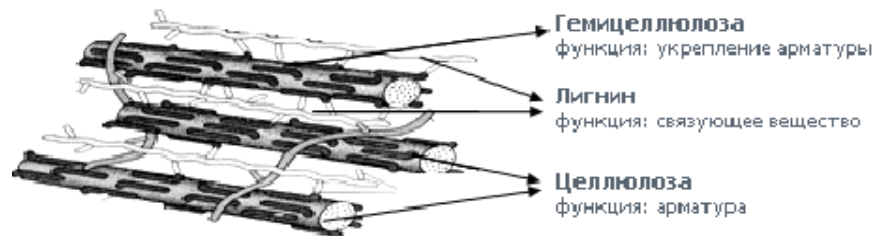


Рис. 1.4. Строение клеточных стенок древесины

Целлюлоза представляет собой линейный полимер – полисахарид и является основным веществом древесины, обеспечивающим ее упругость и механическую прочность [88]. Это очень стойкое вещество белого цвета, нерастворимое в воде и обычных органических растворителях (спирте, эфире, ацетоне и

других). Пучки макромолекул целлюлозы – тончайшие волокна называются микрофибриллами. Они образуют целлюлозный каркас стенки клетки. Микрофибриллы ориентированы преимущественно вдоль длинной оси клетки, между ними находится лигнин, гемицеллюлоза и вода. В древесине хвойных пород целлюлозы содержится больше (41...58%), чем в древесине лиственных пород (39...47%).

К физическим свойствам древесины относятся: влажность (абсолютная $w_{\text{абс}}$, кг/кг или относительная $w_{\text{отн}}$, %); средняя плотность, ρ , кг/м³; звукопроводность (скорость распространения звука в среде); электропроводность, γ , 1/Ом; теплопроводность, λ , Дж/(с·м·К); температурный коэффициент линейного расширения; стойкость к коррозии и прочие.

Наиболее важным свойством древесины является влажность. В специальной литературе [87] различают два вида влаги, содержащейся в древесине: связанную (гигроскопическую) и свободную (капиллярную).

Кроме этого, различают влагу, входящую в химический состав веществ, которые образуют древесину (химически связанная влага). Эта влага имеет значение только при химической переработке древесины.

Максимальное количество гигроскопической влаги при отсутствии свободной влаги в полостях клеток называется точкой насыщения волокон и составляет 30%. На рисунке 1.5. приведена иллюстрация форм связи влаги с материалом, изложенная в монографии академика А.В. Лыкова [130].

В зависимости от содержания влаги различают древесину [121]: комнатно-сухую (влажность 8-12%); воздушно-сухую (влажность 15-20%); полусухую (влажность 40% и выше); сырую (влажность до 200%).

Равновесная влажность древесины – это собственное значение влажности древесины, которое она приобретает при длительном нахождении в неизменяемых условиях окружающей среды, т.е. при определенной температуре и влажности окружающего воздуха.

Для определения равновесной влажности можно воспользоваться диаграммой профессора Серговского П.С. [119-121] или профессора Чулицкого Н.Н. [91].

Диаграмма профессора Серговского П.С. построена в координатах температура – степень насыщения воздуха (по вертикали относительная влажность воздуха, по горизонтали его температура). Пересечение этих показателей дает наклонную линию, которая показывает влажность древесины в процентах.

Для определения влажности древесины, хранящейся в помещении с той или иной температурой и влажностью воздуха, составил свою диаграмму Чулицкий И.Н., при помощи которой можно установить влажность с точностью до 0,75%. На этой диаграмме по вертикали расположена влажность воздуха, по горизонтали – температура воздуха. Наклонные линии показывают влажность древесины.

Содержание влаги в древесине (абсолютная влажность) можно определить по формуле [76]:

$$W = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

где m - масса влажной древесины; m_0 - масса абсолютно сухой древесины.

Данный сушильно-весовой метод является прямым и самым точным. Но в настоящее время существуют различные приборы (ручные влагомеры), с помощью которых можно определить не только влажность, но и ее производные.

В свежесрубленной древесине наиболее влажной является заболонь, а наименее влажной – ядро. При высыхании древесины свободная влага удаляется быстро и не влияет на изменение ее свойств, а гигроскопическая влага требует искусственной сушки. При изменении влажности в пределах от абсолютно сухого состояния до точки насыщения волокон древесина претерпевает объемные изменения, т.е. при уменьшении влажности происходит усушка, при увеличении влажности – разбухание.

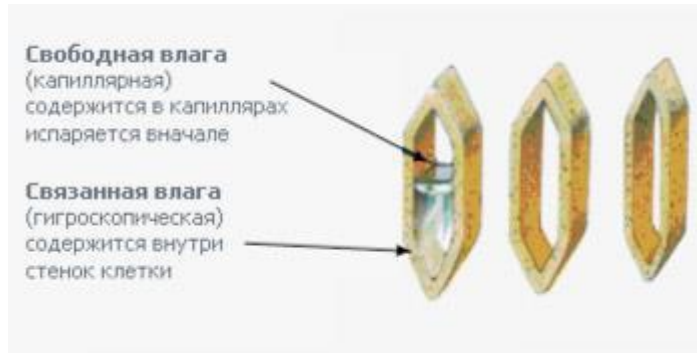


Рис. 1.5. Свободная и связанная влага в древесине

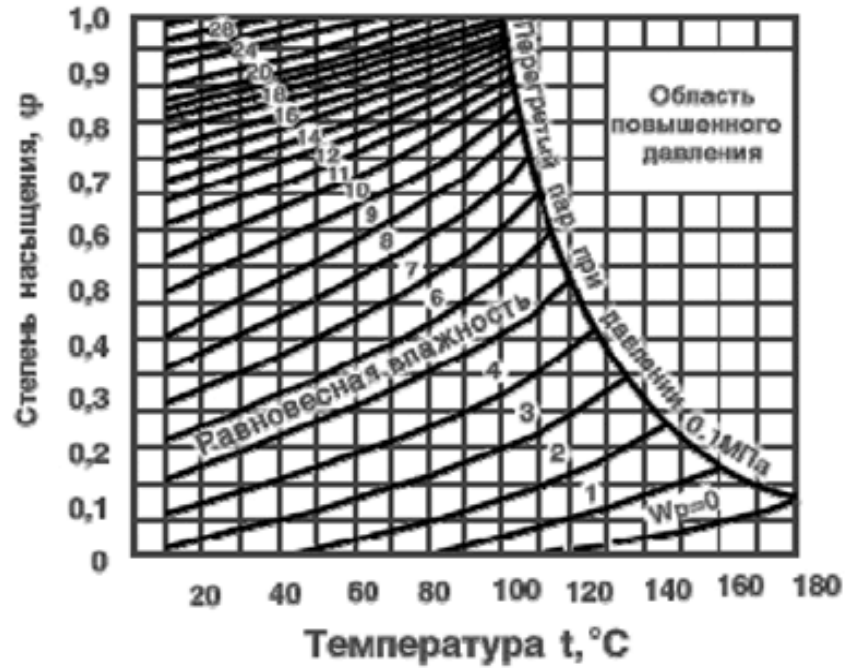


Рис. 1.6. Диаграмма равновесной влажности Серговского П.С. [92]

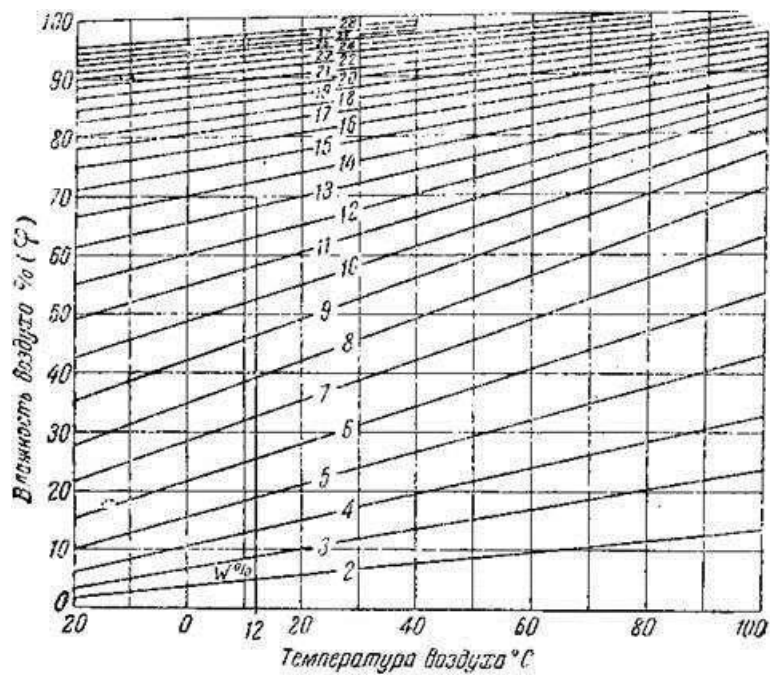


Рис. 1.7. Диаграмма равновесной влажности древесины Чулицкого И.Н. [91]

Усушка древесины – это уменьшение ее линейных размеров и объема при высыхании [89]. При этом вдоль волокон усушка составляет всего 0,1%, поперек волокон более значительна. В радиальном направлении 3...5%, а в тангенциальном направлении – 6...10%.



Рис. 1.8. Усушка древесины

Разбухание – способность древесины увеличивать свои размеры и объем при поглощении влаги. При увеличении влажности свыше точки насыщения волокон, когда влага занимает полости клеток древесины, дальнейшего разбухания не происходит. Чем плотнее древесина, тем больше ее разбухание и усушка.

С изменением влажности средняя плотность древесины меняется, поэтому принято сравнивать плотность древесины при одной и той же стандартной влажности – 12%.

Плотностью древесины зависит от породы, количества пустот, толщины стенок клеток и содержания влаги. С уменьшением влажности древесины снижается ее плотность, и она становится значительно легче. Плотность поздней древесины годовичного слоя в 2-3 раза больше, чем ранней. Самая большая плотность у дуба, далее по убывающей следуют ясень, клен, лиственница, бук, береза, орех, сосна, липа, осина, ель, пихта.

Звукопроводность древесины довольно высока и зависит от породы дерева и от направления волокон. Вдоль волокон звук проходит быстрее всего, медленнее в радиальном и еще медленнее в тангенциальном направлении. Звуко-

проводность древесины в продольном направлении в 16 раз выше, чем у воздуха, а в поперечном в 4 раза. Деки всех музыкальных инструментов делают из древесины, ели и пихты [33], потому что их древесина резонирует звук. Сырая и загнившая древесина хуже проводит звук.

Электропроводность древесины характеризуется ее сопротивлением прохождению электрического тока. Способность древесины проводить электрический ток находится в обратной зависимости от электрического сопротивления. Древесина в сухом состоянии не проводит электрический ток, т.е. является диэлектриком, что позволяет применять ее в качестве изоляционного материала [156]. Электрическая прочность – это способность древесины противостоять пробою, т.е. снижению сопротивления при больших напряжениях. Диэлектрическая проницаемость, т.е. отношение емкости конденсатора с прокладкой из древесины к емкости конденсатора с воздушным зазором между электродами, для сухой древесины равна 2...3.

Теплопроводность древесины – это свойство, характеризующее интенсивность переноса тепла в материале. Вследствие пористого строения древесина плохо проводит тепло. Теплопроводность древесины зависит от плотности, влажности и направления волокон [154]. Чем больше плотность и влажность, тем больше ее теплопроводность. Теплопроводность древесины вдоль волокон в 2 раза больше, чем поперек волокон. Коэффициент теплопроводности поперек волокон при стандартной влажности 12% более чем в 2 раза ниже, чем при влажности равной 30%. Это объясняется трубчатым строением волокон древесины.

Линейное расширение при нагревании, характеризуемое коэффициентом линейного расширения, в древесине различно вдоль волокон и поперек волокон. Коэффициент линейного расширения поперек волокон пропорционален плотности древесины, и в 7...10 раз больше коэффициентов расширения вдоль волокон.

Коррозионная стойкость древесины очень важна для конструкций и изделий, особенно тех, которые эксплуатируются под открытым небом. Скорость коррозии древесины зависит от факторов окружающей среды [149]: биологиче-

ских (поражения различными микроорганизмами, насекомыми, грибами и т.п.) и климатических (влияние влажности воздуха, ультрафиолетовое излучения, колебаний температуры, кислорода воздуха, осадков).

Кроме этого, большое значение на разрушение древесины от коррозии имеет воздействие на нее солей, щелочей, кислот [154]. При воздействии некоторых сильных неорганических кислот или их солей разрушается одна из основных составляющих древесины – целлюлоза. В результате гидролиза целлюлозы древесина теряет свою прочность. На целлюлозу практически не оказывают агрессивного воздействия большинство растворителей (эфир, ацетон, спирт), разбавленные растворы щелочей и минеральных кислот, органические кислоты. При воздействии на материал щелочей и их растворов (сернокислые соли высоких концентраций, соли цинка, железа и алюминия) происходит постепенное разрушение лигнина. Слабые растворы минеральных кислот (с концентрацией до 5%) и пыль солей калия оказывают лишь незначительное агрессивное воздействие на поверхностный слой древесины, не разрушая ее структуры и не оказывая пагубного влияния на прочность материала. При повышении концентрации и температуры минеральных солей, древесина уже поддается более активной коррозии. Под воздействием минеральных кислот дерево сначала меняет окрас (постепенно темнеет), затем происходит разрушение основных составляющих и потеря связей между волокнами [153]. При этом прочность значительно уменьшается.

Лиственные породы химически менее устойчивы, чем хвойные. Это обусловлено наличием в составе хвойных пород смолистых веществ. Благодаря смолам древесина не разрушается при воздействии нейтральных солей любых концентраций и их растворов [150].

Внешний вид древесины характеризуется [33] цветом, текстурой, блеском, запахом, макроструктурой.

Под цветом древесины понимают определенное зрительное ощущение, которое зависит, в основном, от спектрального состава отраженного ею светового потока. Цвет многих пород известен и является одним из признаков при их распознавании. Цвет зависит от породы дерева, места его произрастания, воздуха и

других факторов. По цвету, наличию вкраплений в некоторых случаях можно судить о состоянии и качестве материала. Например, синеватая окраска хвойной древесины свидетельствует о начальной стадии загнивания (цвет здоровой сосны – от коричневатого-желтого в зонах, насыщенных смолой, до светло-желтого; цвет ели – от светло-желтого до белого); черные и темно-коричневые пятна на буковой древесине признак загнивания (цвет здорового бука – от желто-бежевого до розовато-бежевого). Хорошая древесина не должна обладать достаточно однородным цветом. Например, дуб насчитывает до 20 цветовых оттенков, а орех – до 40. С возрастом древесина у всех деревьев темнеет.

Текстура древесины – это рисунок, образующийся на ее поверхности вследствие перерезания анатомических элементов (годичных слоев, сердцевинных лучей, сосудов) [149]. Характер рисунка зависит от направления разреза, расположения волокон, размера сердцевинных лучей, ширины годичных слоев и различий в окраске между ранней и поздней древесиной. Древесину с красивой текстурой имеют дуб, ясень, орех, красное дерево. Химические окраски и грибные поражения вызывают изменение этого свойства. Особенно важна текстура, а также и цвет, при изготовлении мебели, предметов декора и в художественных работах.

Блеск древесины [154]– это ее способность направленно отражать световой поток. Блеск зависит от плотности, количества и размеров сердцевинных лучей и плоскости разреза. Чем крупнее сердцевинные лучи и чем плотнее древесина, тем значительнее будет блеск древесины. Блеск древесины в радиальной плоскости выражен всегда сильнее, чем в тангенциальной. К потере блеска приводит загнивание. Наибольшим блеском обладает древесина бука, дуба, белой акации. Матовый блеск имеют тополь, липа, осина, тик. Золотистый блеск у черешни. Серебристый блеск у сибирского кедра.

Запах древесины зависит от содержания в ней смолистого эфирного масла, дубильных и ароматических веществ [33]. Наиболее сильным запахом обладают деревья хвойных пород (сосна, кедр), содержащие смолу, из лиственных – дуб. Древесина липы и тополя практически не имеет запаха. После раскря древесины в сыром виде по мере высыхания запах древесины значительно сни-

жается. Поражение грибами, загнивание и длительное хранение вызывают выветривание ароматических веществ и потерю естественного запаха.

Макроструктура древесины – это такие особенности древесины, которые можно исследовать простейшими оптическими средствами или которые доступны невооруженному глазу. При оценке макроструктуры определяют [50] ширину годичных слоев, степень равнослойности древесины, содержание поздней древесины в годичных слоях, равноплотность древесины; величину и характер распределения естественных неровностей, образовавшихся вследствие перерезания анатомических элементов.

Показателем, характеризующим ширину годичных слоев, служит число слоев, приходящееся на 1 см отрезка, отмеренного по радиальному направлению на торцевой поверхности образца.

Степень равнослойности древесины обычно оценивают по разнице в числе годичных слоев на двух соседних отрезках.

Содержание поздней древесины определяется соотношением в процентах между суммарной шириной зон поздней древесины и общей протяженностью в радиальном направлении участка измерения, включающего целое число слоев.

Равноплотность древесины характеризует равномерность распределения механических тканей по ширине годичного слоя. Малой равноплотностью обладают лиственница, сосна, дуб, ясень. Высокой равноплотностью отличаются клен, ольха, осина, липа.

К механическим свойствам древесины относят [78] твердость, упругость, прочность, ударную вязкость, способность удерживать металлические крепления.

Твердость – это способность древесины сопротивляться внедрению в нее других тел. Твердость торцевой поверхности выше твердости боковой поверхности (тангенциальной и радиальной) на 30% у лиственных пород и на 40% у хвойных. Твердость древесины, высушенной до 12% влажности, в 1,5-2 раза выше твердости древесины 30% -ой влажности. По степени твердости все древесные породы можно разделить на три группы:

1) мягкие – торцовая твердость 40 МПа и менее (ель, кедр, сосна, пихта, тополь, липа, осина, ольха, можжевельник);

2) твердые – торцовая твердость 40,1 – 80 МПа (лиственница, бук, дуб, вяз, сибирская береза, рябина, клен);

3) очень твердые – торцовая твердость более 80 МПа (кизил, тис, акация белая, береза железная).

Чем выше твердость, тем труднее обрабатывать древесину.

Упругость – способность древесины восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Модуль упругости древесины поперек волокон в 20 раз меньше модуля упругости древесины вдоль волокон. Чем больше модуль упругости, тем более жесткая древесина.

Прочность – это способность древесины сопротивляться разрушению от механических усилий, характеризующихся пределом прочности. Предел прочности древесины зависит от направления и скорости действия нагрузки, породы древесины, плотности, влажности, наличия пороков. С увеличением плотности древесины увеличивается и ее предел прочности. Влажность уменьшает предел прочности древесины. Предел прочности различен при разных видах деформации (растяжение, сжатие, изгиб кручение, сдвиг), а кроме этого зависит от направления действия нагрузок.

Основные прочностные показатели древесины сравнительно по породам (при влажности 12 процентов) приведены в таблице 1.1.

Ударная вязкость – это способность древесины поглощать работу при ударе без разрушения. Определяется при испытаниях на изгиб. Ударная вязкость древесины деревьев лиственных пород примерно в 1,5-2 раза выше вязкости древесины хвойных пород.

Свойство древесины удерживать в себе гвозди, нагели, шурупы и другие металлические крепления объясняется ее упругостью. Вбиваемый в древесину гвоздь раздвигает волокна, которые вследствие своей упругости давят на поверхность гвоздя и тем самым оказывают сопротивление его выдергиванию. Это сопротивление зависит от объемного веса, влажности и строения древесины, а также от направления вбиваемого гвоздя по отношению к волокнам. Оно

определяется силой в килограммах, необходимой для извлечения забитого гвоздя. Сила удерживания креплений зависит от площади соприкосновения древесины с их поверхностью. Гвозди с квадратными или многогранным поперечным сечением, имеющие большую поверхность, нежели гвозди круглого сечения, держатся в древесине прочнее. Гвозди любой формы можно вколачивать только в мягкую древесину. В твердой древесине для них предварительно высверливают гнезда диаметром 0,7-0,8 толщины гвоздя и глубиной не менее половины его длины. В твердой древесине гвоздь держится прочнее, чем в мягкой.

Таблица 1.1. - Основные прочностные характеристики древесины

Порода древесины	Плотность кг/м ³	Предел прочности вдоль волокон, МПа при					Твердость, Н/мм ²				Модуль упругости при изгибе, ГПа
		изгибе	сжати	растяжении	скалывании	торц.		рад.			
						рад.	танг.	торц.	рад.	танг.	
Акация белая	800	148	73,1	171	13,2	14,7	94,2	66,2	75,9	16,3	
Береза	640	109,5	54	136,5	9,02	10,9	46,3	35,9	32,1	14,2	
Бук	680	104	52,9	124	12,1	14	65,1	53,2	49,5	12,4	
Вяз	650	92,4	45,6	84,5	8,85	9,91	54,7	41,2	41,1	10,1	
Граб	795	127,7	60,9	128,5	14,7	18,5	88,4	75,9	78,1	3,2	
Груша	710	106	57,7	-	8,58	13,3	77	57,7	58,9	11,9	
Дуб	780	87,3	55,9	-	10,7	12,7	57,3	48,2	52,8	-	
Ель	445	78,6	45	101	6,83	6,72	39,2	17,5	17,8	9,6	
Ива	455	70,7	38,2	99,1	7,26	10,3	27,4	20,9	20,7	8,98	
Клен	690	115	58,5	-	12	13,7	73,8	54,1	57,4	11,9	
Липа	495	86,4	45,8	117	8,42	8	25	16,7	17,4	8,94	
Лиственница	665	108,8	61,5	124	9,78	9,11	42	31,5	33,4	14,3	
Ольха	525	78,9	44,5	97,3	7,97	9,8	39,2	26,5	28,2	9,33	
Орех грецкий	590	108	55,4	-	10,7	11,4	62	-	-	11,7	
Осина	495	76,5	43,1	121	6,15	8,42	25,8	18,7	19,6	11,2	
Пихта	375	67,9	40	66,3	5,87	5,71	27,4	15,1	14,2	9,02	
Сосна	505	84,5	46,3	102	7,44	7,23	28,4	22,5	23,2	12,2	
Тополь	455	68	40	87,8	5,96	7,15	26,7	18,5	-	10,3	
Ясень обыкн.	680	118	56,2	140	13,4	13	78,3	57,1	65,1	11,9	

1.4. Анизотропия свойств древесины

Древесина является анизотропным материалом, т.е. материалом с неодинаковыми свойствами в различных структурных направлениях [14]. Само слово «анизотропия» происходит от двух греческих слов – «анизос» (неравны) и «тропос» (направление). Анизотропия - следствие волокнистого строения и особенностей анатомического строения древесины, в которой ее механические и упругие свойства резко отличаются для направлений вдоль и поперек волокон. Срубленная древесина, рассматриваемая в техническом древесиноведении как конструкционный материал, состоит из одних клеточных оболочек [15].

В клеточной стенке имеются слои, в каждом из которых целлюлозные микрофибриллы ориентированы по-разному [16]. В наиболее мощном среднем слое вторичной оболочки спирально расположенные микрофибриллы ориентированы под углом 5-15° к продольной оси клетки. Расположенная между древесиной и корой тонкая прослойка образовательной ткани – камбий содержит два типа живых начальных клеток (инициалей), из которых преобладающим является тип инициалей, имеющих сильно вытянутую форму и образующих в древесине анатомические элементы, ориентированные вдоль его оси [153].

Расположение древесных волокон оси дерева обуславливает резкое различие механических свойств древесины в направлении вдоль и поперек ствола. Это различие усиливается влиянием ориентации микрофибрилл в клеточных стенках и ориентации части молекул целлюлозы в микрофибриллах.

Таким образом, различие в величине характеристик свойств древесины в направлениях вдоль и поперек волокон обусловлено ее макро- и микростроением. Модули упругости для направления вдоль волокон почти в 40 раз (ель) больше, чем поперек; предел прочности при сжатии для этих направлений отличается в 10 раз, а при растяжении в 20-30 раз.

Отношения величины модуля упругости вдоль и поперек волокон для древесины хвойных пород в среднем оказываются более высокими, чем для древесины лиственных. Объясняется это менее упорядоченным строением древесины лиственных пород и относительно большим влиянием сердцевинных лучей на их жесткость в поперечном направлении. Наименьшее различие в упругих

свойствах вдоль и поперек волокон имеет древесина дуба с толстостенными короткими древесными волокнами и большим содержанием сердцевинных лучей. Наибольшее различие обнаруживает древесина ели с тонкими и длинными трахеидами.

При изучении механических свойств древесины значительными преимуществами отличаются расчетные схемы, основанные на ее изучении как сплошной анизотропной среды. На этих расчетных схемах основываются инженерные расчеты прочности элементов конструкций [39-43], а также методы экспериментального определения физико-механических характеристик древесины [47-49], так как ориентированное микро- и макростроение древесины способствует ее анизотропии не только при механических, но и при других физических воздействиях.

Древесина проявляет свои анизотропные свойства при изменении теплофизических свойств (теплопроводность и линейное тепловое расширение), электропроводности, электрической прочности, диэлектрической проницаемости и пьезоэлектрических свойств. В кристаллофизике (учении о симметрии среды и о тензорном представлении ее характеристик) показано [153], что при помощи симметричных материальных тензоров второго ранга могут быть описаны такие свойства или коэффициенты анизотропных сред, как теплопроводность, тепловое расширение, электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Различия между коэффициентами, характеризующими тепловые и электрические свойства для направлений вдоль и поперек волокон древесины всех пород, больше, чем для радиального и тангенциального направлений. Величины соответствующих коэффициентов и их анализ приведены в [15]. Если измерены коэффициенты линейного температурного расширения α ортотропного тела (в том числе и древесины) по направлениям трех осей структурной симметрии a, r и t , то величина коэффициента $\alpha_{x'}$ в произвольном направлении x' , составляющим углы, направляющие косинусы которых равны C_{11} , C_{12} и C_{13} , определяется по формуле:

$$\alpha_{x'} = \alpha_a C_{11}^2 + \alpha_r C_{12}^2 + \alpha_t C_{13}^2. \quad (1.2)$$

Эта формула следует из закона преобразования компонент тензора второго ранга при повороте осей координат.

Исследования по измерению коэффициентов линейного расширения для направлений, не совпадающих с осями симметрии древесины, в литературе практически отсутствуют.

1.5. Нагельные соединения

Нагелями называются гибкие стержни, пластинки или иные вкладыши, препятствующие взаимному сдвигу соединяемых элементов и работающие в основном на изгиб. В переводе с немецкого «нагель» означает «гвоздь». Нагели используются в стыках растянутых элементов, в составных стержнях и балках на податливых связях, в узлах деревянных ферм.

1.5.1. Основные виды классификации нагелей

По форме поперечного сечения известны различают [50] цилиндрические и пластинчатые нагеля, а также металлические зубчатые пластины. Подробнее классификация приведена на рисунке 1.9.

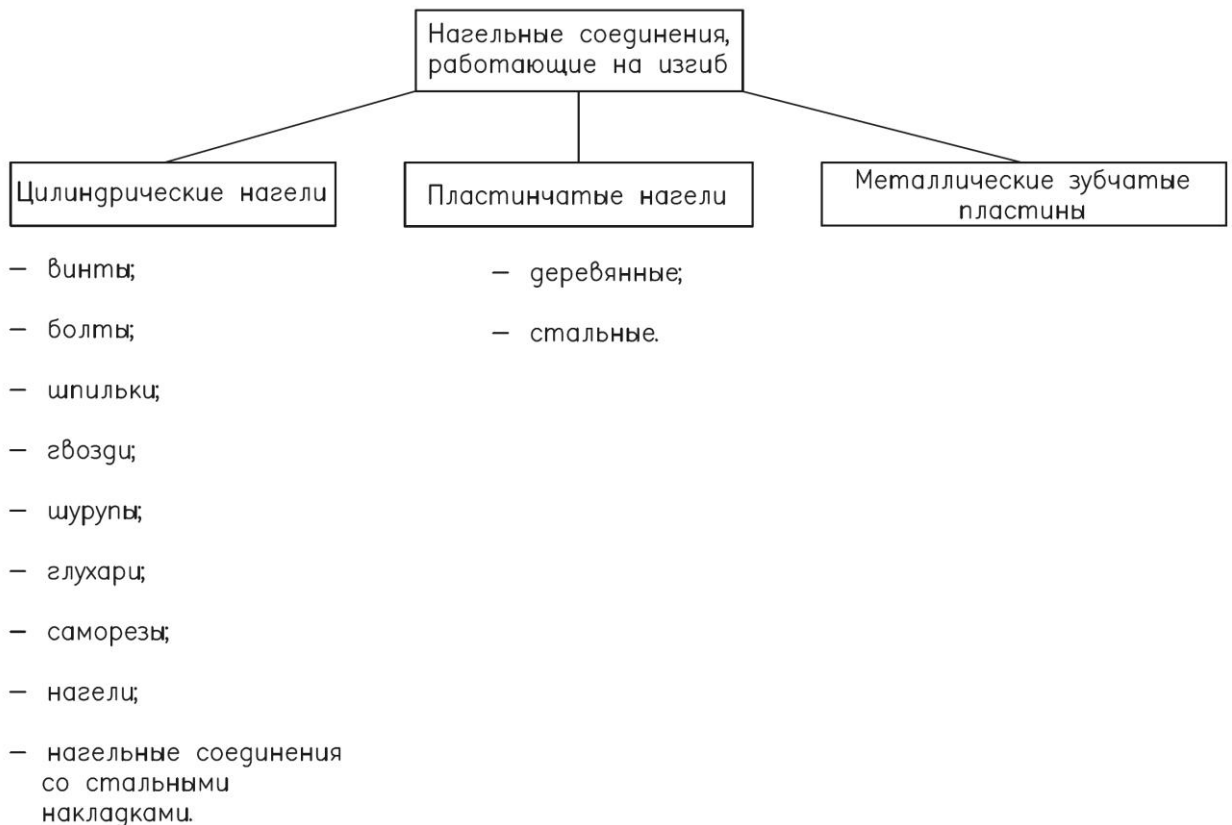


Рис. 1.9. Типы нагельных соединений

По материалу нагели могут быть стальные, деревянные (из твердых пород древесины – дуб, береза) или пластмассовые (из конструкционных стеклопластиков типа АГ-4с).

По способу постановки нагели различают:

- нагели, устанавливаемые в предварительно просверленные отверстия (диаметр нагеля равен диаметру отверстия);
- нагели, устанавливаемые забивкой в древесину без предварительного сверления отверстий (при диаметре нагелей менее 6 мм – гвозди);
- нагели, завинчиваемые в предварительно просверленные отверстия (диаметр отверстия равен 0,8 диаметра нагеля);
- металлические зубчатые пластины устанавливаются методом запрессовки.

Цилиндрические нагели, применяемые для соединения элементов деревянных конструкций, в зависимости от вида материала могут быть изготовлены из стали, алюминия, стеклопластика, прочных пород дерева – дуба, бука, березы. Их чаще всего используют при выполнении узловых и стыковых сопряжений элементов.

В соединениях деревянных элементов отношение длины нагеля к его диаметру достаточно большое, поэтому нагель работает как гибкий стержень главным образом на изгиб и неравномерно сминает древесину в гнезде. Напряжения среза нагеля не учитываются в расчете, поскольку срезать деревянным элементом нагель невозможно. Термин «срез» употребляется для характеристики соединения по количеству плоскостей относительно сдвига между соединяемыми элементами, которые пересекаются нагелями. В зависимости от расположения срезов по отношению к осям действия сил различают симметричные (двухсрезовые и многосрезные) и несимметричные соединения (односрезные, двухсрезовые и многосрезные) [50].

К цилиндрическим нагелям относятся: винты, болты, шпильки, гвозди, шурупы, глухары, саморезы, нагели (рисунок 1.11).

Винт (от нем. Gewinde – нарезка, резьба) – крепежное изделие для соединения деталей, с внутренней резьбой или без нее. Представляет собой стержень с наружной резьбой на одном конце и конструктивным элементом для передачи

крутящего момента на другом. Винт состоит из трех элементов: цилиндрический стержень (часть винта, непосредственно входящая в отверстие или вворачивающаяся в материал), головка (часть винта, служащая для передачи на него крутящего момента), подголовник (необязательная часть винта, непосредственно примыкающая к головке и служащая для центрирования винта или предотвращения его проворачивание).

В зависимости от предназначения различают следующие формы головок винта [39]: плоская, выпуклая, круглая, грибовидная, потайная, полупотайная.

В зависимости от назначения винты бывают крепежные (для разъемного соединения деталей) и установочные (для взаимной фиксации деталей).

Болт – крепежное изделие в виде стержня с наружной резьбой, как правило, с шестигранной головкой под гаечный ключ, образующее соединение при помощи гайки или иного резьбового отверстия.

Шпилька – крепежное изделие в виде стержня с наружной резьбой, образующее соединение при помощи гайки или резьбового отверстия.

Гвоздь – крепежное изделие в виде стержня с головкой и острым концом. Внедрение гвоздя в элемент конструкции осуществляется путем забивания, в котором он удерживается силой трения. По форме стержень может быть цилиндрическим, параллелепипедным, конусовидным и пирамидальным. Наряду с обычными гладкими гвоздями применяются профилированные гвозди с различным рисунком профиля. Такие гвозди без изменения массы имеют большую площадь поверхности, чем гладкие гвозди, что приводит к увеличению сопротивлению выдергивания.

Соединение на гвоздях имеет специфические особенности. В месте забивки гвоздя древесина сминается, образуются продольные трещины, отщепы. Частично эти недостатки устраняются применением гвоздей крестообразного профиля, для которых можно не сверлить отверстия даже при диаметре более 6 мм. Улучшенными свойствами обладают гвозди из стеклопластика АГ-4С [45]. Их забивают в древесину без предварительного рассверливания гнезд. Прочность их при изгибе достигает 1000 МПа, но они весьма деформативны.

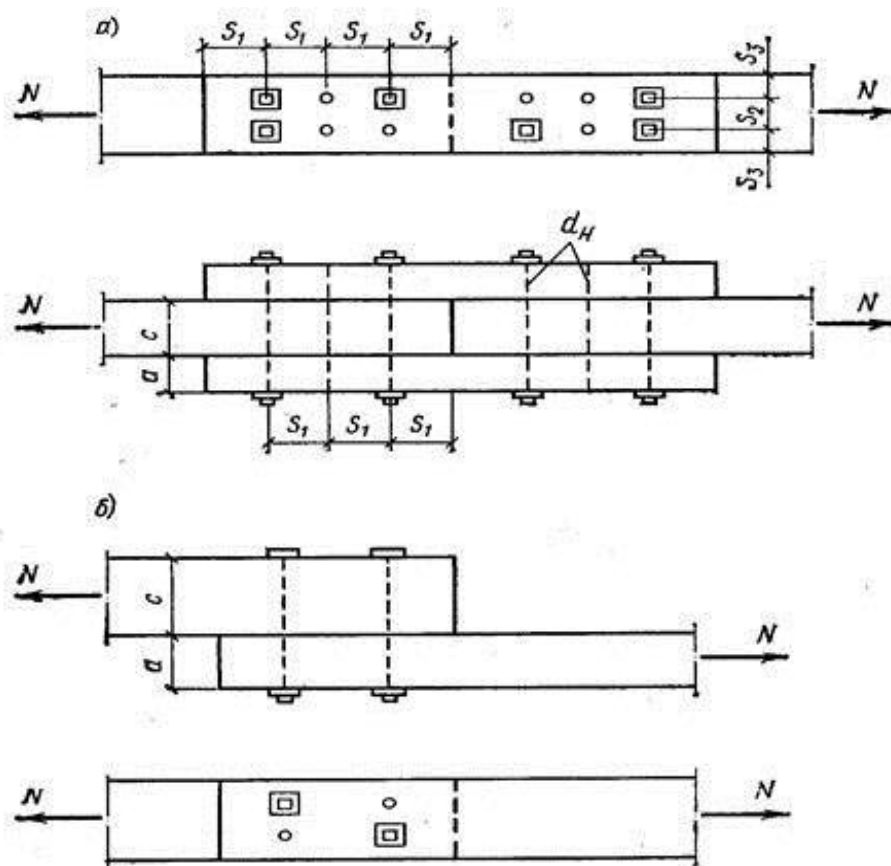


Рис. 1.10. Соединения на цилиндрических нагелях деревянных элементов: а – симметричное двухсрезное; б – несимметричное односрезное

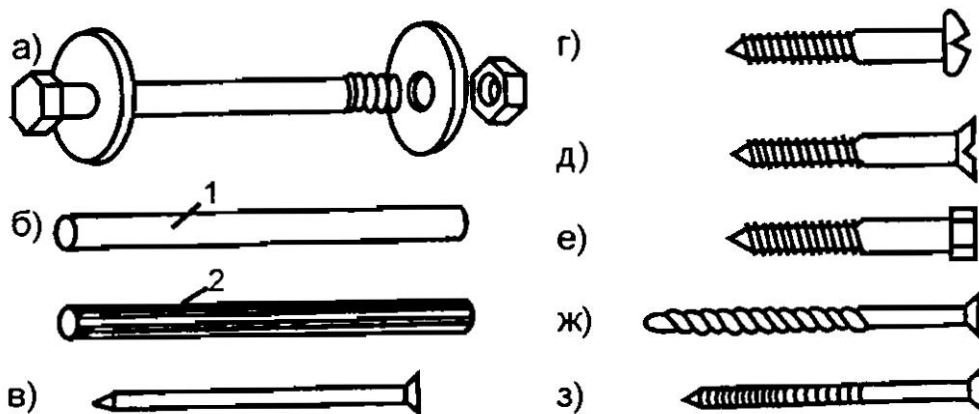


Рис. 1.11. Основные виды цилиндрических нагелей: а – болт с гайкой и круглой шайбой); б – стальной нагель (1) и нагель из твердых пород древесины или стеклопластика (2); в – гвоздь; г – шуруп с полузакругленной головкой; д – шуруп; е – глухарь; ж, з – особые виды гвоздей с профильной поверхностью

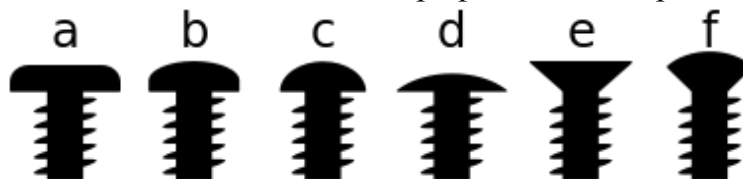


Рис. 1.12. Формы головок винта: а – плоская; б – выпуклая; с – круглая; д – грибовидная; е – потайная; ф – полупотайная

Шуруп (от нем. «*Schraube*» – винт) – крепежное изделие в виде стержня с головкой и специальной наружной резьбой, образующей внутреннюю резьбу в отверстии соединяемого предмета. Различают следующие виды головок у шурупа: потайная, полупотайная, полукруглая, шестигранная, квадратная.

Глухарь – крепежное изделие в виде стержня с шестигранной или квадратной головкой и специальной наружной резьбой, образующей внутреннюю резьбу в отверстии соединяемого предмета. Его диаметр в основном 5-16 мм, а длина 25-300 мм. Применяется в тех случаях, когда необходима лучшая передача усилия при закручивании, чем у шурупа. Закручивается гаечным ключом или гайковертом в предварительно просверленное отверстие. На глухаре имеется головка, сразу за ней идет небольшой участок гладкой поверхности, а затем участок с резьбой, переходящий в заостренный конец.

Саморез (самонарезающий винт) – крепежное изделие в виде стержня с головкой и специальной наружной резьбой, образующей внутреннюю резьбу в отверстии соединяемого предмета. Имеет треугольную резьбу на цилиндрической поверхности, полностью закрывающую цилиндрическую поверхность в отличие от шурупов и винтов, у которых треугольная резьба не полностью закрывает цилиндрическую поверхность. Головка у саморезов может быть потайная, полупотайная, полукруглая, полукруглая с пресс-шайбой, усеченная, шестигранная, цилиндрическая.

Нагель – гибкий стержень или пластина из стали, пластмассы или древесины твердых пород (дуба или антисептированной березы), которым соединяют элементы деревянных зданий (например, для сборки домов и бань из дерева, бруса, бревна). Стальной нагель может быть сплошного или трубчатого сечения.

Для конструкций, подверженных действию агрессивных сред, в которых использование стальных нагелей недопустимо, применяют нагели из высокопрочных пластиков (стеклопластики АГ-4С, АГ-4В, древеснослоистые пластики, текстолиты). Стеклопластиковые нагели изготавливают методом горячего прессования, а нагели из древеснослоистых пластиков и текстолитов вытачивают [19]. Стеклопластиковые нагели диаметром 12-25 мм выдерживают

нагрузку в соединениях на сдвиг 10...50 кН в зависимости от угла примыкания соединяемых элементов. Стеклопластиковые нагели всех типов устанавливают в предварительно просверленные отверстия.

Основными видами нагелей для соединения элементов деревянных конструкций в настоящее время являются болты и гвозди.

Пластинчатые нагели – нагели, которые представляют из себя вкладыши, вставляемые в гнезда, прорезанные цепнодолбежным станком [20]. Пластинчатые нагеля применяют для соединения нескольких брусьев по высоте (сплачивания). Их применяют также для сплачивания брусьев в составных элементах со строительным подъемом, работающих на изгиб и внецентренное сжатие. Пластинчатые нагеля изготавливаются из твердых пород дерева (дуб, береза, бук). При этом древесина должна быть сухой с влажностью не более 8-10%. Так как влажность сплачиваемых брусьев обычно бывает гораздо больше указанной величины, то нагели через некоторое время увлажняются и разбухают, вследствие чего обеспечивается плотность соединения. Размеры пластинчатых нагелей и гнезд для них, а также расстановку нагелей принимают по нормам. Пластинки, изготовленные из сухой древесины дуба или антисептированной березы, имеют толщину 12 или 16 мм, длину вдоль волокон 54 или 72 мм [19]. Глубина врезки нагеля в брус превышает длину пластинки на 1 мм, но не должна превышать 1/5 высоты бруса в направлении врезки. Направление волокон в пластинках выбирается перпендикулярно плоскости сплачивания деревянных элементов.

Самый известный пример соединения элементов деревянных конструкций с помощью пластинчатых нагелей – это балка инженера Деревягина В.С., разработанная им в 1932 г [150]. Она представляет собой два или три бруса из хвойных пород, связанных пластинчатыми нагелями, которые изготовлены из древесины хвойных пород. Нагели в балке устанавливают по длине, за исключением средней части, в которой сдвигающие усилия сравнительно небольшие. Балки изготавливают из брусьев 1-го сорта с влажностью до 20%. Влажность пластинчатых нагелей для балок должна быть не более 10%. Собирают балки

на специальном приспособлении, состоящим из двух опор, на которых находится вал, вращающийся в двух втулках.

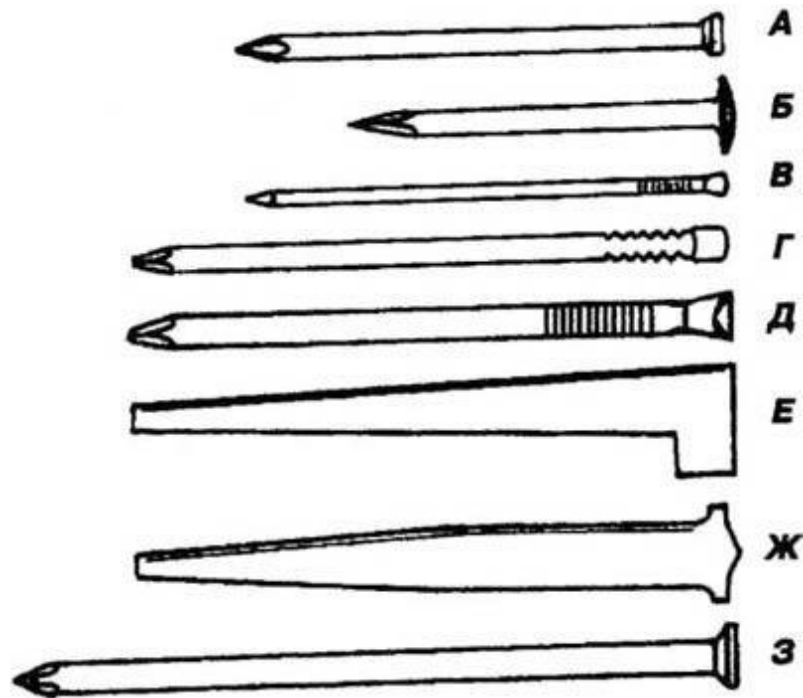


Рис. 1.13. Гвозди, используемые в строительстве: А – круглый гвоздь; Б – с выпуклой шляпкой; В – напольный гвоздь; Г – овальный гвоздь; Д – гвоздь без шляпки; Е – панельный гвоздь; Ж – штукатурный гвоздь; З – настенный гвоздь

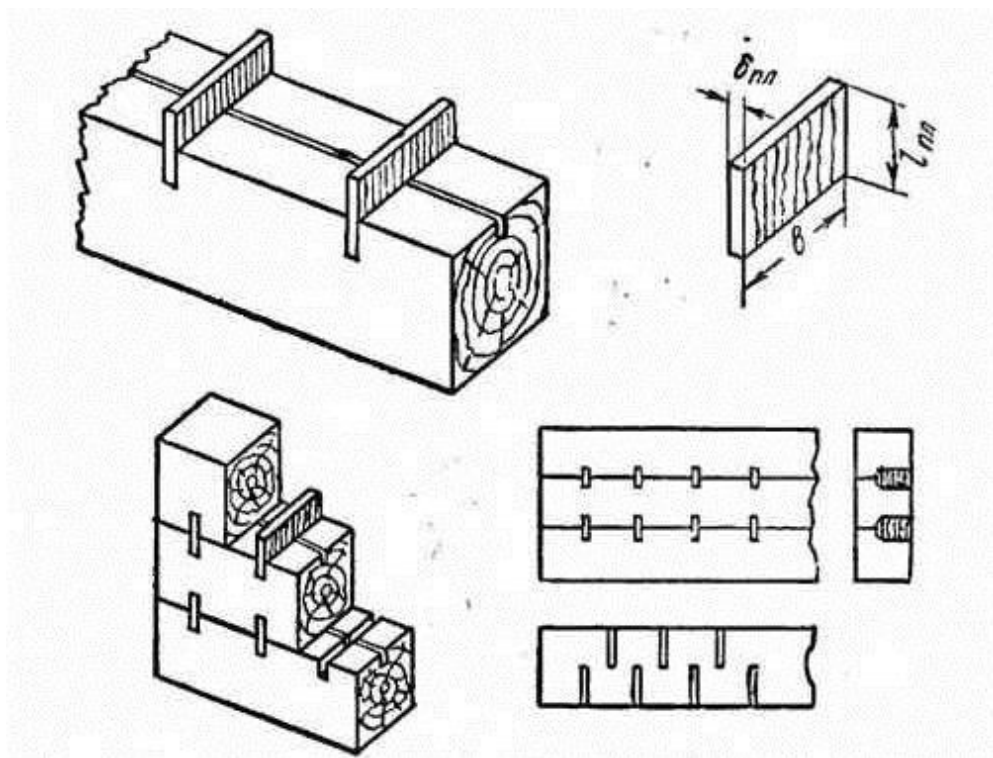


Рис. 1.14. Пластинчатые нагеля

Металлические зубчатые пластины (МЗП) представляют собой, большое количество гвоздей специальной формы, объединенных одной «шляпкой», которая их жестко скрепляет. Они изготавливаются из листовой малоуглеродистой стали марок 08кп и 10кп толщиной от 1...2 мм методом холодной штамповки. В результате штамповки образуется система зубьев, отогнутых относительно поверхности пластины под прямым углом. В МЗП в большей степени, чем в соединениях с помощью нагелей, реализуется принцип дробности. Это связано с тем, что зубья в пластинах имеют небольшую изгибную прочность и расположены относительно друг друга так часто, что древесина работает больше на смятие, чем на скалывание. Другими словами, используется вязкая работа древесины на смятие, прежде чем могло бы произойти хрупкое разрушение от скалывания.

К настоящему времени в разных странах мира разработаны свои виды МЗП («*Gang-Nail*» в США, «*TTS-100*» в ФРГ, «*N*» и «*Torex-81*» в Финляндии, «*MiTek*» в Великобритании, «*Arpad*» в Венгрии, МЗП-1.2 и МЗП-2 в СССР (ЦНИИСК им. Кучеренко), МЗП 1.2×70 фирмы «Металлипресс» в СССР), которые отличаются друг от друга формой зубьев, формой пластины.

Самое известное использование в зарубежной практике – это МЗП системы Ганг-Нейл, разработанные в США в 1955 г., которая насчитывает более 100 типоразмеров и множество видов пластин из высококачественной стали. Главный недостаток всех МЗП системы Ганг-Нейл является то, что работает соединительная пластинка в разных направлениях по-разному, и при нагрузке, действующей по главной оси, прочность шипов на изгиб получается минимальной. Этому недостатка лишена система МЗП типа «*Arpad*» (патент 1998 г., Венгрия) [32]. Главное ее отличие в том, что оси пар шипов, выштампованные в пластине, образуют с направлением основной нагрузки определенный угол, а ряды шипов расположены под углом друг к другу. При таком расположении зубьев при нагружении узла возникает явление заклинивания шипов в древесине, что значительно увеличивает прочность соединения.

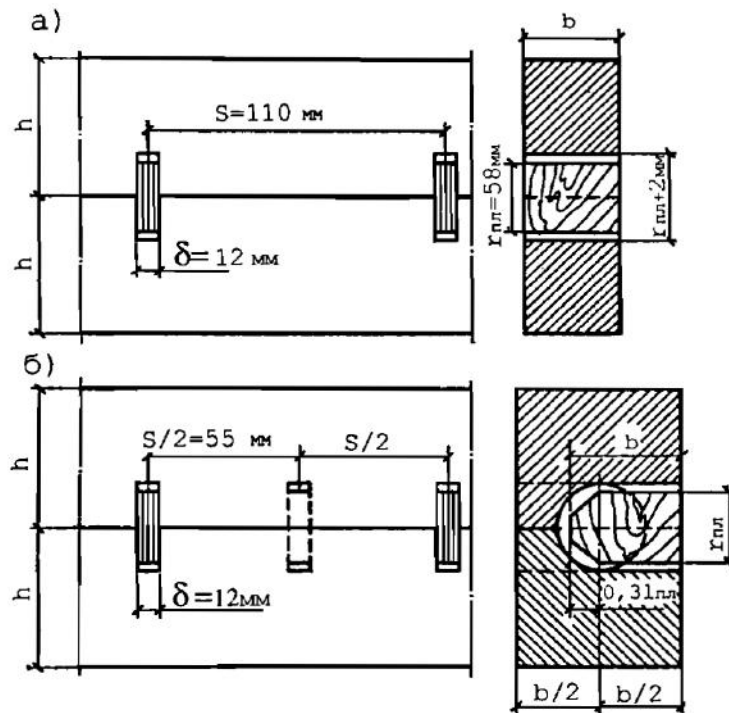


Рис. 1.15. Соединения элементов с помощью пластинчатых нагелей: а – со сквозными пластинками; б – с глухими пластинками

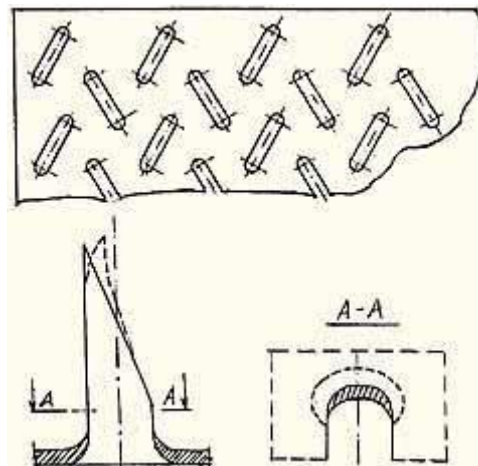


Рис. 1.16. Металлическая зубчатая пластина типа «Arpad»

Гвоздевые пластины (зубчатые пластины) *MiTek* изготавливаются из оцинкованной стали толщиной 1 мм, 1,5 мм, 2 мм и высотой зуба пластины 8 мм, 15 мм и 20 мм соответственно. Наименование этих пластин, следующее: GNA 20 (толщина стали для пластины 1 мм), T150 (толщина стали для пластины 1,5 мм) и M14 (толщина стали для пластины 2 мм).

Известна конструкция МЗП, в которой плоскости зубьев направлены параллельно сторонам и диагоналям квадрата, образуя "елочку" [2]. Ориентация зубьев под углом к главным осям повышает их устойчивость при запрессовке в узлы конструкций.

Помимо пластин с односторонним расположением зубьев находят применение также пластины с двусторонним расположением зубьев. Такие МЗП разработаны в Польше, Финляндии, ФРГ и других странах [35].

В нашей стране применяют соединения на металлических зубчатых пластинах типа МЗП-1.2 и МЗП-2 (в соответствии с толщиной, применяемой стали) [20]. Пластины МЗП-1.2 имеют размеры: длина 160–340 мм и ширина 80...140 мм с длиной зубьев 14,8 мм, а пластины МЗП-2 соответственно: длина 160...400 мм и ширина 80...200 мм с длиной зубьев 23,5 мм.

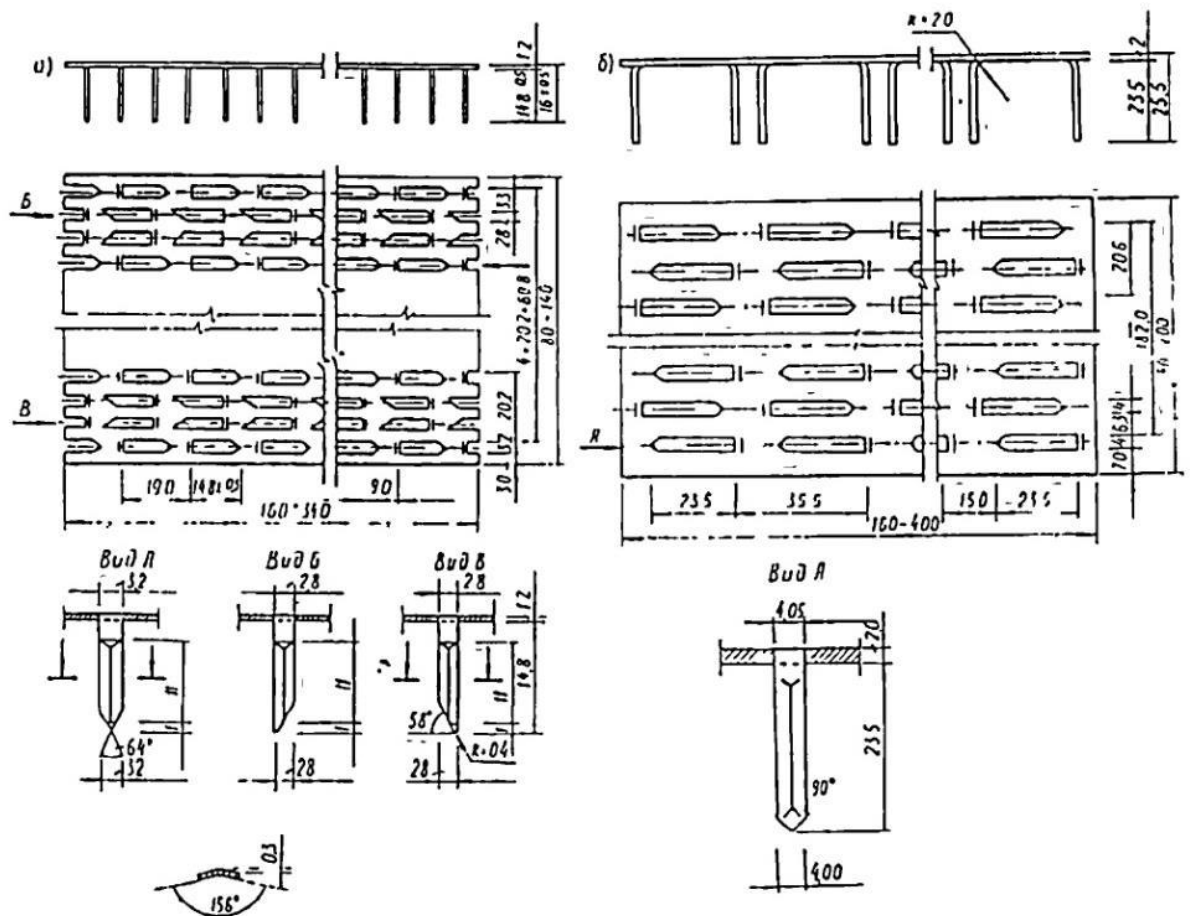


Рис. 1.17. Металлическая зубчатая пластина: а – МЗП-1,2; б – МЗП-2

1.5.2. Особенности расчета напряженного состояния нагельных соединений

Нагельные соединения являются соединениями элементов деревянных конструкций на механических связях и работают на изгиб. В таких соединениях действие распределяется между большим числом податливо вязко работающих нагелей, что значительно повышает надежность.

Рассмотри работу нагельного соединения на примере соединения двух сдвигаемых элементов [21]. После приложения нагрузки элементы начинают

сдвигаться и стремятся опрокинуть нагель, который после некоторого поворота, обусловленного неплотностями и обмятием древесины, упирается в нее и начинает сминать по краям гнезда. При изгибе нагеля увеличивается поверхность его контакта с древесиной, что вызывает появление в ней неравномерный напряжений смятия по всей длине нагеля.

Напряжения смятия древесины нагелем имеют разные знаки и их равнодействующие образуют две пары взаимно уравновешенных продольных сил, которые препятствуют повороту нагеля. По условию равновесия нагеля моменты этих пар равны:

$$T_1 \cdot e_1 = T_2 \cdot e_2, \quad (1.3)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{e_2}{e_1}. \quad (1.4)$$

Получается, что равновесие нагеля обеспечивается только продольными силами, параллельными направлению сдвига соединяемых элементов.

Изгиб нагеля зависит от жесткости самого нагеля и смятия древесины нагельного гнезда. Расчетная схема нагеля - балка, лежащая на сплошном упругопластическом основании (древесине нагельного гнезда). Напряжения смятия по длине нагеля неравномерны и увеличиваются при уменьшении жесткости нагеля. Кроме этого, наблюдается неравномерность распределения сминающих напряжений по контуру нагельного соединения.

Равнодействующие радиальных напряжений направлены под углом к этой оси. Если их разложить, то получаются две составляющие – продольная T и поперечная Q . Продольная составляющая вызывает появление напряжений скалывания по площадкам $a-a$ и $a'-a'$. Поперечная составляющая $Q=Q_B+Q_H$ стремится расколотить деревянный элемент по линии $b-b$. Напряженно-деформированное состояние нагельного соединения в целом при этом характеризуется изгибом самого нагеля, смятием древесины нагельного гнезда, скалыванием древесины между нагелями, раскалыванием древесины поперек волокон.

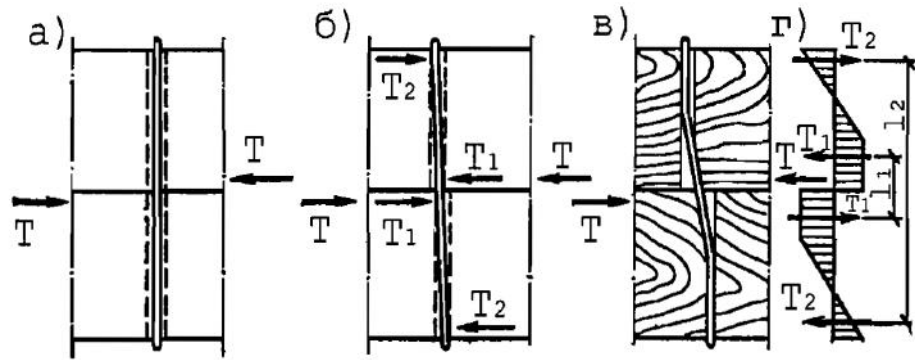


Рис. 1.18. Схема работы нагеля: а – исходное положение; б – поворот нагеля; в – деформированный нагель; г – эпюры сминающих упругопластических напряжений древесины; T – сдвигающие усилия; T_1 и T_2 – равнодействующие сминающих напряжений древесины

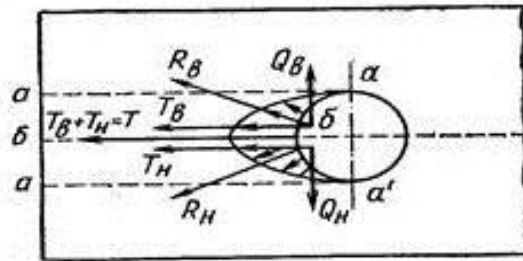


Рис. 1.19. Эпюры радиальных напряжений смятия древесины в месте нагельного соединения [30]

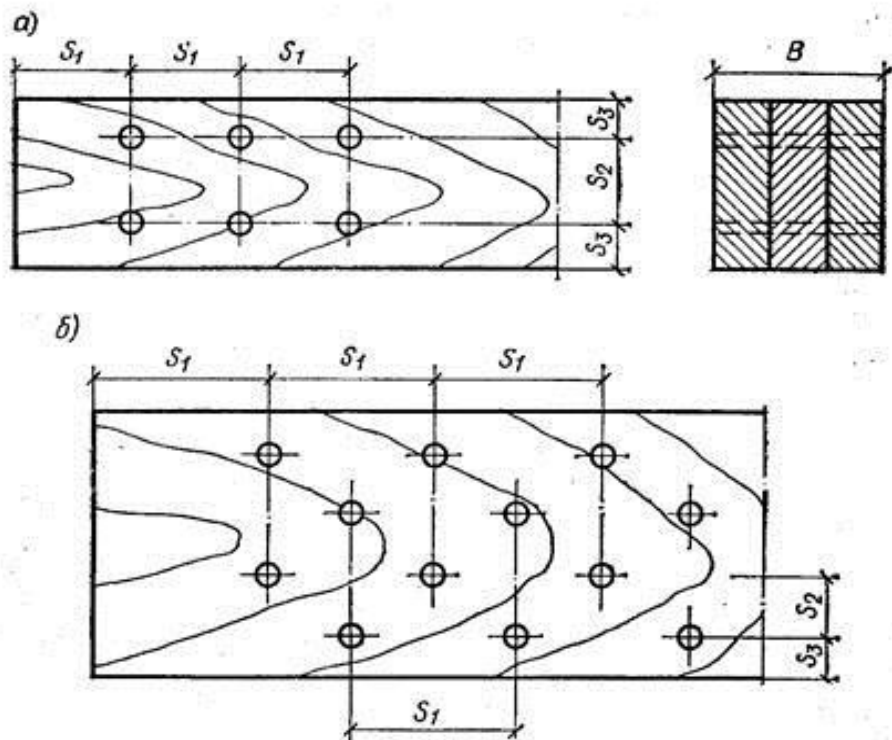


Рис. 1.20. Расстановка нагелей: а – в прямом порядке; б – в шахматном порядке

Опасность скалывания и раскалывания древесины устраняется правильной расстановкой нагелей по конструктивным требованиям. Минимальные расстояния между нагелями и между нагелем и краем соединяемого элемента назначаются так, чтобы разрушение древесины в зоне скалывания и раскалывания заведомо не могло реализоваться, иначе наступит исчерпание несущей способности по смятию или изгибу нагеля [31]. Данные расстояния определяются видом нагелей и толщиной соединяемых элементов. Расстановка нагелей в соединениях может быть прямой или в шахматном порядке. В [18] приведены минимальные расстояния между осями цилиндрических нагелей вдоль и поперек волокон древесины.

Таким образом, несущая способность нагеля на один условный шов сплачивания (условный срез) элементов определяется из условия смятия древесины и изгиба самого нагеля. Для этого необходимо знать диаметр и материал нагеля, толщины соединяемых элементов, направления действия усилия нагеля по отношению к волокнам древесины, а также расчетную схему соединения. По последнему признаку различают симметричные (двухсрезные, многосрезные) и несимметричные (односрезные, многосрезные) нагельные соединения [18].

Как уже отмечалось, при расчетах на несущую способность нагель рассматривают как балку, лежащую на упругом или упругопластическом основании, за которое принимают древесину соединяемых элементов [21]. В основу расчета могут быть положены различные теоретические предпосылки, характеризующие само основание, режимы нагружения, особенности деформирования во времени и другие факторы.

Одним из наиболее применяемых методов определения несущей способности нагеля является экспериментально-теоретический метод [25,71]. В этом случае эпюры напряжения смятия задают по толщине элемента. Нагель рассматривают в виде стержня, работающего в упругопластической среде, а соединения расчленяются на три основные схемы: несимметричная односрезная схема нагельного соединения; несимметричная двухсрезная; симметричная двухсрезная. Все они могут быть выражены через обобщенную схему нагельного соединения.

Во время разработки этого метода его автор Коченов В.М., для упрощения расчета, принял допущений [4]:

- при смятии древесины и изгибе деформирование нагеля происходит как идеального упругопластического материала;
- в пределах пластического участка напряжения остаются постоянными, равными для древесины расчетному сопротивлению смятия, а для нагеля расчетному сопротивлению изгиба;
- несущая способность нагеля определяется расчетной предельной деформацией;
- расчетную предельную деформацию ограничивают отношением полной деформации к упругой, которое принимают равным 2;
- ось нагеля принимают прямолинейной до образования в нем пластического шарнира.

В результате решения теоретической задачи получена в общем виде формула для определения несущей способности одного среза нагеля из условия работы его на изгиб для симметричного соединения:

$$T_u = k_u d_n^2 \sqrt{R_u R_{cm}} \quad (1.5)$$

Для соединений с разной толщиной элементов формула для определения несущей способности по изгибу нагеля имеет вид:

$$T_u = k_u d_n^2 \sqrt{R_u R_{cm}} + k_3 a \quad (1.6)$$

Формулы несущей способности T_{cm}^a одного среза нагеля из условия смятия древесины соответственно имеют вид:

$$\text{- для крайних элементов } T_{cm}^a = k a d_n R_{cm}; \quad (1.7)$$

$$\text{- для среднего элемента } T_{cm}^a = k_2 c d_n R_{cm}. \quad (1.8)$$

Расчетная несущая способность дубового или березового пластинчатого нагеля стандартного размера в соединениях из сосны и ели согласно [18] равна

$$T = 0,75 \cdot b_{пл}, \quad (1.9)$$

где $b_{пл}$ - ширина пластинчатого нагеля, см.

При использовании другого материала для пластинчатых нагелей расчетную несущую способность следует корректировать поправочным коэффициентом.

1.6. Явления тепломассопереноса в древесине нагельных соединений

Насущные требования повышенной комфортности, большой спрос на экологически чистые материалы, технико-экономические преимущества и другие факторы способствуют увеличению спроса на рынке недвижимости строительных сооружений, выполненных из цельной древесины. Но применение цельной древесины ограничено размерами сортамента лесоматериала как по длине, так и по размерам поперечного сечения. Поэтому для получения более крупных конструкций, выходящих за пределы сортамента, применяются различные виды соединений элементов деревянных конструкций – сращивание, сплачивание, узловые соединения. Все они осуществляются с помощью вспомогательных элементов – врубок, шпонок, колодок, хомутов, тяжей, нагелей, гвоздей, болтов, клея.

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 процессы, непрерывно происходящие в древесине, связанные с ее строением. Утром воздушная среда нагревается от солнечных лучей, при этом нагревается и система металл-древесина. Ввиду разницы в структурах материалов древесины и металла, влекущим за собой большую разницу в их теплофизических характеристиках, прогрев слоев древесины происходит значительно медленнее нагрева металла. Затем температура окружающей среды достигает максимума и начинается процесс охлаждения воздуха. При этом вследствие теплообмена будет понижаться и температура металла.

Для древесины этот процесс будет происходить менее интенсивно и неравномерно из-за ее анизотропии [15]. В определенный момент времени температура воздушной среды вокруг металла станет равна температуре точки росы, поэтому дальнейшее охлаждение будет сопровождаться выпадением влаги в виде росы и инея. Причиной конденсации является наличие в воздухе достаточного количества водяных поров и происходящий процесс перепада темпера-

тур. При соприкосновении металла с древесиной происходит их взаимодействие, в результате чего древесина увлажняется.

Описанный выше процесс имеет циклический характер. При постоянном воздействии влаги происходит гниение, а, следовательно, разрушение древесины, в нагельном соединении начинается разбалтывание и со временем конструкция начинает провисать. Значительный прогиб конструкции характеризует наступление предельного состояния второй группы, при котором дальнейшая эксплуатация становится опасной.

1.6.1. Перенос теплоты посредством теплопроводности

Теплопроводность – процесс переноса теплоты посредством обмена энергией при хаотическом тепловом движении микрочастиц (в частности, молекул вещества) в среде, обусловленный неоднородным распределением температуры в этой среде [126].

Основной задачей теплопроводности является определение и изучение пространственно-временного изменения температурного поля среды (тела). Температурное поле описывает совокупность значений температуры во всех точках пространства в данный момент времени.

Точки температурного поля, имеющие одинаковую температуру, образуют некую поверхность, называемую изотермической:

$$t = f(x, y, z). \quad (1.10)$$

Данное уравнение описывает трехмерное стационарное температурное поле. Если оно будет зависеть еще и от времени, то будет называться уже нестационарным и приобретет следующий вид:

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1.11)$$

В двумерной системе координат линию равных температур называют изотермой. Перепад температур в направлении нормали к изотермической поверхности определяет величину градиента температуры. Точнее, градиентом температуры является отношение приращения температуры к расстоянию между изотермами по нормали. За положительное направление вектора-градиента принимается направление в сторону возрастания температуры

$$\text{grad } t = \frac{dt}{dl} \cdot \vec{n}, \quad (1.12)$$

где \vec{n} - единичный вектор, направленный по нормали в сторону возрастания температуры, l – обобщенная координата.

Перенос теплоты теплопроводностью может происходить только при условии, что в различных точках тела температурное поле неоднородно, то есть существует определенный ненулевой градиент температуры. Согласно предположению Фурье, теплота движется в направлении противоположном градиенту потенциала переноса, а количество переносимой теплоты пропорционально этому градиенту. Поэтому плотность потока теплоты (или удельного теплового потока) q , переносимой посредством теплопроводности, пропорциональная градиенту температур:

$$q = -\lambda \text{ grad } t, \quad (1.13)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Дж/(с·м·К).

Выражение (1.13) является основой для вывода дифференциального уравнения температурного поля – закона теплопроводности Фурье, знак «минус» в котором показывает, что направление теплового потока противоположно направлению градиента температуры.

Вывод дифференциального уравнения теплопроводности осуществляется из баланса тепла для единицы объема тела с учетом всех его составляющих и градиентного закона переноса тепла Фурье и представлен в [156]. В окончательном виде дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности действующим источником теплоты выглядит так:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (c_p t \rho) = \text{div} (\lambda \text{ grad } t) + q_{VT}, \quad (1.14)$$

где c_p - теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ - плотность, кг/м³; q_{VT} - мощность внутреннего объемного источника теплоты в объеме V вследствие химических или фазовых превращений, Дж/(с·м³).

В уравнении (1.14) величины $c_p, \lambda, \rho, q_{VT}$ в общем случае являются функциями координат x, y, z и температуры t , т.е. данное уравнение нелинейно. Ес-

ли же считать свойства среды практически неизменяемыми, то уравнение упрощается и примет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_{VT}}{c_p \rho} \quad (1.15)$$

где $a = \lambda / (c_p \rho)$ - коэффициент температуропроводности, м²/с; $\nabla^2 T$ - оператор Лапласа.

Если источников или стоков тепла в среде нет, то мощность внутренних объемных источников $q_{VT} = 0$. Тогда уравнение (1.15) примет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (1.16)$$

Выражение (1.16) называется дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье, представленное в частных производных второго порядка параболического типа. Оно устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке неподвижной среды.

1.6.2. Массопроводность (диффузия в твердом теле)

Массопроводность – процесс переноса массы вещества от тел с большим массосодержанием к телам с меньшим содержанием переносимого вещества [126,133].

Поле массосодержаний – это совокупность значений влагосодержаний для всех точек пространства в данный момент времени. Если эта совокупность не зависит от времени и принимает одно и то же значение, то она может быть описана изоповерхностью. Поверхность постоянных массосодержаний (трехмерное стационарное поле массосодержаний) математически можно записать в следующем виде:

$$u = \varphi(x, y, z) \quad (1.17)$$

Плотность потока массы переносимого компонента определяется уравнением Фика [133]:

$$i = -D \text{grad } c \quad (1.18)$$

где i - плотность потока массы вещества, кг/(м²·с); D - коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; c - концентрация диффундирующего вещества в теле, кг/м³.

Плотность потока вещества в твердом теле посредством массопроводности:

$$i = -k \operatorname{grad} u \quad (1.19)$$

где k - коэффициент массопроводности, м²/с; u - массосодержание, кг/м³.

Видно, что градиентные уравнения Фика (1.18, 1.19) и уравнение Фурье (1.16) аналогичны по форме, поэтому дифференциальное уравнение диффузии выводится аналогично дифференциальному уравнению теплопроводности. Соответственно дифференциальное уравнение диффузии в частных производных имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\operatorname{div} i + q_{VM} \quad (1.20)$$

где q_{VM} - интенсивность внутренних источников или стоков вещества в неподвижной среде, кг/(с·м³).

Используя закон Фика (1.18), получают дифференциальное уравнение молекулярной диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} c) + q_{VM} \quad (1.21)$$

В уравнении (1.21) величины D, c, q_{VM} в общем случае являются функциями координат x, y, z и температуры t , т.е. данное уравнение нелинейно. Если же считать свойства среды практически неизменяемыми, то уравнение упростится и примет следующий вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \nabla^2 c + q_{VM} \quad (1.22)$$

Если допустить отсутствие источника массы, то получим классическую запись дифференциального уравнения молекулярной диффузии (второй закон Фика):

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \nabla^2 c \quad (1.23)$$

1.6.3. Начальные и граничные условия к задачам переноса теплоты и массы вещества [133,156]

Дифференциальные уравнения тепло- и массопроводности в общем случае имеют бесконечное множество решений. Для того чтобы получить единственное решение, характеризующее конкретный процесс, необходимо дать замкнутое описание конкретного процесса. Для этого дифференциальное уравнение в общем виде дополняется: уравнениями состояния, уравнениями неразрывности, условиями в начальный момент времени, условиями на границах тела, данными о геометрии, а иногда и другими сведениями, позволяющими решить уравнения. Чаще всего достаточно поставить краевые условия – совокупность начальных и граничных условий.

Начальные условия характеризуют значения полей температур или концентраций в момент времени, принимаемый за начало отсчета. Для нестационарного температурного поля начальные условия имеют следующий вид [133,156]:

$$t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x, y, z). \quad (1.24)$$

Запишем начальные условия для нестационарного поля влагосодержаний:

$$u(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x, y, z). \quad (1.25)$$

Граничные условия характеризуют значения потенциалов переноса на границах рассматриваемой области в любой момент времени. Кроме того, они отражают условия взаимодействия на границе рассматриваемой среды с другими средами. Простейшими и наиболее распространенными на практике являются граничные условия 1, 2, 3, 4 рода.

Граничное условие первого рода (условие Дирихле) является заданием потенциала переноса (температуры, влагосодержаний) на границе рассматриваемой области в любой момент времени:

$$t(x, y, z, \tau)|_S = t_0(x, y, z, \tau), \quad (1.26)$$

$$u(x, y, z, \tau)|_S = u_0(x, y, z, \tau), \quad (1.27)$$

где S - поверхность, ограничивающая рассматриваемую область V , на которой задано соответственно поле температур в уравнении (1.26) и поле массосодержаний в уравнении (1.27).

Граничное условие второго рода (условие Неймана) задает распределение плотности теплового потока на поверхности тела как функция координат и/или времени:

$$q_{нов} = f(x, y, z, \tau)|_S. \quad (1.28)$$

Если на границе рассматриваемой среды и окружающей происходит конвективный перенос теплоты или массы вещества, то это характерно для граничных условий третьего рода (условиями Ньютона):

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_S = \alpha (t_S - t_{cp}), \quad (1.29)$$

где α - коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к рассматриваемой поверхности или в обратном направлении, Дж/(с·м²·К); t_S - температура на поверхности S ; t_{cp} - средняя температура окружающей среды.

Часто граничные условия третьего рода используются как универсальные, т.к. ими можно имитировать и другие граничные условия.

Для диффузии на поверхности тела задают аналогичные условия массоотдачи:

$$-D \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_S = \beta (u_S - u_{cp}), \quad (1.30)$$

где β - коэффициент массоотдачи, м/с.

Граничные условия четвертого рода возникают при рассмотрении процессов переноса в составных телах или средах. Они соответствуют теплообмену поверхности рассматриваемого тела с поверхностью другого тела. Поэтому их иногда называют еще стыковыми условиями или условиями сопряжения. Условия этого типа состоят в равенстве потенциалов и потоков переноса на разграничивающих поверхностях:

$$t_1(x, y, z, \tau)|_{x,y,z=S1} = t_2(x, y, z, \tau)|_{x,y,z=S2}, \quad (1.31)$$

$$u_1(x, y, z, \tau)|_{x,y,z=S1} = u_2(x, y, z, \tau)|_{x,y,z=S2}, \quad (1.32)$$

Дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса совместно с начальными и граничными условиями дает полную математическую формулировку соответствующих краевых задач, решение которой может быть выполнено аналитическим, численным или экспериментальным методом.

1.6.4. Элементы теории взаимосвязанного тепломассопереноса

В соответствии с теорией тепломассопереноса может быть записана следующая система дифференциальных уравнений нестационарного переноса теплоты и массы вещества (в частности, влаги) [125]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) + \varepsilon \cdot \frac{r^*}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) + \operatorname{div}(k \delta_T \operatorname{grad}(t)) + \operatorname{div}(k \delta_p \operatorname{grad}(p)) \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= \operatorname{div}\left(\frac{\rho_0}{c^*} k \delta_p \operatorname{grad}(p) - \frac{\varepsilon \rho_0}{c^*} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}\right) \end{aligned} \right\}. \quad (1.33)$$

Здесь: a, k - коэффициенты тепло- и влагопроводности древесины; δ_T, δ_p - коэффициенты термо- и бародиффузии, характеризующие влияние градиентов влагосодержания и давления на теплоперенос; c, ρ_0 - теплоемкость и плотность древесины; ε - критерий фазового превращения, показывающий долю влаги, перемещающейся в материале в виде пара; r^* - скрытая теплота парообразования.

Первое уравнение (дифференциальное уравнение теплопроводности) показывает, что поле температур в древесине определяется тепло- и теплопроводностью 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° 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):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) \end{aligned} \right\} \quad (1.34)$$

1.6.5. Особенности зонального метода и метода «микропроцессов»

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.

Все способы решений можно разделить на аналитические и численные [141] методы. Аналитические методы решений делятся на точные и приближенные. Численные методы всегда дают приближенные решения. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Причем, как правило, преимуществу одного метода соответствует недостаток второго. Например, численные методы позволяют решать сложные краевые задачи, решение которых аналитически либо невозможно, либо сопряжено с большими трудностями. Аналитические методы, представляющие решение в виде функции, позволяют анализировать влияние исходных параметров на результат решения, что трудно выполнить при численных методах. Реализация всех видов решений – всегда численная и приближенная. Для этого используется ручной счет, расчеты на калькуляторах, а чаще всего в настоящее время – компьютерные расчеты. Использование ЭВМ позволяет свести нелинейную задачу к линейной. Для решения нелинейных краевых задач теплопереноса можно использовать метод «микропроцессов» [131], который сочетает в себе преимущества аналитических и численных методов математического анализа. Согласно данному методу весь процесс разделяется на n элементарных «микропроцессов», в пределах каждого из которых теплофизические параметры фаз могут считаться постоянными, но скачкообразно изменяющимися при переходе от предыдущего «микропроцесса» к последующему. Особенно важным является то обстоятельство, что конеч-

ное распределение температур и влагосодержаний, полученное на предыдущем шаге расчета, будет выбрано в качестве начального условия для расчетов на последующем этапе.

Вначале находится аналитическое решение для каждого «микропроцесса», а затем весь процесс поэтапно просчитываем на ЭВМ. Данный комбинированный подход более эффективен по сравнению с непосредственным численным решением нелинейной задачи. Однако необходимо отметить, что этот метод дает хорошие результаты только в случае, если численное решение осуществляется в совокупности с методом интегрального преобразования Лапласа. Аналитическое решение, полученное любым другим способом, часто оказывается неприемлемым для использования в комбинированном методе вследствие низкой точности получаемых результатов. Дело в том, что в области больших чисел достаточно точные результаты получаются при использовании всего лишь одного, первого члена ряда. С уменьшением числа Фурье, а значит и времени процесса, число членов ряда, которое надо учитывать для обеспечения заданной точности расчетов, резко возрастает. Соответственно возрастает и время для компьютерной обработки данных, что особенно важно в тех случаях, когда весь анализируемый процесс разбивается на достаточно большое количество «микропроцессов», для каждого из которых выполняется условие $Fo \ll 0,1$. Все аналитические методы позволяют получать достаточно точные решения при $Fo > 0,1$ и лишь преобразование Лапласа дает возможность получить решения, точность которых возрастает с уменьшением числа Фурье.

1.7. Постановка задач теоретического и экспериментального исследования

Выполненный анализ научно-технической и патентной литературы показал:

1. Современные знания, накопленные в научной и инженерной практике по проблемам конструирования, расчета и безопасной длительной эксплуатации нагельных соединений элементов изделий и строительных конструкций достаточно масштабно представлены как в отечественной, так и зарубежной литературе.

2. 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 факторами: температурой и влажностью среды эксплуатации.

3. Однако, изменение температурно-влажностных параметров происходит не само по себе, а только в результате явлений тепломассопереноса в неподвижных и движущихся средах, а также вследствие сопровождающих их фазовых или химических превращений.

4. В связи с изложенным актуальной задачей теоретического исследования является синтез физических и математических моделей тепломассопереноса в древесине нагельных соединений при циклических изменениях тепловлажностных параметров среды эксплуатации.

5. Создание на этой основе инженерной методики расчета и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения.

6. В области экспериментальной: исследование процессов тепло- и массопереноса с помощью современной экспериментальной техники; проверка адекватности расчетных методик в реальных условиях эксплуатации, а также внедрение разработанных рекомендаций для проектирования деревянных строительных конструкций.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Используемые материалы

Древесина. Исследования проводились на образцах из сосны. Выбор этой породы древесины обусловлен широким использованием изделий из нее в строительстве и отделке. Физико-механические и технические свойства древесной породы соответствуют СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции» и представлены в таблице 2.1 и таблице 2.2 (приложение 1). Химический состав исследуемых пород древесины приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.1. - Технические характеристики древесины

Вид древесины	Твердость, кг/см ²	Средняя плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, кДж/кг·°С	Теплопроводность, Вт/К·м	Водопоглощение, %	
					Тангенциальное	Радиальное
Сосна	260	520	2,51	0,139	0,28	0,13

Таблица 2.2. Физико-механические свойства древесины

Вид древесины	Предел прочности, МПа, вдоль волокон при				Ударная вязкость, кДж/м ²	Модуль упругости, ГПа
	растяжении	сжатии	скалывании радиальном	статическом изгибе		
Сосна	103,5	64,5	9,9	79	42	12,5

Таблица 2.3. - Химический состав сосны, %

Целлюлоза	Лигнин	Пентозаны	Гексозаны	Зола	Растворимые вещества	
					В эфире	В воде
48,5	25,8	8,7	10,1	0,2	4,1	2,6

Нагельное соединение. В качестве нагеля используется болт стальной М16 (ГОСТ 7798-70 «Болты с шестигранной головкой класса точности В. Конструк-

ция и размеры») из нержавеющей стали марки А2 (ГОСТ Р ИСО 3506-1-2009 «Механические свойства крепежных изделий из коррозионностойкой нержавеющей стали. Часть 1. Болты, винты и шпильки»), химический состав которой представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4. - Химический состав нержавеющей стали марки А2, %

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>
0,1	1	2	0,05	0,03	15...20	8...19	4	54...70

В таблице 2.5 приведены физико-механические свойства нержавеющей стали марки А2.

Таблица 2.5. Физико-механические свойства нержавеющей стали марки А2

Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент термического расширения, $\alpha, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, при температуре			Теплопроводность при 100 °С, Вт/К·м	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К
		20-100 °С	20-200 °С	20-300 °С		
7900	193	17,2	17,8	18,4	16,2	500

Вода. В качестве растворителя для приготовления растворов для лабораторных исследований используется дистиллированная вода, соответствующая требованиям ГОСТ 6709-72 «Вода дистиллированная. Технические условия» (Приложение 1), не содержит пленок нефтепродуктов, жиров, масел. Водородный показатель воды – рН = 5,5.

Сведения о составе и количестве примесей, содержащихся в дистиллированной воде, приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Содержание примесей в дистиллированной воде

Содержание примесей, мг/л, не более												
Сухой остаток после выпаривания	Сухой остаток после прокаливании	Аммиак и соли аммония	Нитраты	Хлориды	Сульфаты	Zn	Al	Fe	Ca	Cu	Pb	Вещества, окисляемые KMnO_4
5	1	0,02	0,20	0,02	0,50	0,20	0,05	0,05	0,80	0,02	0,05	0,08

Растворы. Растворы H_2SO_4 готовили из реактивов марки «х.ч.» и дистиллированной воды. Выбор кислоты и концентраций растворов не случаен, так как H_2SO_4 относится к кислотам, оказывающим агрессивное воздействие на древесину (СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии»).

Основные характеристики используемых растворов серной кислоты указаны в таблице 2.7.

Таблица 2.7. - Основные характеристики растворов серной кислоты

Водная среда (t = 20 °С)	Концентрация растворенного вещества, %	pH	Плотность, кг/м ³
1 %-й раствор	1	3,99	1005,1
10 %-й раствор	10	2,96	1066,1
50 %-й раствор	50	2,15	1395,1
100 %-й раствор	100	1,73	1830,5

2.2. Краткое описание применяемых экспериментальных методик

Экспериментальные исследования проводились с целью изучения структуры, состава и свойств исследуемых материалов (твердой и жидкой фазы) до и после воздействия агрессивных сред.

Для этой цели использовались методы химического и физико-химического анализа: определение концентрации кислоты проводилось методом прямого титрования, влажность древесины определялась с помощью электровлажгомера и весовым методом, плотность растворов серной кислоты измерялась при помощи ареометров, процессы теплопереноса исследовались с применением тепловизора.

2.2.1. Определение влажности древесины

2.2.1.1. Весовой метод

Определение влажности древесины проводится согласно ГОСТ 16483.7-71 «Древесина. Методы определения влажности». При технических определениях

берут образец и взвешивают его с точностью до 0,01 г, а влажность определяют с точностью до 1%. Образец вырезают из доски или бруска, отступая от торца на расстояние не менее 0,5 м и захватывая по возможности всё сечение. Высушивают образец в сушильном шкафу при температуре 100-105 °С до постоянного веса, который устанавливается путем нескольких контрольных взвешиваний с интервалом в 2 часа. Разность между результатами двух последних взвешиваний должна быть не более 0,01 г.

Весовой метод определения влажности дает довольно высокую точность измерения, но требует вырезывания образцов и затраты весьма длительного времени – от 12 до 24 часов.

Влажность древесины определяется по формуле:

$$W = \frac{P_n - P_c}{P_c} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где W – влажность, %; P_n – начальная масса образца, г; P_c – масса высушенного образца, г.

2.2.1.2. Определение влажности электровлагомером

Электрический метод определения влажности с помощью электровлагомера основан на изменении электропроводимости древесины в зависимости от влажности [10].

Электровлагомер ЦНИИМОД-3 (рис. 2.1) состоит из скобы с двумя вкалываемыми в испытываемую древесину иглами-электродами, измерительного контура, часового механизма со шкалой показаний влажности древесины и источника питания током.

Электровлагомер предназначен для быстрого определения влажности древесины различных пород в пределах от 8 до 30% со средней точностью измерения $\pm 1\%$.

Электрическая цепь прибора состоит из источника постоянного тока, испытываемого образца древесины и конденсатора с параллельно включенной неоновой лампой.

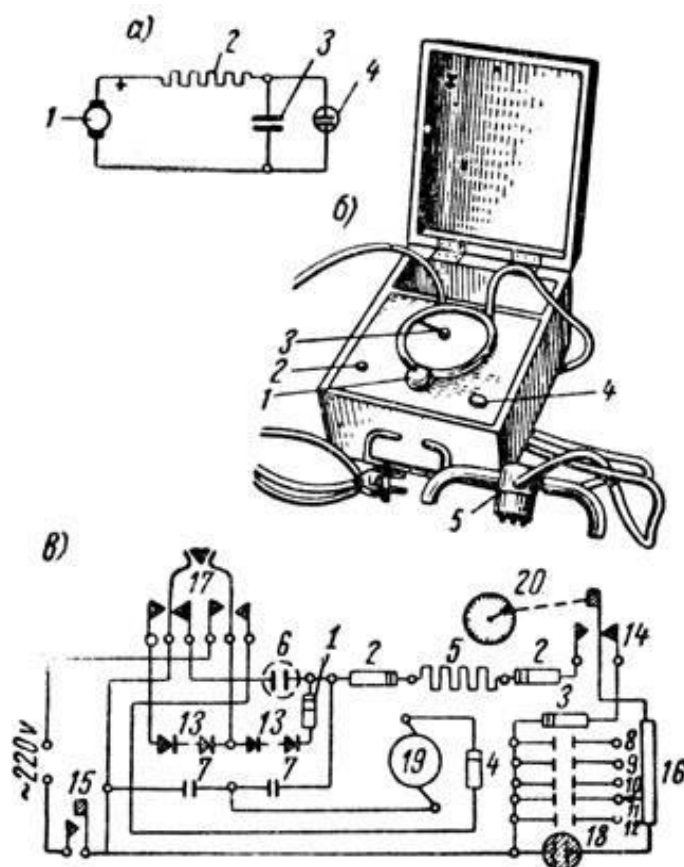


Рис. 2.1. Электровлагомер ЦНИИМОД-3:

- а) схема измерения: 1 – источник постоянного тока; 2 – испытуемый образец древесины; 3 – конденсатор; 4 – неоновая лампа;
- б) общий вид электровлагомера: 1 – диапазонный переключатель; 2 – пусковая кнопка; 3 – стрелка указателя; 4 – лампочка; 5 – скоба с электродами;
- в) схема влагомера: 1 – сопротивление 0,6 кОм; 2 – сопротивление 10 кОм; 3 – сопротивление 0,3 кОм; 4 – сопротивление 100 кОм; 5 – измеряемое сопротивление древесины; 6 – конденсатор электролитический 20 мкФ; 7 – конденсатор 0,5 мкФ; 8 – конденсатор 2000 пФ; 9 – конденсатор 8000 пФ; 10 – конденсатор 0,1 мкФ; 11 – конденсатор 1,4 мкФ; 12 – конденсатор 16 мкФ; 13 – селеновый столбик; 14 – лепестковый контакт с двухсторонним включением; 15 – лепестковый контакт, нормально открытый; 16 – пятидиапазонный переключатель; 17 – переключатель рода работ; 18 – неоновая лампа; 19 – генератор М-1101; 20 – часовой механизм

Электрический ток, проходя через древесину, заряжает конденсатор; когда разность потенциалов на обкладках конденсатора достигает определенной величины, загорается неоновая лампа. Величина электрического сопротивления древесины определяется промежутком времени от момента включения тока до вспышки лампы. С повышением влажности древесины уменьшается электрическое сопротивление, отчего возрастает электрический ток и сокращается время зарядки конденсатора. Часовой механизм для отсчета времени зарядки конденсатора ДО вспышки лампы снабжен диском шкалой с показателями влажности для 5 диапазонов: первый для влажности от 8% и пятый - не выше 30%.

Питание электровлагомера может осуществляться от сети переменного тока через селеновые выпрямители и фильтрующие устройства и от ручного генератора переменного тока (М-1101).

Измерительный контур влагомера, схема которого приведена на рис. 2.1в, состоит из группы конденсаторов, предназначенных для определения влажности различных диапазонов, поочередно подключаемых к неоновой лампе типа МН-7.

Измерение влажности древесины электровлагомером выполняется в следующем порядке [10]: вводят в древесину испытуемого образца иглы (электроды), устанавливают стрелку часового механизма на "нуль", переводят ручку источника питания на положение "генератор" или "сеть", ставят переключатель диапазонов на первый диапазон (или другой, соответствующий предполагаемой влажности), нажимают пусковую кнопку и держат ее до момента вспышки неоновой лампы. Отсутствие вспышки на первом диапазоне указывает на то, что влажность образца ниже 8 %, а вспышки лампы на всех диапазонах, что влажность более 30 %. Время от начала включения до момента вспышки должно составлять 6-8 сек.

Измерения производят при нормальной температуре древесины 20°C. При температуре выше 20°C показания прибора уменьшают на 0,1% на каждый градус сверх 20°C, а при меньшей температуре прибавляют 0,1% на каждый градус ниже 20°C [11].

Для перехода от абсолютной влажности к относительной и обратно можно пользоваться графиком (рис. 2.2) [10].

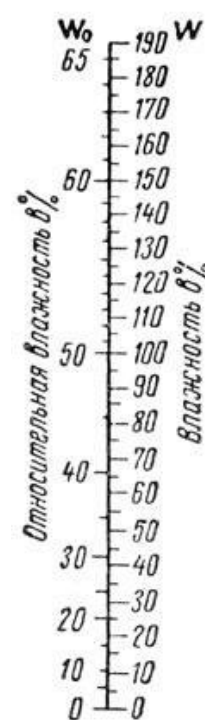


Рис. 2.2. График для определения перехода от абсолютной влажности к относительной

2.2.2. Определение влагопоглощения древесины

Определение влагопоглощения древесины проводится согласно ГОСТ 16483.19-72 «Древесина. Метод определения влагопоглощения». Образцы вы-

сушат в бюксах до абсолютно сухого состояния согласно требованиям ГОСТ 16483.7-71 «Древесина. Методы определения влажности» и взвешивают с погрешностью не более 0,001 г.

На дно эксикаторов наливают растворы серной кислоты различной концентрации. Образцы устанавливают боковой поверхностью на вставку эксикатора так, чтобы они не касались один другого и стенок эксикатора, закрывают крышкой и выдерживают при температуре (20 ± 2) °С. Образцы периодически взвешивают в бюксах с погрешностью не более 0,001 г; первое взвешивание производят через сутки с момента помещения образцов в эксикатор, последующие – через 2, 3, 6, 9, 13, 20 и далее через каждые 10 суток. Минимальная продолжительность выдерживания образцов 30 суток. Испытание заканчивают, когда разность между двумя последними взвешиваниями будет не более 0,002 г.

Количество поглощенной влаги (W) в процентах вычисляют с точностью до 0,1% по формуле:

$$W = \frac{m_n - m_1}{m_1 - m} \cdot 100 \quad (2.2)$$

где: m – масса бюксы, г; m_1 – масса бюксы с образцом в абсолютно сухом состоянии, г; m_n – масса бюксы с образцом, взвешенной через n суток с момента первоначального помещения образца в эксикатор, г.

За показатель влагопоглощения принимают максимальную влажность древесины, выдержанной до прекращения влагопоглощения, но не менее 30 суток.

2.2.3. Определение концентрации раствора кислоты методом прямого титрования

Для определения концентрации раствора кислоты методом прямого титрования отбирают 20 мл раствора, который помещают в колбу. К исследуемому раствору серной кислоты добавляют 2-3 капли индикатора - фенолфталеина. Бюретку заполняют 0,1 н раствором щелочи $NaOH$. Проводят титрование раствора кислоты, добавляя небольшими порциями раствор щелочи в колбу с кис-

лотой. Раствор кислоты при этом непрерывно помешивают. Конец титрования определяют по появлению едва заметной, не исчезающей в течение 30 с, малиновой окраске фенолфталеина. Отмечают конечный уровень титранта в бюретке.

Расчет концентрации исследуемого раствора проводили по формуле:

$$C_1 = \frac{C_2 \cdot V_2}{V_1}, \quad (2.3)$$

где: C_1 и C_2 – нормальные концентрации растворов пробы и титранта, соответственно, моль экв/л; V_1 – отмеренный объем пробы, мл; V_2 – объем титранта, израсходованный на титрование, мл.

Нормальная и процентная концентрации связаны формулой:

$$N = \frac{C \cdot \rho \cdot 10}{\mathcal{E}}, \quad (2.4)$$

где: N – нормальная концентрация раствора, моль-экв/л; \mathcal{E} – эквивалентная масса (для серной кислоты равна 49), г; ρ – плотность раствора, г/см³.

2.2.4. Определение плотности исследуемых растворов

Определение плотности растворов серной кислоты проводили с помощью ареометра.

Ареометр (рис. 2.3) представляет собой узкую стеклянную трубку, расширяющуюся в нижней части и имеющую на конце груз из свинцовой дроби. В узкой части трубки помещается шкала. Причем у ареометров, предназначенных для измерения плотностей жидкости, больших единицы шкала градуируется ниже отметки 1000 кг/м³, которая находится в верхней части прибора. При погружении прибора в жидкость, он всплывает так, что уровень жидкости показывает отметку на шкале прибора, соответствующую измеряемой плотности. При этом необходимо выполнять элементарные правила работы с прибором, чтобы не повредить его и снять правильные показания: придерживая ареометр за верхнюю часть рукой, аккуратно погружают его до дна цилиндра и подливают жидкость до тех пор, пока он не всплывет. Для отсчета по шкале глаз распо-

лагают на уровне поверхности жидкости и замечают соответствующее значение шкалы [12].

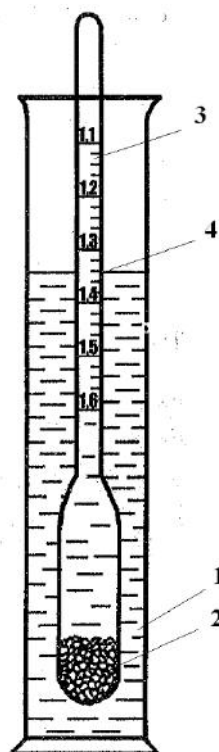


Рис. 2.3. Определение плотности жидкости ареометром (денсиметром):
1 – цилиндр с изучаемой жидкостью; 2 – балласт; 3 – шкала плотности; 4 – уровень жидкости и деление шкалы, соответствующее ее плотности

2.2.5. Исследование процессов теплопереноса в древесине

Кинетику теплопереноса в древесине изучали с помощью тепловизора.

Тепловизор (рис. 2.4) – это устройство, которое получает тепловое изображение в инфракрасной области спектра без прямого контакта с оборудованием.

Тепловизоры предназначены для регистрации инфракрасного излучения, которое испускается объектами. Инфракрасное излучение фокусируется с помощью оптики тепловизора на приемнике излучения, который выдает сигнал, обычно в виде изменения напряжения или электрического сопротивления. Полученный сигнал регистрируется электроникой тепловизионной системы. Сигнал, который дает тепловизор, превращается в электронное изображение (термограмму), которое отображается на экране дисплея. Термограмма – это изображение объекта, обработанное электроникой для отображения на дисплее та-

ким образом, что различные градации цвета соответствуют распределению инфракрасного излучения по поверхности объекта [13].

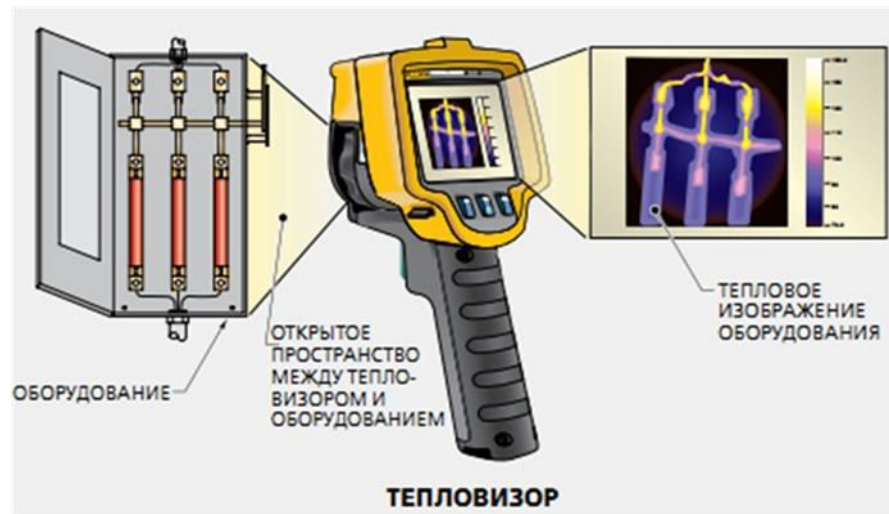


Рис. 2.4. Тепловизор

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ЭЛЕМЕНТАХ НАГЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ НАГЕЛЕМ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫМ В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ

3.1. Физическая картина процессов тепломассопереноса вблизи цилиндрического нагеля при циклическом изменении параметров воздушной среды

В качестве примера рассмотрим взаимодействие нагельного соединения элементов деревянных конструкций с окружающей воздушной средой в летний период (рис. 3.1).

На рисунке 3.1 приведены графики изменения температур сухого (1,2) и влажного (3,4) термометров для двух городов. России: Йошкар-Олы (1,3) и Иванова (2,4) для одного и того же интервала времени - с 6.00 17 июля до 12.00 18 июля 2012 года.

Разумеется, в реальных природных условиях резких скачков температуры не наблюдается. И все изменения происходят в определенных временных интервалах. Понятно, что приборами метеостанций данные фиксируются непрерывно, но в официальную отчетность поступают в определенные моменты времени. Что и получило свое отражение на рисунке 3.1.

Вместе с тем, интересно отметить, что в день, являющийся "пиком лета", в обоих городах температура воздуха опускалась до температуры влажного термометра и, соответственно, достигала значения "температуры точки росы". Причем, если в Иваново это наблюдалось примерно в течение трех часов (от 0 до 3 часов), то в столице Республики Марий Эл данный период был более длительным (с 20 часов 17 июля до 8 утра 18 июля).

В этих условиях можно записать, что изменение данных температур во времени с формальной математической точки зрения определяется выражениями вида:

$$t_s(\tau) = f_1(\tau); t_{вл.м.}(\tau) = f_2(\tau) \quad (3.1)$$

Известно [190], что любая графическая зависимость вида (1) может быть представлена гистограммой, изображенной на рисунке 3.2.

Таким образом логично предположить, что в пределах малого временного интервала:

$$\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1} \quad (3.2)$$

значение функции (а в данной случае – $t_{e,i}$ может считаться постоянным в пределах этого промежутка). А в этом и заключается суть метода «микрпроцессов»; изложенного, например, в [156].

В нагельном соединении элементов деревянных конструкций полагаем, что в силу большого различия значений теплофизических коэффициентов металла и древесины, при изменении температуры окружающей среды температура нагеля изменяется более интенсивно и более равномерно по сечению изделия; а в древесине, в силу тепловой инерции процессы тепло- и массопереноса протекают более экстенсивно.

Конструкции и формы нагельных соединений весьма разнообразны [191-193]. Однако для понимания сущности методологии моделирования, выберем достаточно простое, но вместе с тем, весьма распространенное – болтовое.

Будем полагать, что в какой-то момент времени, принятый за начало отсчета, температуры нагеля и дерева равны начальным значениям (кривая 1 на рис. 3.3).

С течением времени воздушная среда начинает прогреваться от солнечных лучей; при этом нагревается и система «металл-древесина». В силу значительного различия в величинах коэффициентов теплопроводности (на порядок и более), можно считать, что металлический нагель прогревается практически равномерно, а древесина – существенно медленнее. В этом случае динамика полей температур в рассматриваемой системе может характеризоваться линиями 2, 3, 4 рисунка 3.4.

В определенный период суток температура окружающей среды достигнет максимума (t_{\max} , τ_{\max}), и затем станет понижаться. При этом вследствие теплообмена будет понижаться и температура металла в соединении.

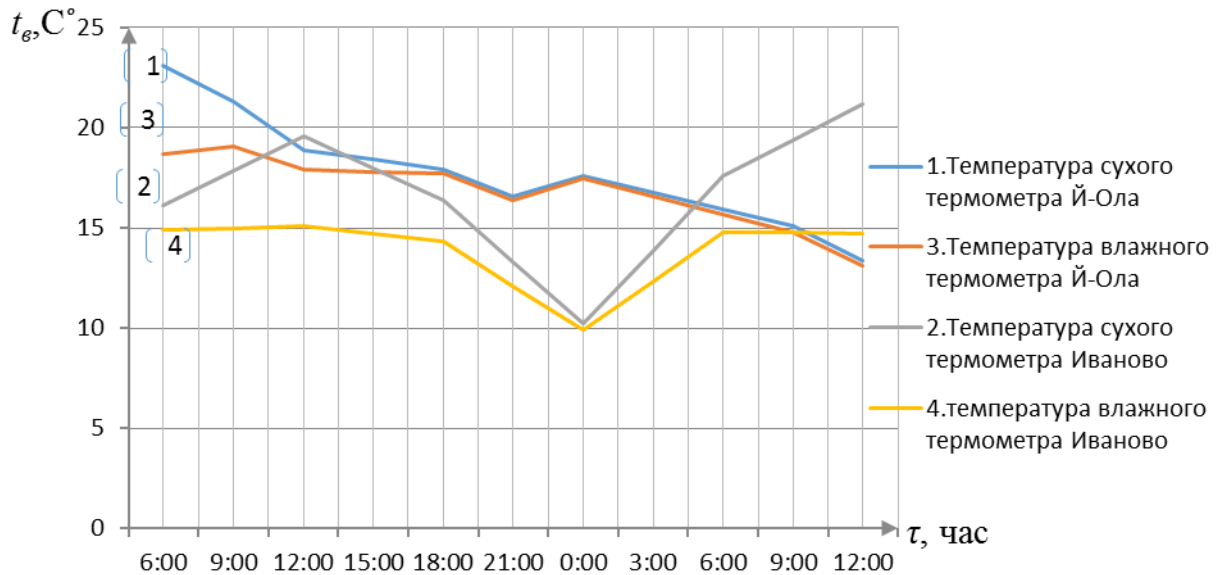


Рис. 3.1. Температурный график с 6.00 17 июля по 12.00 18 июля 2012 года в городах Йошкар-Ола и Иваново по данным Росметеостата

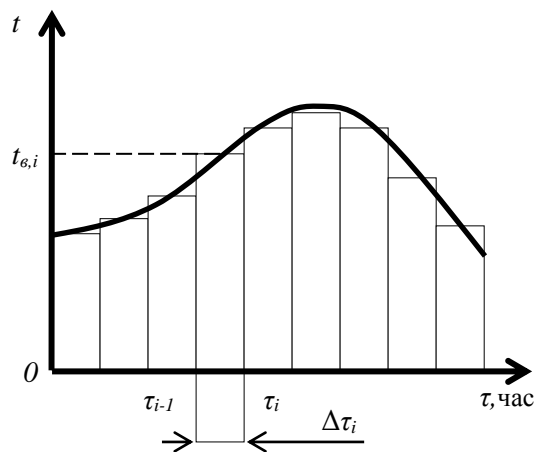


Рис. 3.2. Схематичное представление кривой и гистограммы

Температура древесины, вследствие тепловой инерции, будет изменяться менее интенсивно, и динамика полей температур в системе станет характеризоваться кривыми рисунка 3.5.

При этом отметим характерную особенность периода охлаждения: температурный график в древесине будет иметь экстремум (максимум), перемещаемый во внутренние слои.

В определенный момент времени температура воздушной среды вблизи металла достигнет значения температуры точки росы. Дальнейшее охлаждение будет сопровождаться неизбежным выпадением капельной влаги.

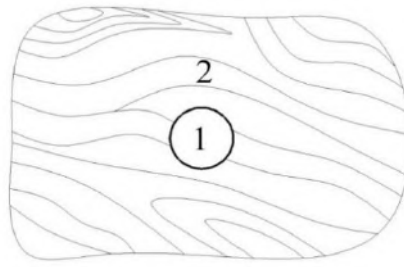


Рис. 3.3. Иллюстрация модели нагельного соединения
1-нагель (болт); 2-древесина

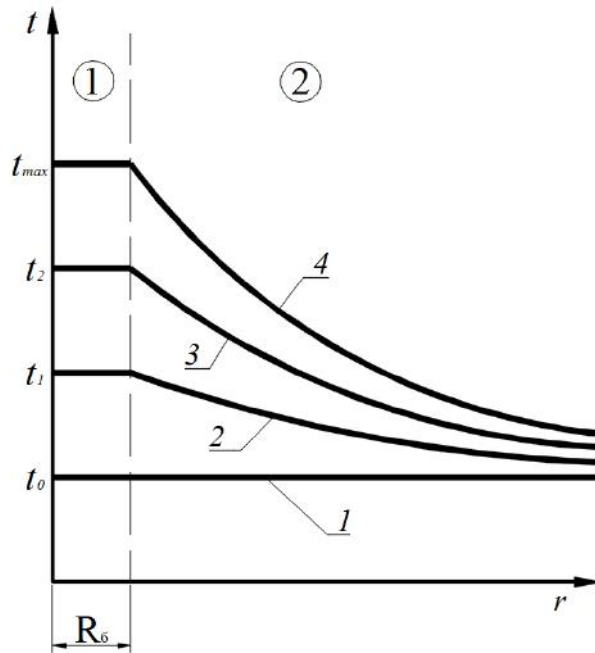


Рис. 3.4. График изменения температур в толще древесины (2) при росте температуры металла (1), R_b – радиус болта. ($t_{max} > t_2 > t_1 > t_0$; $\tau_4 > \tau_3 > \tau_2 > \tau_0$)

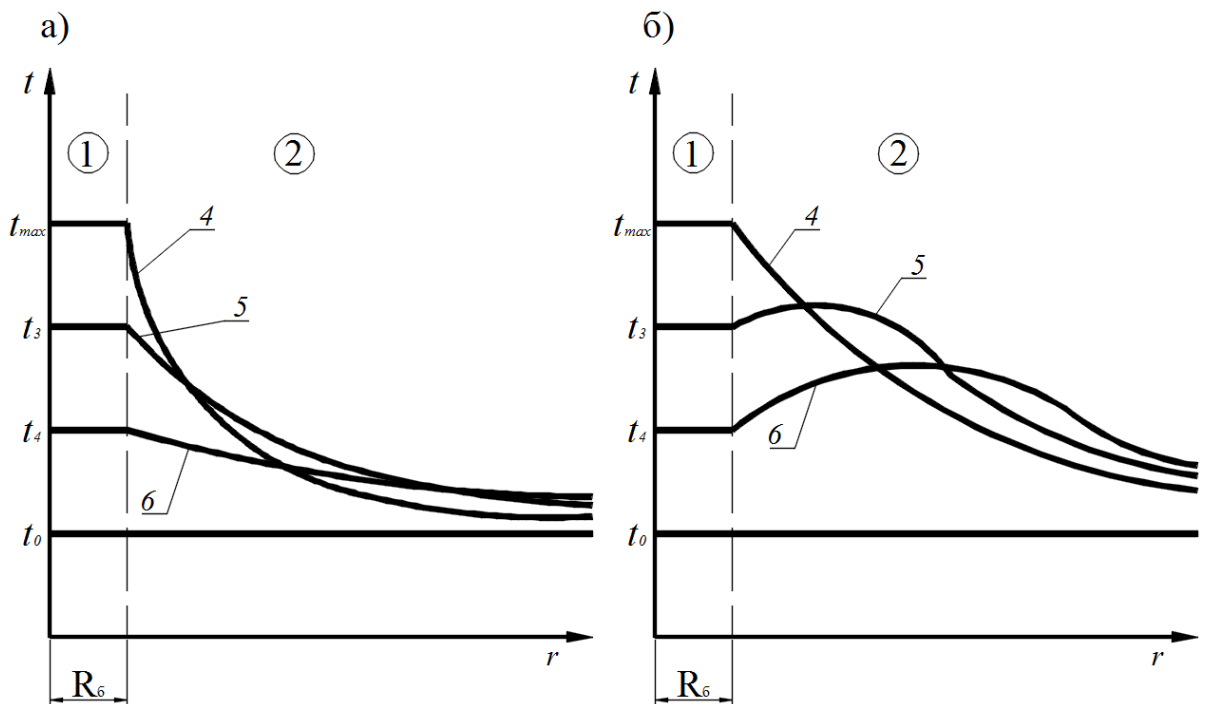


Рис. 3.5. Графики изменения температуры в древесине (2) на стадии малоинтенсивного (а) и высокоинтенсивного (б) охлаждения металла ($\tau_5 > \tau_6$)

Рисунок 3.6. представляет собой упрощенную модель диаграммы состояния влажного воздуха, или $I-d$ – диаграммы [125].

Процесс охлаждения воздуха от температуры t_A до температуры t_B происходит по линии постоянного влагосодержания AB , но при изменяющихся значениях и энтальпии и относительной влажности воздуха. В точке B пересекаются линия постоянной температуры t_B и линия постоянной относительной влажности $\phi = 100\%$. Как известно [125], 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, по достижении которой и происходят фазовые изменения. Однако, современных научных знаний в данной области пока недостаточно для получения количественных выводов.

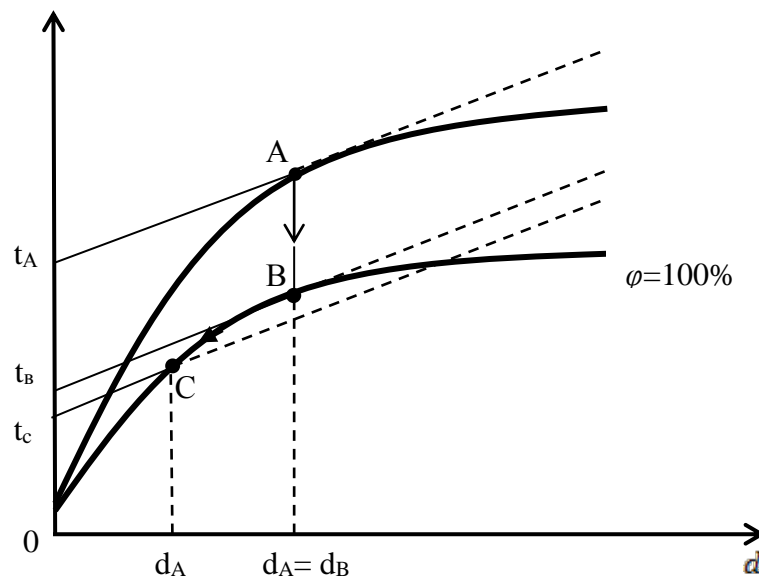


Рис. 3.6. Иллюстрация отражения физической модели процесса охлаждения воздуха на $I-d$ диаграмме

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 вовнутрь близлежащих к болту слоев древесины. Следующие дни приведут к цикличности описанных процессов тепломассопереноса.

При этом следует учитывать и природу и анизотропность свойств материала древесины [194]. Известно, например, что соотношение коэффициентов влагопроводности для сосны в радиальном и тангенциальном направлении по стволу определяется как:

$$\frac{k_{\text{рад}}}{k_{\text{танг}}} = \frac{1}{5} \quad (3.3)$$

а соотношение коэффициентов в продольном и радиальном направлениях еще более велико:

$$\frac{k_{\text{рад}}}{k_{\text{танг}}} = \frac{1}{(12-18)} \quad (3.4)$$

В настоящее время не существует ни математических моделей подобных физических процессов, ни, тем более, инженерных методик расчета.

В то же время, в соответствии с теорией тепломассопереноса [125], система дифференциальных уравнений нестационарного переноса теплоты и влаги применительно к строительным материалам и конструкциям может быть записана в следующем виде системы уравнений (1.25)

Для малоинтенсивных тепломассообменных процессов, а к таковым относятся и процессы взаимодействия деревянных сооружений (и элементов из них) с окружающей средой, влиянием баропереноса можно пренебречь [125,156]. В этом случае система (1.33) упрощается:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \text{div}(a \text{grad}(t)) + \varepsilon \frac{r^*}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \text{div}(k \text{grad}(u)) + \text{div}(k \delta_T \text{grad}(t)) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Уравнения (3.5) являются нелинейными и, в общем случае не могут быть решены современными аналитическими методами. А для их реализации

численными методами необходимы эмпирические зависимости, связывающие все параметры переноса с температурой и влагосодержанием.

И в этих условиях, наиболее перспективным является сочетание аналитических и численных методов анализа [156].

Одним из таких методов является упомянутый уже в первой главе метод «микропроцессов» [133], положительно зарекомендовавший себя при разработке математических моделей и инженерных методов расчета для сушки, обжига и тепловлажностной обработки строительных материалов [156].

Согласно этому методу время всего процесса взаимодействия конструкции с окружающей средой представляется непрерывной цепью последовательных стадий процесса, на каждой из которых определяемые параметры среды и конструкции можно считать постоянными, но скачкообразно меняющимися при переходе от одного «микропроцесса» к другому.

При этом очень важным обстоятельством является то, что начальными условиями для расчета тепло- и влагопереноса на последующем этапе («микропроцессе») являются результаты расчета на предыдущем этапе. Такой подход позволяет упростить систему уравнений (3.5) конкретно для рассмотрения исследуемых явлений тепломассопереноса.

Немаловажным является задание начальных и граничных условий, поскольку именно они определяют особенности взаимодействия конструкции с окружающей средой и фактически определяют конечный результат.

Для тепловой части задачи при реализации в дальнейшем метода «микропроцессов» будем использовать начальные условия вида,

$$t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x, y, z) \quad (3.6)$$

$$u(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x, y, z) \quad (3.7)$$

характеризующие распределение значений температур и влагосодержаний в древесине.

В качестве обобщенных граничных условий можем записать следующие [125,196]:

$$\alpha[t_c(\tau) - t(x, y, z, \tau)] = \lambda \nabla t(x, y, z, \tau) + q_m(\tau) r^* \quad (3.8)$$

$$q_m(\tau) = \beta[u_{nc}(\tau) - u_c(\varepsilon)] \rho_r = -k\rho_0[\nabla u(x, y, z, \tau) + \delta_T \nabla t(x, y, z, \tau)] \quad (3.9)$$

Здесь α, β – соответственно, коэффициенты тепло- и влагообмена между конструкцией и окружающей средой; $q_m(\tau)$ – плотность потока влаги на границе раздела сред, x, y, z – геометрические координаты границ конструкции или ее элементов.

Таким образом система уравнений (3.5) с начальными (3.6), (3.7) и граничными (3.8), (3.9) условиями называется краевой задачей тепломассопереноса и в общем виде определяет поведение рассматриваемой системы «газ-твердое».

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, поскольку решения краевых задач как правило получаются в форме Бесселевых функций, которые обладают специфическими особенностями вычислений и порой создают серьезные трудности в методологическом плане 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. Например, в соответствии с рис. 3.7 при соотношении $R_6/R_1 < 0,5$ краевая задача теплопроводности в древесине может быть рассмотрена в системе неограниченных пластин, с размерами по толщине:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= R_1 - R_6 \\ \delta_2 &= R_2 - R_1 \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_i &= R_i - R_{i-1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

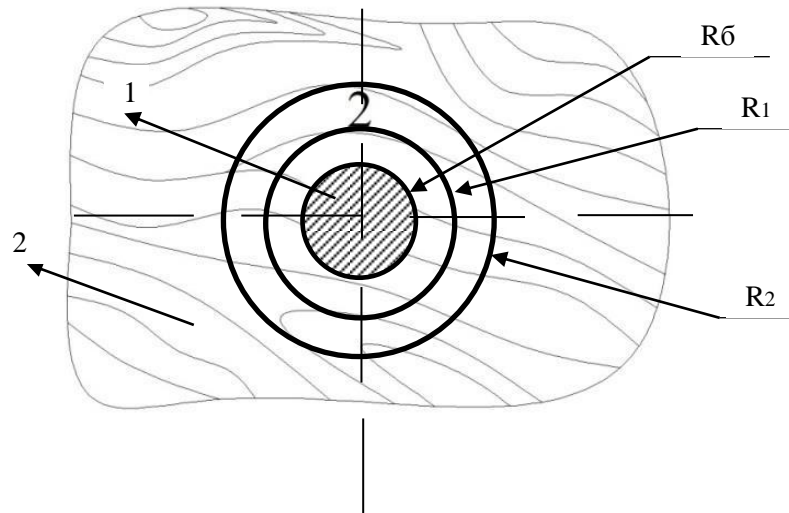


Рис. 3.7. Моделирование древесины системой колец (неограниченных пластин) $R_2 > R_1 > R_0$; 1 – нагель (болт); 2 – древесина

3.2. Постановка и решение краевой задачи теплопроводности в древесине вблизи цилиндрического нагеля

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

$$\rho c \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad \tau > 0; \quad R_0 \leq r \leq R_1 \quad (3.11)$$

$$t(r, \tau)|_{\tau=0} = t_0(r) \quad (3.12)$$

$$t(r, \tau)|_{r=R_0} = t_0(\tau) \quad (3.13)$$

$$\left. \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R_1} = 0 \quad (3.14)$$

Здесь: ρ , c , λ – соответственно: плотность, теплоемкость и теплопроводность древесины. Выражение (3.12) является начальным условием задачи и характеризует поле температур от поверхности нагеля (болта) во внутренние слои древесины по координате r .

Записи (3.13) и (3.14) являются граничными условиями: первая отражает тот факт, что в месте контакта «металл-древесина» предполагается плотное прилегание и равенство температур древесины и металла. Второе показывает, что на второй границе выделенного «кольца» осуществляется условие тепловой

изоляции. Позднее мы покажем пространственно-временные границы применения этого условия.

Как уже отмечалось в [199], в общем случае краевая задача (3.11) – (3.14), является нелинейной, как в силу того, что теплофизические свойства древесины существенно зависят от ее влажности и температуры, так и в силу того, что задать явный вид функции $t_0(\tau)$ в граничном условии (3.13) не представляется возможным, так как температура металла существенно зависит от параметров воздуха (уравнение (3.1), и рисунки 3.4. и 3.5), которые непредсказуемым образом могут изменяться во времени суток.

Выше, и в [200] отмечалось, что для решения подобных задач успешно применяется метод «микропроцессов» [156], сочетающий в себе преимущества аналитических и численных методов математического анализа.

Согласно данному методу общее время процесса представляется непрерывной цепью последовательных «микропроцессов»:

$$\tau_{\text{проц}} = \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i \quad (3.15)$$

В пределах каждого «микропроцесса» теплофизические параметры взаимодействующих сред можно считать постоянными, но скачкообразно изменяющимися при переходе от предыдущего «микропроцесса» к последующему. В этих условиях, конечное распределение температур, полученное на предыдущем шаге расчета, будет выбрано в качестве начального условия для расчетов на последующем этапе.

И тогда, для первого этапа расчетов и первого «кольца» древесины краевую задачу теплопроводности (3.11) – (3.14) можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial t_1(r, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t_1(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad \tau > 0; \quad R_0 \leq r \leq R_1 \quad (3.16)$$

$$t_1(r, \tau)|_{\tau=0} = t_{1,0}(r) \quad (3.17)$$

$$t_1(r, \tau)|_{r=R_0} = t_{0,1} \quad (3.18)$$

$$t_1(r, \tau)|_{r=R_1} = t_{R_1} \quad (3.19)$$

Для упрощения анализа введем в рассмотрение безразмерные переменные вида:

$$T_1(\bar{r}, Fo) = \frac{t_1(r, \tau) - t_{R_1}}{t_{\bar{0},1}}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_{\bar{0}}}; \quad Fo = \frac{a\tau}{(R_1 - R_{\bar{0}})^2} \quad (3.20)$$

В итоге, задача (3.16) – (3.19) представится следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_1(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1 \quad (3.21)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo) \Big|_{Fo=0} = T_{1,0}(\bar{r}) \quad (3.22)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo) \Big|_{\bar{r}=0} = T_{R_1} \quad (3.23)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo) \Big|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (3.24)$$

Итак, формально полученные записи означают, что для упрощения анализа мы поместили начало координат на границе «металл-древесина».

Решение краевой задачи (3.21)–(3.24) будем искать методом интегрального преобразования Лапласа [197].

В области изображений по Лапласу решение уравнения (3.21) с учетом приведенных начального (3.22) и граничных (3.23), (3.24) условий будет иметь вид:

$$T_1(\bar{r}, s) = A \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) + B \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} T_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{r} - \xi) d\xi \quad (3.25)$$

Граничные условия (3.23) и (3.24) примут вид:

$$T_1(\bar{r}, s) \Big|_{\bar{r}=0} = \frac{T_{R_1}}{s} \quad (3.26)$$

$$T_1(\bar{r}, s) \Big|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (3.27)$$

Используем условие (3.26):

$$\frac{T_{R_1}}{s} = A \cdot \underbrace{ch(0)}_1 + B \cdot \underbrace{sh(0)}_0 \quad (3.28)$$

Отсюда, для константы А, получаем:

$$A = \frac{T_{R_1}}{s} \quad (3.29)$$

Используем условие (3.27):

$$0 = \frac{T_{R_1}}{s} \cdot ch\sqrt{s} + B \cdot sh\sqrt{s} - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi \quad (3.30)$$

Отсюда следует:

$$B = -\frac{T_{R_1}}{s} \cdot \frac{ch\sqrt{s}}{sh\sqrt{s}} + \frac{1}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi \quad (3.31)$$

Подставляем (3.29) и (3.31) в решение (3.25):

$$T_1(\bar{r}, s) = \frac{T_{R_1}}{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) - \frac{T_{R_1}}{s} \cdot \frac{ch\sqrt{s}}{sh\sqrt{s}} \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r}) + \frac{sh(\sqrt{s}\bar{r})}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \cdot \int_0^{\bar{r}} T_{1,0}(\xi) \times \\ sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} T_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{r}-\xi) d\xi \quad (3.32)$$

В полученном выражении функция $T_1(\bar{r}, s)$ является, так называемым отображением функции $T_1(\bar{r}, Fo)$ в области конформных изображений [197]; ξ – переменная координата в диапазоне $0 \dots 1$.

Первые два слагаемых правой части дают:

$$[1] + [2] = \frac{T_{R_1}}{s \cdot sh\sqrt{s}} \left[sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) - ch(\sqrt{s}\bar{r}) \right] \quad (3.33)$$

Разложим в ряд по степеням s числитель и знаменатель:

$$[ч] = \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{(\sqrt{s}\bar{r})^2}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[(\sqrt{s}\bar{r}) + \frac{(\sqrt{s}\bar{r})^3}{3!} + \dots \right] \quad (3.34)$$

$$[з] = s \cdot \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \quad (3.35)$$

Очевидно, что и числитель и знаменатель не являются полиномами относительно s , но легко к ним приводятся делением на \sqrt{s} :

$$\frac{1}{\sqrt{s}} [ч] = \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\bar{r}^2}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot \left[\bar{r} + \frac{s\bar{r}^3}{3!} + \dots \right] \quad (3.36)$$

$$\frac{1}{\sqrt{s}} [з] = s \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \quad (3.37)$$

Определяем значение (3.36) при $s=0$

$$\left. \frac{1}{\sqrt{s}} [y] \right|_{s=0} = 1 - \bar{r} \quad (3.38)$$

Продифференцируем (3.37) по s :

$$\frac{d}{ds} \left\{ \frac{1}{\sqrt{s}} [z] \right\} = s' \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] + s \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right]' \quad (3.39)$$

И, при $s=0$, получаем:

$$\left. \frac{d}{ds} \left\{ \frac{1}{\sqrt{s}} [z] \right\} \right|_{s=0} = 1 \quad (3.40)$$

Значение нулевого корня при этом будет (в соответствии со второй теоремой разложения):

$$\frac{\varphi(0)}{\psi(0)} = \frac{1 - \bar{r}}{1} = 1 - \bar{r} \quad (3.41)$$

Для множества корней получаем:

$$[I] = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi(s)}{\psi(s)} \cdot \exp(s_n F_0) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[sh\sqrt{s_n} \cdot ch(\sqrt{s_n} \bar{r}) - ch\sqrt{s_n} \cdot sh(\sqrt{s_n} \bar{r})]}{(s \cdot sh\sqrt{s})'} \cdot \exp(s_n F_0) \quad (3.42)$$

Производим дифференцирование в знаменателе:

$$(s \cdot sh\sqrt{s})' = s' \cdot sh\sqrt{s} + s \cdot (sh\sqrt{s})' = sh\sqrt{s} + s \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot ch\sqrt{s} \quad (3.43)$$

Характеристическое уравнение для поиска множества корней будет иметь вид:

$$sh\sqrt{s_n} = 0 \quad (3.44)$$

Переходим в (3.42) от гиперболических функций к тригонометрическим:

$$[I] = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[\frac{1}{i} \cdot \sin(i\sqrt{s_n}) \cdot \cos(i\sqrt{s_n} \bar{r}) - \cos(i\sqrt{s_n}) \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s_n} \bar{r}) \right]}{\sqrt{s} \cdot \cos(i\sqrt{s_n})} \cdot \exp(i^2 s_n F_0) \quad (3.45)$$

Умножаем на i^3 :

$$[I] = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n \cdot \cos \mu_n} \left[\sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) - \underbrace{\cos \mu_n}_{0} \cdot \sin(\mu_n \bar{r}) \right] \exp(-\mu_n^2 F_0) \quad (3.46)$$

Из характеристического уравнения (3.44) также следует:

$$\sin \mu_n = 0, \text{ а отсюда: } \mu_n = \pi n \quad (3.47)$$

И для $\cos \mu_n$ имеем:

$$\cos \mu_n = (-1)^n \quad (3.48)$$

И, тогда, после сокращений, для [I] следует в оригиналах:

$$[I] = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \cdot \sin(\mu_n \bar{r}) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (3.49)$$

И, тогда в оригиналах для первого и второго слагаемых (3.32) будем иметь запись:

$$\begin{aligned} T_{R_1} (1 - \bar{r}) - 2T_{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\underbrace{\mu_n}_{\pi n}} \cdot \sin(\mu_n \bar{r}) \cdot \exp\left(-\underbrace{\mu_n^2}_{\pi^2 n^2} Fo\right) = \\ = T_{R_1} \left[(1 - \bar{r}) - 2 \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \right] \end{aligned} \quad (3.50)$$

Последнее слагаемое в (3.32) обратится в ноль в силу умножения числителя и знаменателя на $sh\sqrt{s}$.

Рассмотрим третье слагаемое, преобразуя подынтегральную функцию:

$$sh\sqrt{s}(1 - \xi) = \underbrace{sh\sqrt{s}}_0 \cdot ch(\sqrt{s}\xi) - ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi) = -ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi) \quad (3.51)$$

Следовательно, для [3] запишем:

$$\begin{aligned} [3] &= \frac{sh(\sqrt{s}\bar{r})}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \int_0^1 T_{1,0}(\xi) [-ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi)] d\xi = \\ &= - \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \left[\frac{sh(\sqrt{s}\bar{r}) \cdot ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi)}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \right] \cdot d\xi \end{aligned} \quad (3.52)$$

Вновь числитель и знаменатель представляем полиномами:

$$\begin{aligned} \varphi(s) &= \left[(\sqrt{s}\bar{r}) + \frac{(\sqrt{s}\bar{r})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[(\sqrt{s}\xi) + \frac{(\sqrt{s}\xi)^3}{3!} + \dots \right] = \\ &= s \left[\bar{r} + \frac{s\bar{r}^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot \left[\xi + \frac{s\xi^3}{3!} + \dots \right] \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\psi(s) = \sqrt{s} \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] = s \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \quad (3.54)$$

Отсюда:

$$\psi'(s) = s' \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] + s \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right]' \quad (3.55)$$

и: $\psi'(s)|_{s=0} = 1$

Однако (3.54) обращается в ноль при $s=0$. Следовательно, нулевой корень отсутствует.

Дифференцируем знаменатель в (3.52):

$$\psi'(s) = (\sqrt{s}) \cdot sh\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot (sh\sqrt{s})' = \sqrt{s} \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} ch\sqrt{s} = \frac{1}{2} ch\sqrt{s} \quad (3.56)$$

Для квадратной скобки, переходя к тригонометрическим функциям:

$$[\approx] = \frac{\frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}r) \cdot \cos(i\sqrt{s}) \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}\xi)}{\frac{1}{2} \cos(i\sqrt{s})} = - \frac{2 \sin(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos \mu_n \cdot \sin(\mu_n \xi)}{\cos \mu_n} \quad (3.57)$$

Окончательно, для [3] в оригиналах:

$$[3] = +2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\mu_n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\mu_n \xi) d\xi \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo) = \quad (3.58)$$

$$= +2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \quad (3.59)$$

Итак, полное решение будет:

$$T_1(\bar{r}, Fo) = T_{R_1} \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \right] + \quad (3.60)$$

$$+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo)$$

Выражение (3.60) 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 $\bar{r} = R_1$. Граничные условия для координаты R_2 будет аналогично условию (3.24); а условие на границе изменится. Задача для второго слоя будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T_2(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_2(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq \frac{R_2 - R_1}{R_2} \quad (3.61)$$

$$T_2(F, Fo)|_{Fo=0} = T_{2,0}(\bar{r}) \quad (3.62)$$

$$-\lambda \frac{\partial t_2(\bar{r}, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = q \quad (3.63)$$

$$T_2(\bar{r}, Fo)|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (3.64)$$

Уравнение (3.63) записано в размерном виде. Приведем к безразмерному, введя обозначения:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{r} = 0, \text{ при } r = R_1 \\ \bar{r} = 1, \text{ при } r = R_2 \end{array} \right\} \bar{r} = \frac{r}{R_2 - R_1} \quad (3.65)$$

$$T_2(\bar{r}, Fo) = \frac{t_2(r, \tau) - t_{R_2}}{t_{R_2}}; \quad Fo = \frac{a\tau}{(R_2 - R_1)^2} \quad (3.66)$$

Преобразуем (3.63):

$$-\frac{\partial}{\partial \left(\frac{r}{R_2 - R_1} \right)} [T_2(\bar{r}, Fo)] = \frac{q(R_2 - R_1)}{\lambda \cdot t_{R_2}} \quad (3.67)$$

Отсюда:

$$\frac{\partial T_2(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = -Ki \quad (3.68)$$

В области изображений по Лапласу выражение (3.68) запишется:

$$\frac{dT(\bar{r}, s)}{d\bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = -\frac{Ki}{s} \quad (3.69)$$

Вновь обращаемся к решению (3.25) и находим производную при $\bar{r} = 0$.

$$\frac{d}{d\bar{r}} [T_2(\bar{r}, s)] \Big|_{\bar{r}=0} = A \cdot \sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r}) \Big|_{\bar{r}=0} + B \cdot \sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) \Big|_{\bar{r}=0} \quad (3.70)$$

Отсюда:

$$-\frac{Ki}{s \cdot \sqrt{s}} = A \cdot sh(0) + B \cdot ch(0) \quad (3.71)$$

Это условие выполняется только при:

$$B = -\frac{Ki}{s\sqrt{s}} \quad (3.72)$$

Теперь используем условие (3.64):

$$0 = A \cdot ch\sqrt{s} + \left(-\frac{Ki}{s\sqrt{s}}\right)sh\sqrt{s} - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi)sh\sqrt{s}(1-\xi)d\xi \quad (3.73)$$

Отсюда выражаем для A:

$$A = \frac{1}{ch\sqrt{s}} \left\{ \frac{Ki}{s\sqrt{s}} sh\sqrt{s} + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(1-\xi)d\xi \right\} \quad (3.74)$$

И, тогда, общее решение в изображениях:

$$T_2(\bar{r}, s) = \frac{ch(\sqrt{s}\bar{r})}{ch\sqrt{s}} \left\{ \frac{Ki}{s\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi)sh\sqrt{s}(1-\xi)d\xi \right\} - \left(\frac{Ki}{s\sqrt{s}} \right) \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} T_{2,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{r}-\xi)d\xi \quad (3.75)$$

Для данного случая характеристическое уравнение примет вид:

$$\cos \mu_n = 0 \rightarrow \mu_n = \frac{\pi}{2}(2n-1) \quad (3.76)$$

И вновь отмечаем, что последнее слагаемое в (3.75) не учитывается, т.к. при умножении на $ch\sqrt{s}$ числителя и знаменателя оно обращается в ноль.

Преобразовываем (3.75) раскрывая скобки и группируя подобные члены:

$$\begin{aligned} T_2(\bar{r}, s) &= Ki \frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r})}{s\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} - Ki \frac{sh(\sqrt{s}\bar{r})}{s\sqrt{s}} + \frac{ch(\sqrt{s}\bar{r})}{ch\sqrt{s}} \times \\ &\times \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \left[sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\xi) - \underbrace{ch\sqrt{s}}_0 \cdot sh(\sqrt{s}\xi) \right] d\xi = \\ &= Ki \frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) - ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r})}{s\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} + \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \left[\frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) \cdot ch(\sqrt{s}\xi)}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \right] d\xi \end{aligned} \quad (3.77)$$

Представим числитель и знаменатель первого слагаемого соответственно $\varphi_1(s)$ и $\psi_1(s)$. Тогда, в соответствии с формулами преобразования, запишем:

$$\varphi_1(s) = sh\sqrt{s}(1-\bar{r}) \quad (3.78)$$

Дифференцируем знаменатель по s:

$$\begin{aligned}
\psi_1'(s) &= s' \cdot \sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s} + s(\sqrt{s})' \cdot ch\sqrt{s} + s\sqrt{s}(ch\sqrt{s})' = \\
&= \sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s} + s \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot ch\sqrt{s} + s\sqrt{s} \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} sh\sqrt{s} = \\
&= \frac{1}{2\sqrt{s}} [(2s + s)ch\sqrt{s} + s\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}]
\end{aligned} \tag{3.79}$$

Отсюда:

$$\frac{\varphi_1(s)}{\psi_1'(s)} = \frac{2\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}(1-r)}{3s \cdot ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s} \cdot s} \tag{3.80}$$

Переходим от гиперболических функций к тригонометрическим:

$$\frac{\varphi_1(i\sqrt{s})}{\psi_1''(i\sqrt{s})} = \frac{2\sqrt{s} \left\{ \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \cdot \cos(i\sqrt{s}r) - \cos(i\sqrt{s}) \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}r) \right\}}{3s \cdot \cos(i\sqrt{s}) + s \cdot \sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \cdot \sin(i\sqrt{s})} \tag{3.81}$$

Поскольку характеристическое уравнение обращается в ноль, слагаемые с $\cos(i\sqrt{s})$ перепишем:

$$\frac{\varphi_1(i\sqrt{s})}{\psi_1''(i\sqrt{s})} = \frac{2\sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \cdot \cos(i\sqrt{s}r)}{s \cdot \sqrt{s} \cdot \sin(i\sqrt{s}) \cdot \frac{1}{i}} = \frac{2 \cos(i\sqrt{s}r)}{s} \tag{3.82}$$

Умножаем на i^2 и переходим в область оригиналов:

$$L^{-1} \left[\frac{i^2 \varphi_1(i\sqrt{s_n})}{i^2 \psi_1''(i\sqrt{s_n})} \right] = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \cos(\mu_n r) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo) \tag{3.83}$$

Или, учитывая (3.76), перепишем:

$$L^{-1} \left[\frac{\varphi_1(\mu_n)}{\psi_1'(\mu_n)} \right] = -\frac{8Ki}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1)r \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)Fo \right] \tag{3.84}$$

Приступаем к поиску нулевого корня. Обращаемся к выражению (3.77), и прежде всего, к первому слагаемому правой части:

$$\varphi(s) = sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}r) - ch\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}r \tag{3.85}$$

Раскладываем по степеням \sqrt{s} :

$$\begin{aligned}
\varphi(s) &= \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{(\sqrt{sr})^2}{2!} + \dots \right] - \\
&- \left[1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[\sqrt{sr} + \frac{(\sqrt{sr})^3}{3!} + \dots \right] = \\
&= \sqrt{s} \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot (\sqrt{s}) \cdot \left[\bar{r} + \frac{sr^{-3}}{3!} + \dots \right]
\end{aligned} \tag{3.86}$$

Очевидно, что $\varphi(s)$ не является полиномом относительно s , но легко к нему приводится делением на \sqrt{s} :

$$\frac{\varphi(s)}{\sqrt{s}} = \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot \left[\bar{r} + \frac{sr^{-3}}{3!} + \dots \right] \tag{3.87}$$

И тогда:

$$\left[\frac{\varphi(s)}{\sqrt{s}} \right]_{s=0} = 1 \cdot 1 - 1 \cdot \bar{r} = (1 - \bar{r}) \tag{3.88}$$

Аналогично, для функции $\frac{\psi(s)}{\sqrt{s}}$:

$$\frac{\psi(s)}{\sqrt{s}} = s \cdot ch\sqrt{s} = s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \tag{3.89}$$

Дифференцируем по s :

$$\frac{d}{ds} \left[\frac{\psi(s)}{\sqrt{s}} \right]_{s=0} = s' \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] + s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]' = 1 \tag{3.90}$$

Итак, нулевое слагаемое будет иметь вид:

$$L^{-1} \left[\frac{\varphi(0)}{\psi'(0)} \right] = Ki(1 - \bar{r}) \tag{3.91}$$

Рассматриваем второе слагаемое (3.77) на предмет нулевого корня, а также числитель и знаменатель:

$$\begin{aligned}
\varphi_2(s) &= \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\xi^2}{2!} + \dots \right] = \\
&= \sqrt{s} \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\xi^2}{2!} + \dots \right]
\end{aligned} \tag{3.92}$$

$$\psi_2(s) = \sqrt{s} \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \quad (3.93)$$

Очевидно, что обе функции не являются полиномами относительно s , но легко к ним приводятся делением на \sqrt{s} . И при значении $s=0$ получаем:

$$\left. \frac{\varphi_2(s)}{\sqrt{s}} \right|_{s=0} = \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\xi^2}{2!} + \dots \right] \Big|_{s=0} = 1 \quad (3.94)$$

$$\left. \frac{d}{ds} \left[\frac{\psi'(s)}{\sqrt{s}} \right] \right|_{s=0} = \left[1 + \frac{s}{2!} + \frac{s^2}{4!} + \dots \right]' \Big|_{s=0} = \left[\frac{1}{2} + \frac{s}{2!} + \frac{3s^2}{4!} + \dots \right] \Big|_{s=0} = \frac{1}{2} \quad (3.95)$$

Следовательно, для нулевого корня квадратной скобки второго слагаемого (3.77) имеем:

$$[\approx]_{s=0} = 1 : \frac{1}{\frac{1}{2}} = 2 \quad (3.96)$$

И, следовательно:

$$L^{-1} \left[\int_0^1 T_{2,0}(\xi) [\approx] \right]_{s=0} d\xi = 2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi \quad (3.97)$$

Преобразуем числитель и знаменатель в последнем слагаемом (3.77):

$$\varphi_2(s) = \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \cdot \cos(i\sqrt{s}r) \cdot \cos(i\sqrt{s}\xi) \quad (3.98)$$

Отсюда следует:

$$\varphi_2(\mu_n) = \frac{1}{i} \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n r) \cdot \cos(\mu_n \xi) \quad (3.99)$$

Производная знаменателя:

$$\begin{aligned} \psi_2'(s) &= (\sqrt{s})' \cdot ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot (ch\sqrt{s})' = \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} = \\ &= \frac{1}{2\sqrt{s}} (ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}) \end{aligned} \quad (3.100)$$

Далее:

$$\psi_2'(\mu_n) = \frac{1}{2\sqrt{s}} \left[\cos(i\sqrt{s}) + \sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \right] \quad (3.101)$$

Определяем соотношение записей (3.99) и (3.101):

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_2(\mu_n)}{\psi_2(\mu_n)} &= \frac{\frac{1}{i} \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)}{\frac{1}{2\sqrt{s}} \left[\cos(i\sqrt{s}) + \sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \right]} = \\ &= \frac{2\sqrt{s} \cdot \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)}{i \left[\cos \mu_n + \sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \sin \mu_n \right]} \end{aligned} \quad (3.102)$$

Умножим числитель и знаменатель на i :

$$\frac{i\varphi_2(\mu_n)}{i\psi_2(\mu_n)} = \frac{2(i\sqrt{s}) \cdot \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)}{i^2 \left[\cos \mu_n + \sqrt{s} \frac{1}{i} \sin \mu_n \right]} = \quad (3.103)$$

$$= \frac{2\mu_n \cdot \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)}{\mu_n \cdot \sin \mu_n - \cos \mu_n} = 2 \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi), \quad (3.104)$$

т.к. в силу характеристического уравнения (3.76) $\cos \mu_n = 0$

Итак, записываем окончательное решение краевой задачи (3.61), (3.62), (3.64) и (3.68) в области оригиналов с учетом выражений (3.84), (3.91), (3.99) и (3.104):

$$\begin{aligned} T(\bar{r}, Fo) &= Ki(1 - \bar{r}) + 2Ki \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin[\mu_n(1 - \bar{r}) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo)]}{3\mu_n^2 \cdot \cos \mu_n + \mu_n \sin \mu_n} + \\ &+ 2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cdot [\cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)] d\xi \cdot \exp(\mu_n^2 Fo) \end{aligned} \quad (3.105)$$

Полученные выражения можно еще более упростить. Во-первых, учитывая характеристическое уравнение, первое слагаемое в знаменателе (3.105) обращается в ноль, а во-вторых:

$$\sin[\mu_n(1 - \bar{r})] = \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) - \cos \mu_n \cdot \sin(\mu_n \bar{r}) \quad (3.106)$$

И, вследствие этого:

$$\begin{aligned} T_2(\bar{r}, Fo) &= Ki(1 - \bar{r}) - \frac{8Ki}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{r}\right] \exp\left[-\frac{\pi^2}{4(2n-1)} Fo\right] + \\ &+ 2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo) \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi \end{aligned} \quad (3.107)$$

Или, в более удобной записи:

$$\begin{aligned}
T_2(\bar{r}, Fo) = & Ki \left\{ (1 - \bar{r}) - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{r} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \right\} + \\
& + 2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{r} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \times \\
& \times \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi
\end{aligned} \tag{3.108}$$

Итак, основные расчетные уравнения – это (3.60) и (3.108).

3.3. Постановка и решение краевой задачи влагопроводности в древесине нагеля

Ниже приводится изложение комплексной проблемы физико-математической постановки и решения задачи влагопереноса в слоях древесины при конденсации влаги в зоне контакта "металл-древесина" в результате понижения температуры воздуха до температуры "точки росы" и ниже, а также, учет процесса испарения влаги при последующем повышении температуры.

На рисунке 3.8., показан процесс охлаждения воздуха на I-d диаграмме. На рисунке 3.1. для более ясной четкости иллюстрации рассмотрены конкретные параметры воздушной среды в городах Йошкар-Ола и Иваново во временном интервале с 6.00 17 июля по 12.00 18 июля 2012 года. На рисунке 3.8 показан ход процесса остывания воздуха в г. Йошкар-Ола с 20.00 17 июля до 8.00 18 июля.

В момент времени $\tau_0 = 18.00$ температура воздуха достигла температуры "точки росы" t_g на рис.3.6), охлаждение воздуха продолжалось в течение 18-ти часов, (t_c на рис.3.6), за это время из воздуха сконденсировалось количество влаги, равное [205]:

$$\Delta m_{\text{вл.уд.}} = d_B - d_C. \tag{3.109}$$

Отметим, что, строго говоря, в силу своей физической природы древесина никогда не бывает абсолютно сухой [5]. В живой древесине всегда присутствуют транспортные каналы для потоков питания ствола, коры, листвы; в деловой

древесине всегда имеется конструкционная влага, содержание которой в твердой фазе определяется условиями равновесия с воздушной средой.

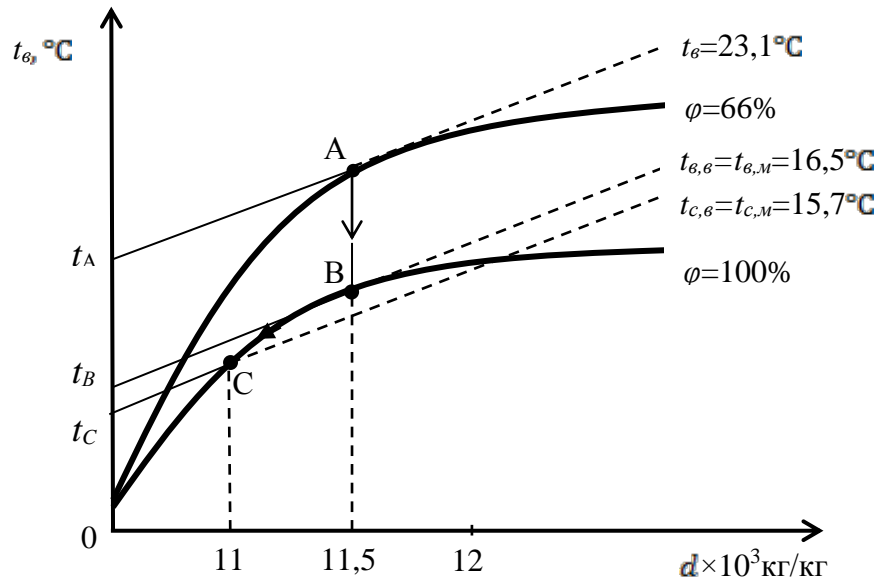


Рис. 3.8. Иллюстрация отражения физической модели процесса охлаждения воздуха на I-d диаграмме

С позиций теории тепломассопереноса [125] древесина является типичным коллоидным капиллярно-пористым телом, содержащим влагу макро- и микрокапилляров, а также осмотическую влагу, входящую в ее биологические клетки [191,192]. Влага, попадающая на древесину, не мгновенно заполняет поры поверхностных слоев; в соответствии с физическими закономерностями процесс увлажнения протекает во времени и характеризуется определенной кинетикой.

Кинетика конденсации (а, следовательно, и испарения) влаги на открытой поверхности определяется "законом массоотдачи Шукарева" [205]:

$$\frac{dm_{\text{вл}}}{Fd\tau} = (\pm)\beta[P_H - P_B]. \quad (3.110)$$

Здесь: $m_{\text{вл}}$ – масса конденсированной (испарившейся) влаги, кг; β – коэффициент массоотдачи в газовой фазе, кг/(м²Па); P_H – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре "точки росы", Па; P_B – парциальное давление водяного пара в воздухе в условиях эксплуатации конструкции, Па; F – площадь поверхности конденсации (испарения), м².

Давление водяного пара связано с влагосодержанием (d) и относительной влажностью воздуха (φ) определяется выражением вида [206]:

$$P_B = \varphi \cdot P_H = \frac{dP_A M_{ce}}{M_{en} + dM_{ce}}. \quad (3.110)$$

И для давления насыщения ($\varphi=100\%$), получаем:

$$P_H = 617,74 \exp\left(\frac{17,25t_{EM}}{238+t_{EM}}\right) \quad (3.112)$$

Следовательно, при остывании воздуха от температуры t_e до температуры t_c (рис.3.6), давление насыщенного водяного пара уменьшатся от P_{HB} до P_{HC} , а количество выпавшей капельной влаги определится в соответствии с интегрированием уравнения (3.110), как:

$$\Delta m_{вл} = \beta F (P_{HB} - P_{HC}) \Delta \tau_{1-2} \quad (3.113)$$

Здесь: $\Delta \tau_{1-2}$ – время остывания воздуха от температуры t_e до t_c .

Известное из теории сушки [130] понятие о максимальной гигроскопической влажности материала предполагает количество влаги, которое может поглотить объем (или масса) материала до определенного предела, свыше которого влага уже не может удерживаться физико-химическими силами (по терминологии академика П.А.Ребиндера), и называется свободной влагой. В науке о древесиноведении [33] существует также понятие об эксплуатационной (равновесной) влажности материала. Следует отметить, что по данным разных авторов [206] значение величины равновесной влажности для древесины (в зависимости от породы) колеблется в пределах 8-12%, а значение максимального гигроскопического влагосодержания находится в диапазоне 25-30%. Заметим также, что влажность традиционно определяется как количество влаги, отнесенное к количеству влажного материала, выражается в процентах и обозначается как W :

$$W = \frac{m_{вл}}{m_{вл} + m_{сух}} 100\% \quad (3.114)$$

Здесь: $m_{вл}$ – масса влаги в единице объема влажного тела, кг; $m_{сух}$ – масса сухого скелета в этом объеме, кг.

В то же время в расчетах кинетики и динамики процессов сушки более удобно понятие относительной влажности материала:

$$W_{\text{отн}} = \frac{m_{\text{вл}}}{m_{\text{сух}}} \quad (3.115)$$

Соответственно, для равновесной и максимальной гигроскопической влажности будем иметь:

$$W_{\text{отн}} = \frac{m_{\text{вл.р.}}}{m_{\text{сух}}}, \quad W_{\text{отн.мг.}} = \frac{m_{\text{вл.мг.}}}{m_{\text{сух}}}. \quad (3.116)$$

Если предположить, что за время $\Delta\tau_{1-2}$ от равновесного до максимального гигроскопического влагосодержания увлажнится прилегающий к нагелю слой древесины толщиной $\delta_{\text{мг}}$, то необходимое для этого количество влаги будет определяться из следующего выражения:

$$W_{\text{отн.мг.}} = \frac{m_{\text{вл.мг.}}}{m_{\text{сух}}} = \frac{m_{\text{вл}} + m_{\text{вл.р.}}}{m_{\text{сух}}} = W_{\text{отн}} + W_{\text{отн.р.}} = W_{\text{отн}} + \frac{m_{\text{вл}}}{\rho_{\text{сух}} F \delta_{\text{мг}}} \quad (3.117)$$

Из сопоставления выражений (3.113) и (3.117) можно получить формулу для определения толщины слоя древесины, увлажненного до максимального гигроскопического влагосодержания:

$$\delta_{\text{мг}} = \frac{\beta [P_{\text{нв}} - P_{\text{нс}}] \Delta\tau_{1-2}}{\rho_{\text{сух}} (W_{\text{отн.мг.}} - W_{\text{отн.р.}})} \quad (3.118)$$

На практике возможны два случая: 1) когда количество сконденсированной влаги мало и не достигается значения максимального гигроскопического влагосодержания; и 2) когда влага сконденсирована в избытке, значительно большем, чем $W_{\text{отн.мг.}}$. Ниже мы приведем расчетные результаты, характеризующие динамику влагопереноса в древесине для каждого из этих случаев.

В соответствии с принятым нами в предыдущем разделе [200,201] методом "микропроцессов" для математического моделирования тепломассопереноса в древесине нагельного соединения в форме болтовой стяжки, как и ранее, выделим вокруг болта кольцевую зону размером $\delta_l = R_l - R_0 < 0,5R_0$, для которой кольцевое сечение может считаться неограниченной пластиной. И в этих условиях краевая задача влагопроводности для выделенной зоны, по аналогии с задачей теплопроводности [201], может быть сформулирована следующим образом*.

* Для упрощения записи выкладок индекс "отн" временно опускаем.

$$\frac{\partial W_1(r, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \frac{\partial^2 W_1(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad \tau > 0; \quad R_0 \leq r \leq R_1, \quad (3.119)$$

$$W_1(r, \tau)|_{\tau=0} = W_{1.0}, \quad (3.120)$$

$$W_1(r, \tau)|_{r=R_0} = W_H, \quad (3.121)$$

$$W_1(r, \tau)|_{r=R_1} = W_p. \quad (3.122)$$

Здесь: k_1 – коэффициент влагопроводности в выделенной зоне, м²/с; (своеобразный коэффициент диффузии влаги в твердой фазе); W_H – относительная влажность слоя древесины, прилегающего к нагелю, кг влаги/кг сухого; W_p – относительная равновесная влажность древесины, кг влаги/кг сухого.

Введем в рассмотрение безразмерные комплексы:

$$U_1(\bar{r}, Fo_m) = \frac{W_1(r, \tau) - W_p}{W_p}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_0}; \quad Fo_m = \frac{k_1 \tau}{(R_1 - R_0)^2} \quad (3.123)$$

В итоге краевая задача (3.119)-(3.122) запишется так:

$$\frac{\partial U_1(\bar{r}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U_1(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_m > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1 \quad (3.124)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = U_{1.0}(\bar{r}) \quad (3.125)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=0} = U_H \quad (3.126)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (3.127)$$

И вновь, по аналогии с предыдущим разделом, решение краевой задачи (3.124)-(3.127) будем искать методом интегральных преобразований Лапласа [6]. И тогда, в области изображений получаем:

$$U_1(\bar{r}, s) = \frac{U_H}{S} ch(\sqrt{s} \cdot \bar{r}) - \frac{U_H}{S} \cdot \frac{ch\sqrt{s}}{sh\sqrt{s}} sh(\sqrt{s}\bar{r}) + \\ + \frac{sh(\sqrt{s}\bar{r})}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \cdot \int_0^1 U_{1.0}(\xi) sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} U_{1.0}(\xi) sh\sqrt{s}(\bar{r}-\xi) d\xi \quad (3.128)$$

Запись выражения (3.128) аналогична (3.32), следовательно, возвращение в область оригиналов приводит к записи, аналогичной (3.60):

$$U_1(\bar{r}, Fo_m) = U_H \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \int_0^1 U_{1.0}(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \quad (3.129)$$

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 массопроводности сформулируется следующим образом:

$$\frac{\partial U_2(\bar{r}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U_2(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_m > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq \frac{R_2 - R_1}{R_2}; \quad (3.130)$$

$$U_2(\bar{r}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = U_{2.0}(\bar{r})U_2(\bar{r}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = U_{2.0}(\bar{r}) \quad (3.131)$$

$$\frac{\partial^2 U_2(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = -Ki_{m,1} \frac{\partial^2 U_2(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = -Ki_{m,1} \quad (3.132)$$

$$U_2(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=1} = 0U_2(\bar{r}, Fo_m)|_{\bar{r}=1} = 0 \quad (3.133)$$

Эта краевая задача по своей математической формулировке идентична задаче (3.61)-(3.64). Поэтому и решение данной краевой задачи в области изображений будет идентично (3.75):

$$U_2(\bar{r}, s) = \frac{ch(\sqrt{s}\bar{r})}{ch\sqrt{s}} \left\{ \frac{Ki_{m,1}}{s\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} U_{2.0}(\xi) sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi \right\} - \quad (3.134)$$

$$- \frac{Ki_{m,1}}{s\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} U_{2.0}(\xi) sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi$$

$$- \frac{Ki_{m,1}}{s\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} U_{2.0}(\xi) sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi$$

Соответственно, после несложных, но громоздких преобразований, аналогичных выкладкам, изложенным в предыдущем параграфе мы опускаем, в области оригиналов можем записать:

$$U_2(\bar{r}, Fo_m) = Ki_{m,1} \left\{ (1-\bar{r}) - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1)\bar{r} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_m \right] \right\} + \quad (3.135)$$

$$+ 2 \int_0^1 U_{2.0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1)\bar{r} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_m \right] \int_0^1 U_{2.0}(\xi) \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1)\xi \right] d\xi$$

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 массопроводности (3.124)-(3.127) распространяется на две первые зоны, а задача (3.130)-(3.133) переходит на третье "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.

3.4. Численный эксперимент

Ниже приводятся результаты расчетов по полученным решениям краевых задач теплопроводности и влагопроводности.

На рисунке 3.9. приведены результаты расчетов по выражению (3.60) в виде кривых, иллюстрирующих изменение безразмерных температур по безразмерной координате в зависимости от безразмерного времени процесса нагревания слоев древесины от болта.

Интересно отметить, что в условиях анализируемого примера при зависимости $Fo=0,001$ профиль температур распространяется не по всей координате \bar{r} , а только на расстоянии равном 0,15, а при $Fo=0,1$ уже по всей координате до $\bar{r} = 1,0$.

Кривые рисунка 3.10 иллюстрируют динамику полей температур в древесине во втором мысленно выделенном слое, когда температурный профиль сформируется на весь первый слой и на расстоянии $\bar{r} = R_1$ возникнет градиент температур. Соответственно этому на данной границе сформируется тепловой поток от первого слоя ко второму. Величина этого потока будет характеризоваться соответствующим значением критерия Кирпичева. Расчеты выполнены по формуле (3.108).

Отметим неочевидный факт, что в координате $\bar{r} = 0$ угол наклона касательных к кривым имеет одинаковые значения, что соответствует одинаковым значениям критерия Кирпичева, а именно $Ki=0,1$.

Отметим также и то, что в условиях анализируемого примера при значении теплового числа Фурье, равного 0,001 тепловой фронт продвинулся на расстояние $\bar{r} = 0,1$ по безразмерной координате, а при $Fo=0,1$ (кривая 4) температурная граница достигла значения $\bar{r} = 1,0$ (т.е. физической координаты R_2).

Еще один пример численного расчета, на этот раз в физически размерных величинах приведен на рисунке 3.11.

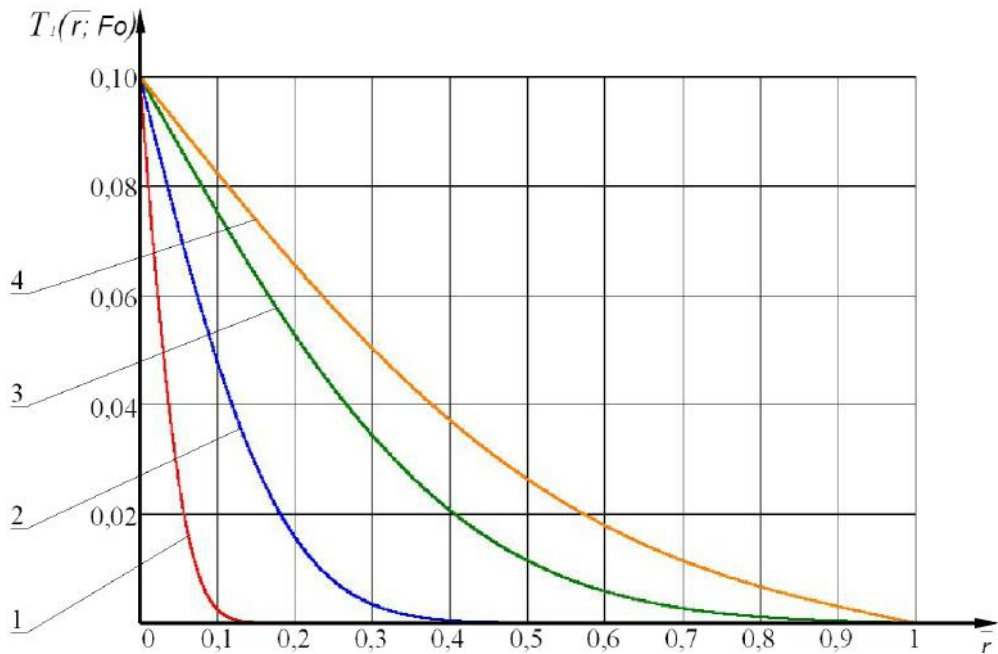


Рис. 3.9. Иллюстрация расчетов по уравнению (3.60)
Значения числа Фурье: 1) 0,001; 2) 0,01; 3) 0,05; 4) 0,1

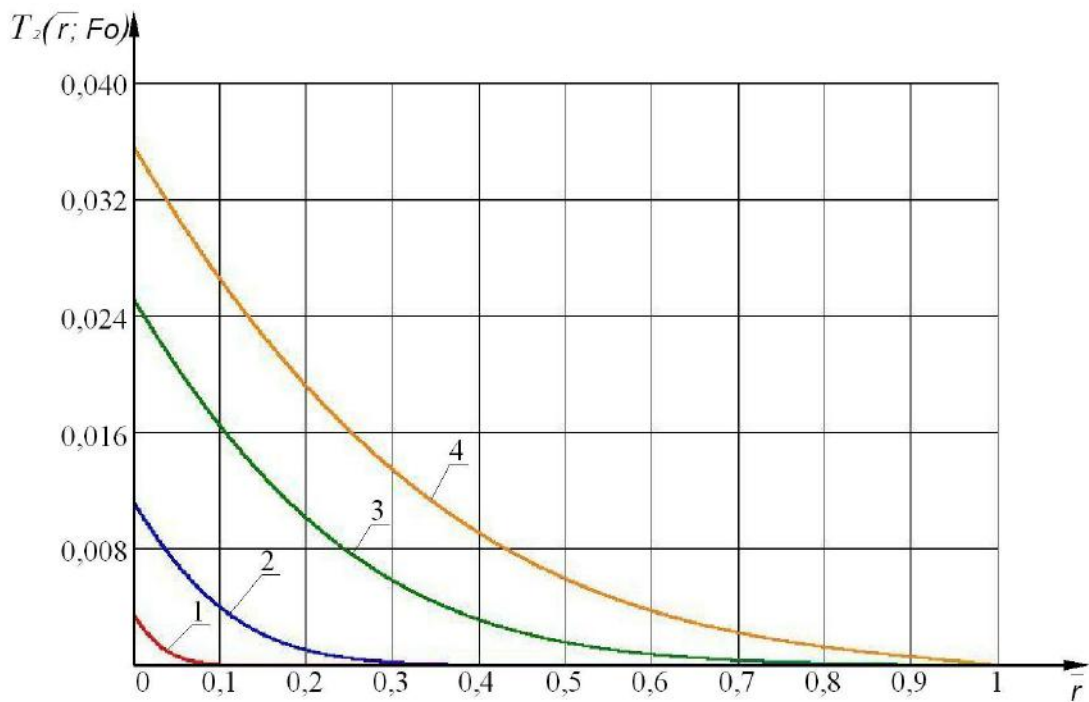


Рис. 3.10. Профили температур для второго кольца при $Ki=0,1$.
Значения числа Фурье: 0,001; 2) 0,01; 3) 0,05; 4) 0,1.

Расчеты выполнялись для древесины нагельного соединения, выполненного из сосны со следующими теплофизическими характеристиками[33]: плотность: $\rho=550 \text{ кг/м}^3$; теплоемкость $c=2510 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; теплопроводность $\lambda=0,17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; при этом скорость подъема температуры металла нагеля была $1,5 \text{ К/час}$.

Очевидна не только качественная адекватность разработанной математической модели тепловых процессов и алгоритма реализации модели реальным физическим явлениям. Об этом же свидетельствует и анализ данных метеонаблюдений (крива 2 рисунка 3.1).

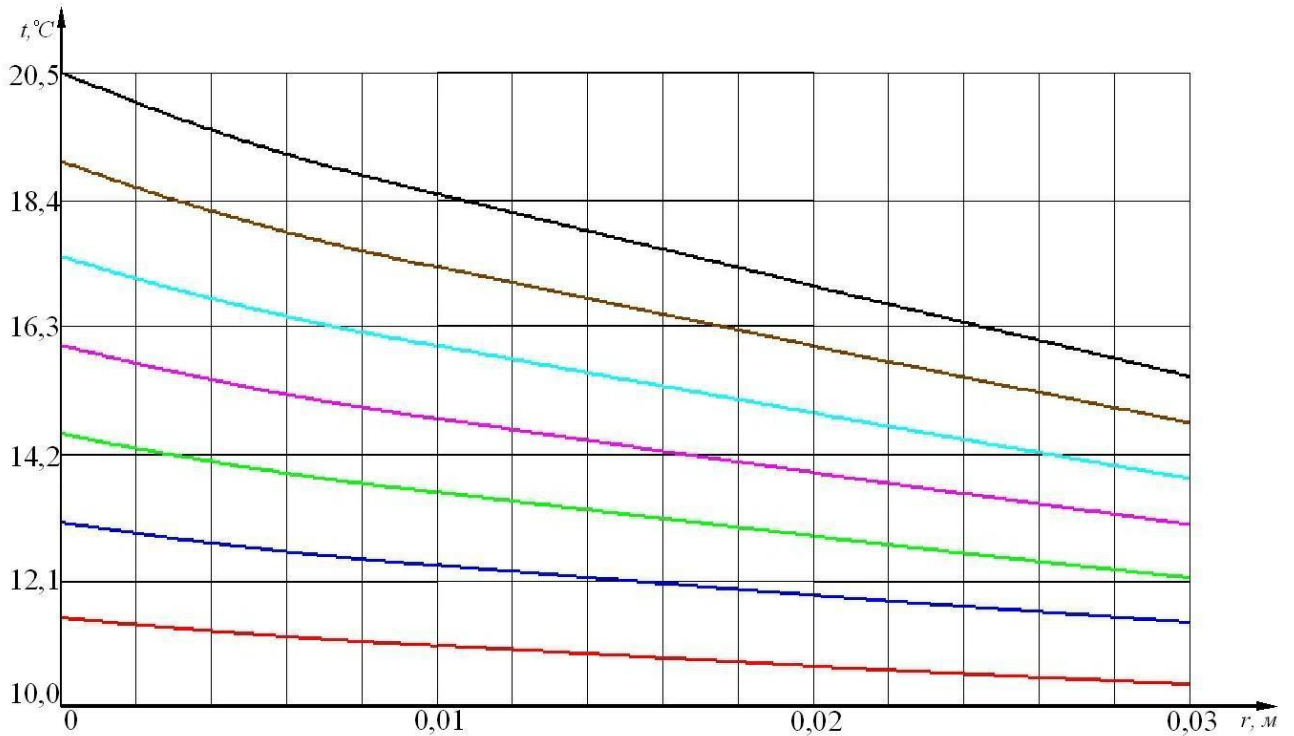


Рис. 3.11. Результаты расчетов теплопереноса в нагельном соединении в физических переменных

Далее излагаются результаты расчетов по выражениям (3.129) и (3.125), представляющих решение краевых задач влагопроводности.

При этом, как уже отмечалось ранее, на практике возможны 2 механизма: первый, когда количество сконденсированной на нагеле влаги не достигает максимального гигроскопического влагосодержания; и второй, когда влага сконденсирована в количестве, значительно превышающим максимальное - $W_{\text{отн. мг}}$. Расчеты выполнялись по выражению (3.129).

Результаты по первому механизму представлены на рисунке 3.12, а по второму – на рисунке 3.13.

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

Однако, для количественной оценки необходимо проведение экспериментальных исследований на модельных и натуральных образцах реальных нагельных соединений.

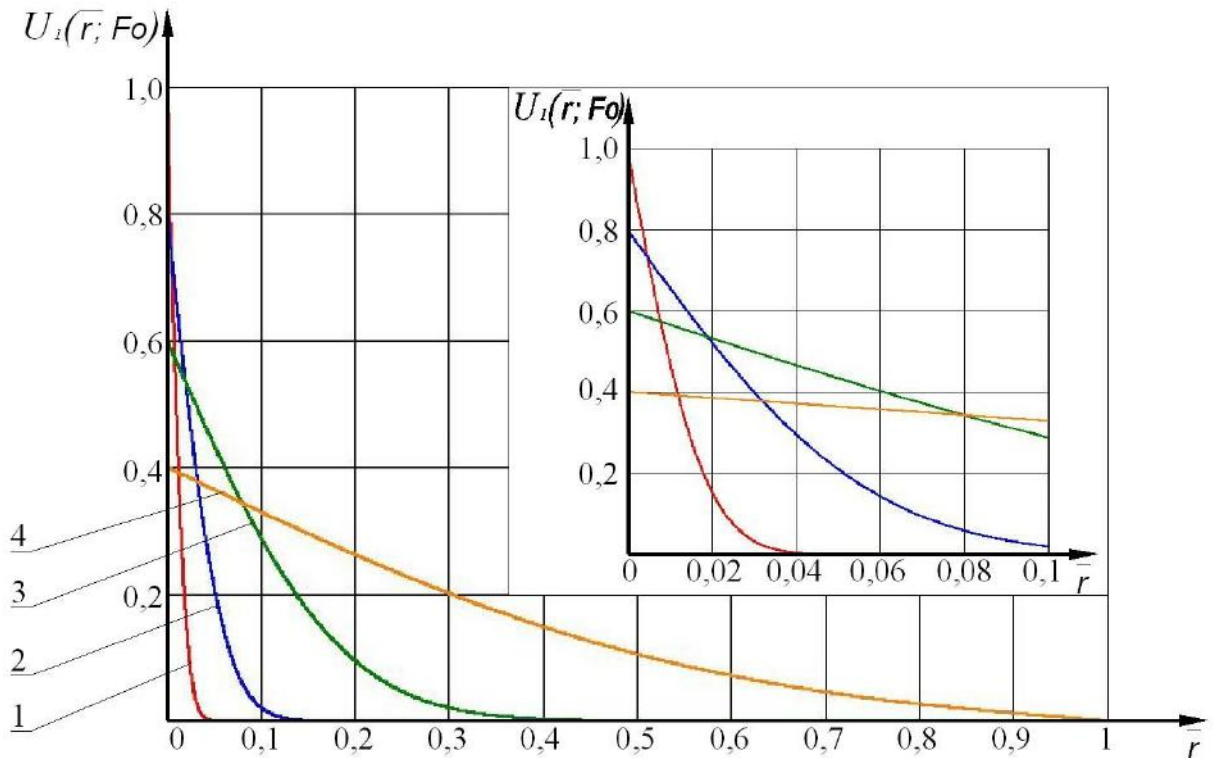


Рис. 3.12. Динамика полей безразмерных влагосодержаний в древесине при $W_n \leq W_{mz}$. $Fo_m = 1)$ 0,0001; 2) 0,001; 3) 0,01; 4) 0,1.

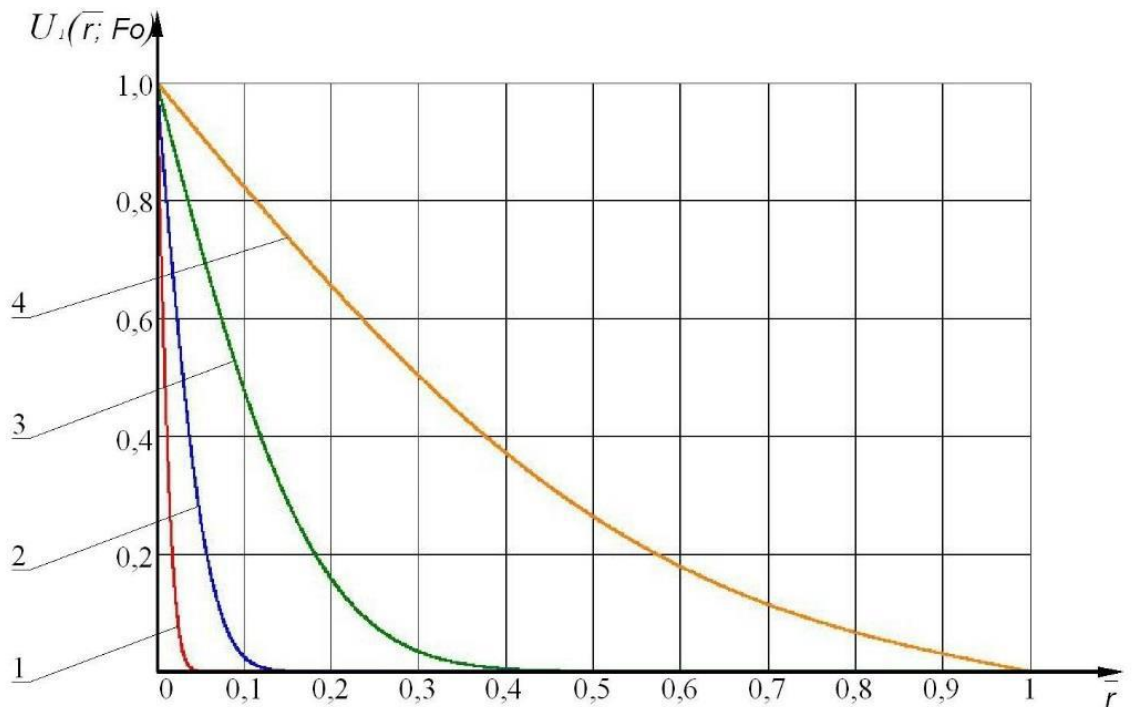


Рис.3.13. Динамика полей безразмерных влагосодержаний при $W_n > W_{mz}$. $Fo_m = 1)$ 0,0001; 2) 0,001; 3) 0,01; 4) 0,1.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В СОЕДИНЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО НАГЕЛЯ

4.1. Исследование кинетики процессов теплопереноса в древесине сосны при нагревании и охлаждении цилиндрического нагеля

Для проверки адекватности полученных решений (3.60) и (3.108), 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 плотностью $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$, теплоемкостью $c = 2510 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, теплопроводностью $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ помещался нагретый стальной болт, и через равные промежутки времени фиксировалось распределение температуры в древесине около болта с помощью тепловизора. Схема и фотография установки представлены на рисунке 4.1.

Измерения проводились при температуре воздуха в помещении $29 \text{ }^\circ\text{C}$ 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. 4.2) и построены кривые нагрева древесины при остывании болта в условиях естественной конвекции (рис. 4.3).

Интересно отметить, что характер полученных экспериментальных кривых практически точно совпадает с кривыми рисунка 3.5а, моделирующем физическую картину процессов теплопереноса в древесине нагельного соединения. Очевидно, что падение температуры вблизи болта сопровождается прогревом внутренних слоев вследствие действия градиента температурного поля.

В работе [201] приведены результаты численного расчета полей температуры в прилегающих к болту слоям древесины при повышении температуры болта на $1,5 \text{ К/час}$ (рис. 4.4).

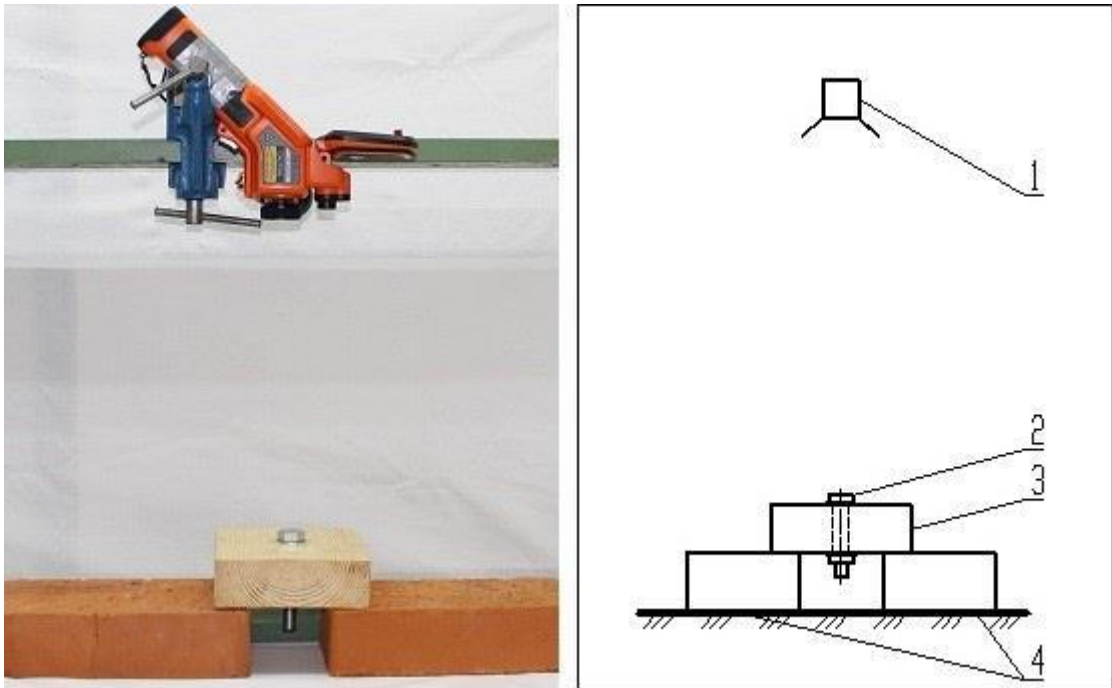


Рис. 4.1. Экспериментальная установка: 1 – тепловизор; 2 – болт М16; 3 – брусок 150×150×50 из сосны; 4 – опоры

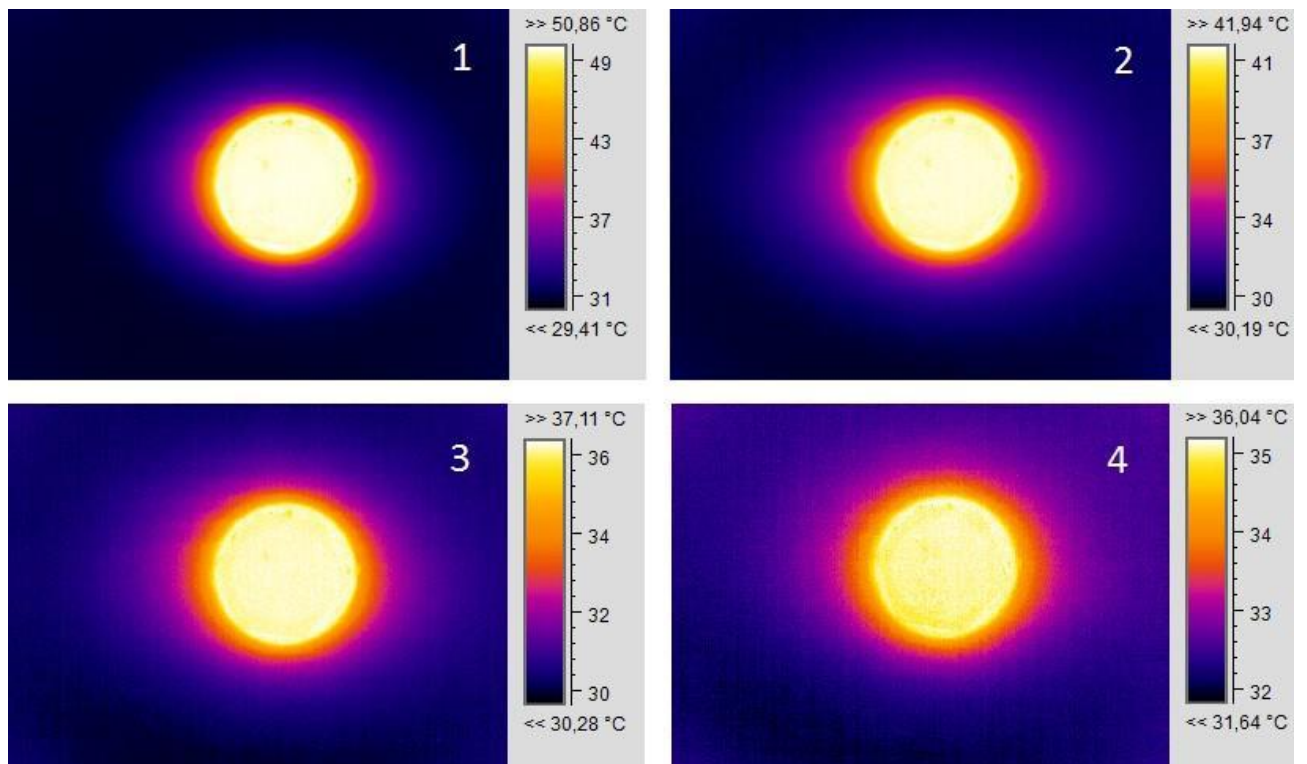


Рис. 4.2. Инфракрасные изображения нагельного соединения после нагрева болта: 1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 20 мин; 4 – 30 мин

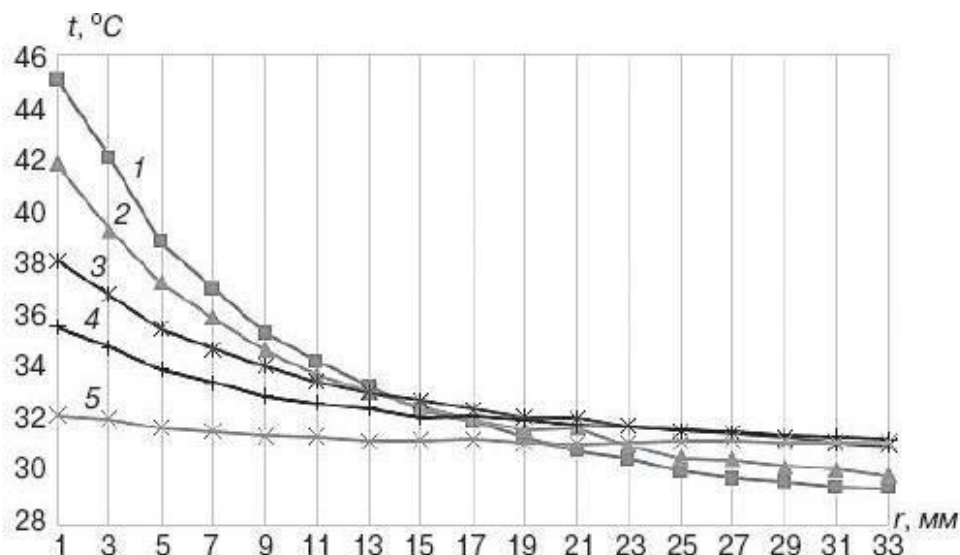


Рис. 4.3. Кривые нагрева древесины по направлению волокон: 1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 20 мин; 4 – 30 мин; 5 – 60 мин

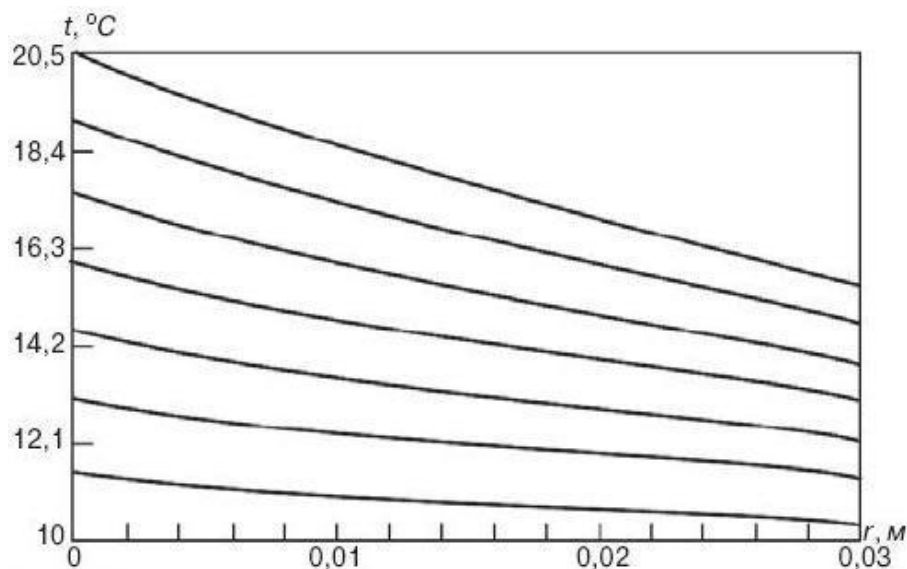


Рис. 4.4. Результаты расчетов теплопереноса в нагельном соединении в физических переменных

И вновь очевидно, что общий вид кривых, построенных по экспериментальным данным, совпадает с теоретическими расчетами. Это подтверждает адекватность предложенной расчетной методики реальным условиям процесса.

Вместе с тем, для проведения эксперимента, приближенного к реальным процессам, происходящим в нагельном соединении стропильной конструкции, необходимо знать, как изменяется температурно-влажностный режим чердачного помещения, а также температура поверхности кровельного листа.

За рубежом проводились эксперименты по изучению температурно-влажностного режима чердачного помещения в натуральных условиях в течение длительного периода, в качестве примера можно привести работы [145,146]. В

отечественной научной литературе таких экспериментальных данных не представлено. Для изучения реальных условий эксплуатации нагельных соединений стропильных конструкций в климатических условиях РФ требуется проведения натурного эксперимента по изучению изменения температурно-влажностного режима чердачного помещения в течение всего года.

Однако, эти исследования, имеющие, безусловно, большие перспективы, выходят за рамки настоящей диссертации.

4.2. Изучение кинетики сорбции влаги в древесине сосны

Все исследования были выполнены по методике, изложенной в п.2.2. Для исследований были выбраны образцы из сосны с площадью поверхности 10см². В качестве агрессивной среды приняты растворы серной кислоты различной концентрации: 0, 1, 10, 50 и 100 %. Предварительно взвешенные образцы помещали в емкости с растворами серной кислоты заданной концентрации на 30 суток, образцы находились над поверхностью растворов. Испытания проводились при постоянной температуре 20 °С. По завершению опыта, образцы взвесили, определили относительное изменение массы образцов (таблица 4.1), а растворы кислот оттитровали для определения изменения концентрации по методике, описанной в п. 2.2.3.

Таблица 4.1. -Изменение массы образцов из сосны

Концентрация раствора серной кислоты, %	Масса образца до испытания, г	Масса образца после испытания, г	Относительное изменение массы образца, %
0	0,880	0,995	13,1
1	1,205	1,380	14,5
10	1,010	1,165	15,4
50	1,145	1,250	9,2
100	1,060	1,070	0,9

Плотность растворов определяли с помощью ареометров по методике, представленной в п. 2.2.4.

Результаты исследований представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. - Изменение концентрации растворов серной кислоты в ходе проведения испытаний

Порода древесины	Концентрация H_2SO_4 до испытания, %	Концентрация H_2SO_4 после испытания, %	Относительное изменение концентрации, %
Сосна	0	0	0
	1	1,002	0,2
	10	10,05	0,5
	50	50,54	1,08
	100	100	0

Из таблицы видно, что концентрация кислоты в ходе проведения опыта изменяется незначительно.

На рис. 4.5 показана зависимость увеличения массы образцов от концентрации раствора серной кислоты.

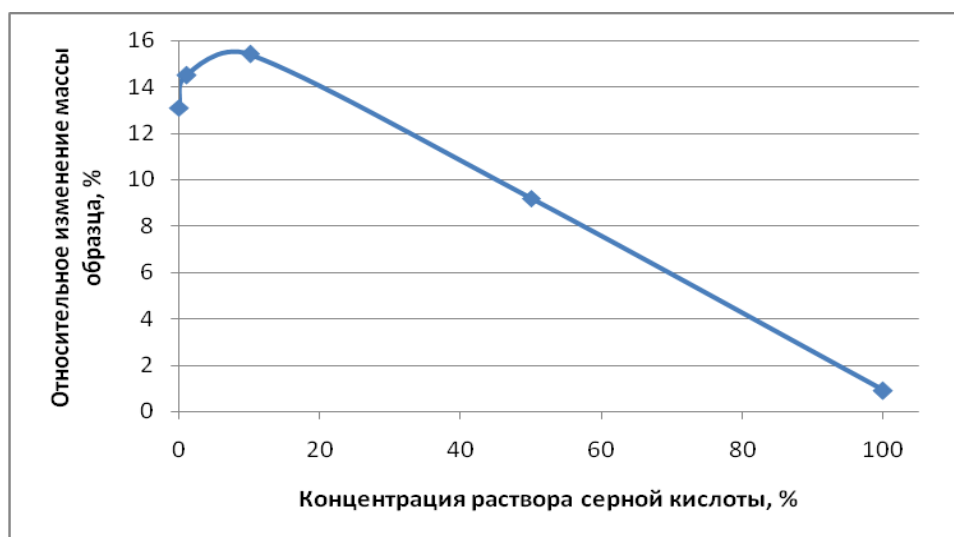


Рис. 4.5. Изменение массы образца сосны

Очевидно, что в емкостях с более концентрированными растворами кислоты образцы поглощают 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 (рис. 4.6), появляющихся вследствие повышенной относительной влажности воздуха.

После проведения испытаний образцы высушивались в сушильном шкафу до постоянной массы. Влажность древесины определяли по методике, описанной в п. 2.2.1.

а)



б)



в)



г)



д)



Рис. 4.6. Снимки образцов из сосны после выдержки в атмосфере растворов серной кислоты с концентрацией: а) 0 %; б) 1 %; в) 10 %; г) 50 %; д) 100 %

Результаты расчетов занесены в таблицу 4.3.

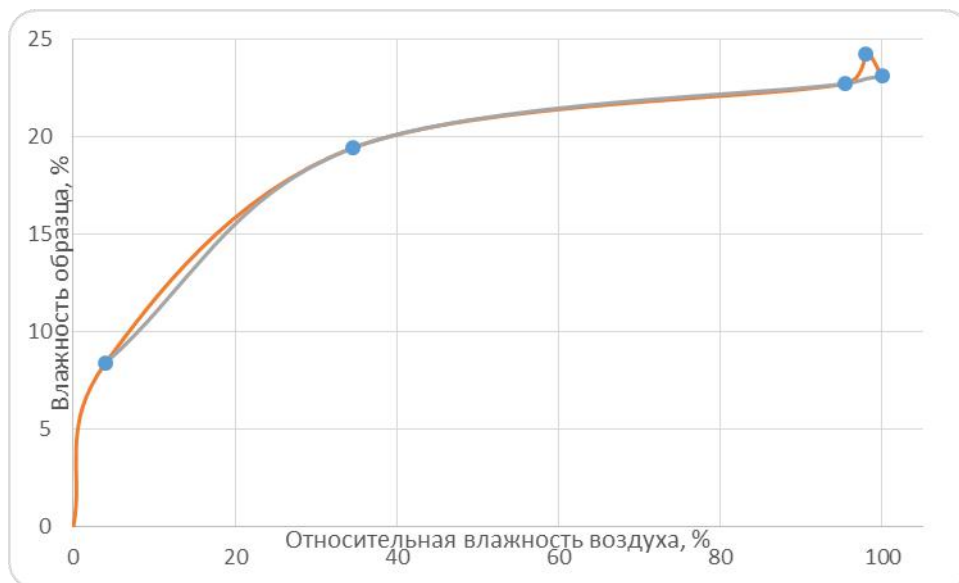


Рис. 4.7. Адсорбционная кривая образца из сосны при температуре 20 °С

Таблица 4.3. - Значения влажности образцов из сосны

Относительная влажность воздуха, %	Масса образца до высушивания, г	Масса образца после высушивания, г	Влажность образца, %
100	0,995	0,765	23,12
98	1,380	1,045	24,28
95,5	1,165	0,900	22,75
34,5	1,250	1,007	19,44
< 4	1,070	0,980	8,41

На рис. 4.7 приведены адсорбционные кривые образцов из сосны. Влажность воздуха над растворами серной кислоты определялась по таблице 4.4 при температуре 20 °С (ГОСТ 29244-91. «Пластмассы. Небольшие контейнеры для кондиционирования и испытания с использованием водных растворов для поддержания постоянного значения относительной влажности»).

На рис. 4.8 представлены адсорбционные кривые древесины при температуре 20 °С, 40 °С и 60 °С, построенные по данным диаграммы равновесной влажности древесины И.Н. Чулицкого (рис. 4.9) [91].

Анализ адсорбционных кривых, представленных на рис. 4.7 и рис. 4.8, показал, что полученные экспериментально значения влажности образцов из сосны больше теоретических в 4 и 3 раза для влажности воздуха 4 и 34,5 % соот-

ветственно. При значениях влажности выше 95 % разница в значениях теоретических и экспериментальных данных не превышает 1 %.

Таблица 4.4. - Относительная влажность воздуха над водными растворами серной кислоты при температуре от 5 до 50 °С

Концентрация H ₂ SO ₄ , % (по массе)	Плотность при 25 °С, г/см	Плотность при 23 °С, г/см	Относительная влажность, %, при температуре, °С											
			5	10	15	20	23	25	30	35	40	45	50	
5	1,03	1,0307	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
10	1,064	1,0648	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5
15	1,0994	1,1005	92,5	92,5	92,5	92	92	92	92,5	92,5	92,5	92	92	92
20	1,1365	1,1376	87,5	88	88	88	88	88	88	88	88	88,5	88,5	88,5
25	1,175	1,1764	81,5	82	82	82	82,5	82,5	82,5	82,5	83	83	83	83
30	1,215	1,2164	74	74,5	74,5	75	75	75	75,5	76	76	76,5	76,5	76,5
35	1,2563	1,2577	64,5	65	65,5	66	66,5	66,5	67	67,5	67,5	68	68,5	68,5
40	1,2991	1,3005	54	55	55,5	56	56,5	56,5	57	57,5	58	58,5	59	59
45	1,3437	1,3452	43	44	44,5	45	45,5	46	46,5	47	48	48,5	49	49
50	1,3911	1,3972	32,5	33	34	34,5	35	35	35,5	36,5	37	37,5	38,5	38,5
55	1,4412	1,4428	22,5	23	24	24,5	25	25	25,5	26	27	27,5	28	28
60	1,494	1,4957	14	14,5	15	15,5	16	16	17	17,5	18	18,5	19	19
65	1,549	1,5507	8	8	8,5	9	9	9,5	9,5	10	10,5	11	11,5	11,5
70	1,6059	1,6077	3,5	4	4	4	4,5	4,5	4,5	5	5	5,5	6	6

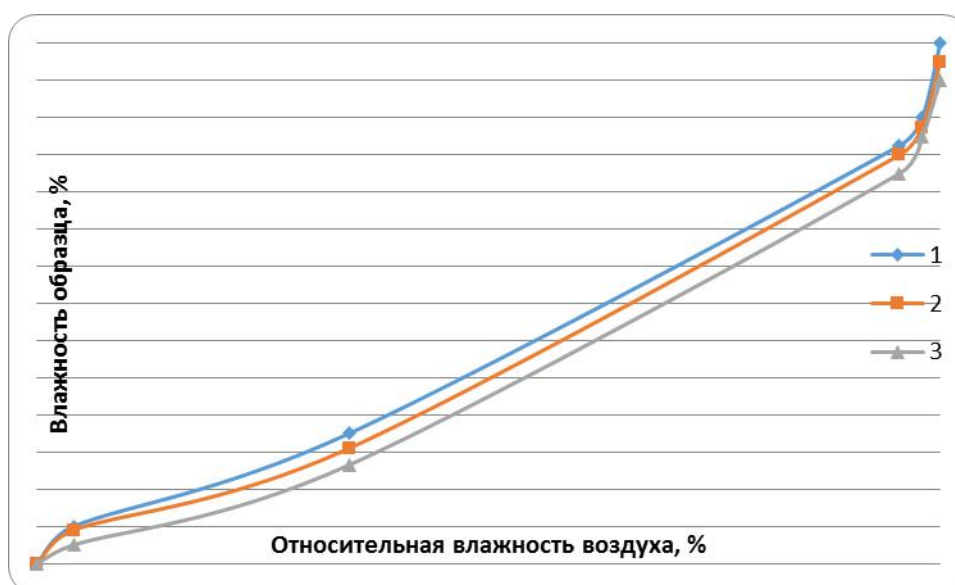


Рис. 4.8. Адсорбционная кривая древесины по данным расчетов из диаграммы Чулицкого И.Н. при температуре: 1 – 20 °С; 2 – 40 °С; 3 – 60 °С

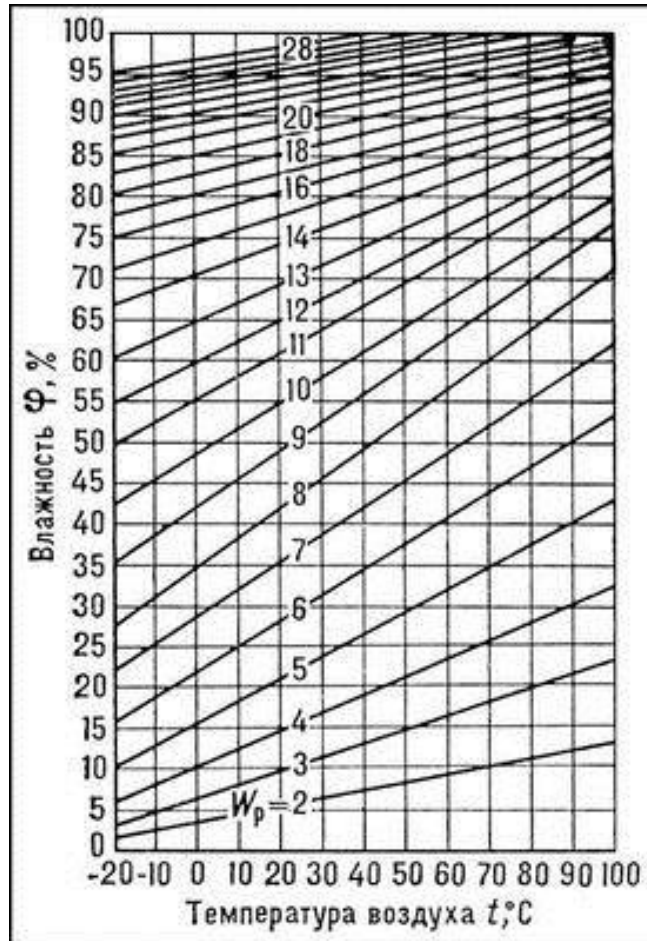


Рис. 4.9. Диаграмма равновесной влажности древесины Чулицкого И.Н. [8]

Сопоставляя результаты, приведенные на рисунках 4.7. и 4.8, необходимо отметить ряд принципиальных моментов.

Узкий диапазон расхождения кривых на рисунке 4.8 (изменение температуры воздуха с $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $60\text{ }^\circ\text{C}$, т.е. практически в 3 раза приводит к изменению влажности образца от 100% (при $\phi=5\%$) до 10% (при $\phi=95\%$) во всем диапазоне исследования.

Как известно по теории академика П.А. Ребиндера [89] характер адсорбционной кривой дает информацию о формах связи влаги с материалом. Доенные рисунка 4.7 показывают, что в условиях анализируемого примера в диапазоне $\phi=0\dots5\%$ в образце из сосны происходит сорбция влаги по механизму мономолекулярной адсорбции. В диапазоне $\phi\approx 5\dots30\%$ происходит полимолекулярная адсорбция. А в диапазоне $\phi\approx 35\dots95\%$ сорбция влаги осуществляется по механизму капиллярной конденсации. Близкий к линейному характер кривых рисунка 4.8 показывает на превалирование механизма капиллярной конденсации.

Кроме того, на наш взгляд, при принятии решений об использовании того или иного сорта древесины для проектирования и строительства производственных объектов целесообразно проведение лабораторных исследований равновесных свойств древесины.

4.3. Изучение кинетики и динамики процессов увлажнения древесины

Как уже отмечалось ранее, древесина представляет собой экологически чистый волокнистый материал органического происхождения, стойкий к воздействию химически агрессивных сред и обладающий хорошими теплоизоляционными свойствами [207]. Одним из наиболее важных физических свойств древесины является влажность, поскольку от нее зависят физико-механические свойства и качество древесины. Кроме того, взаимодействие древесины с водой определяет характер и закономерности процессов ее увлажнения и сушки, влажностных деформаций, замораживания и оттаивания, пропитки различными составами [80]. Для определения влажности обычно используют метод высушивания, описанный в п. 2.2.1.1. Данный метод позволяет достаточно точно рассчитать влажность древесины, но нужно учитывать, что процесс высушивания занимает весьма длительное время (8-10 ч). Значительно быстрее можно определить влажность древесины с помощью кондуктометрического электровлагомера, действие которого основано на зависимости электропроводности древесины от ее влажности [33]. Ниже показаны возможности прибора для исследования процесса влагопереноса при увлажнении образца из древесины. Для этих целей был изготовлен образец из древесины сосны в форме прямоугольной призмы с основанием размером 45×55 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. Для исключения прямого намокания образца дополнительно был изготовлен образец из древесины сосны так же в форме прямоугольной призмы, но меньшего размера (сечением 35×45 мм и высотой вдоль волокон 20 мм). Данный образец закрепили в таре с водой. После того, как малый образец полностью намок, сверху поместили подготовленный образец с отверстиями. Схема эксперименталь-

ной установки показана на рисунке 4.10. 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 4.11 в виде кинетических кривых увлажнения образца.

На основании показаний температуры и относительной влажности воздуха внутри помещения определили равновесную влажность образца по диаграмме Н.Н. Чулицкого [91], которая составила 9,2 %. Первоначальная влажность образца, определенная с помощью влагомера, была ниже данного значения, что, в принципе, возможно, учитывая размеры образца [152]. Это значение составляло: $W_p = 6,8 \%$.

После того, как образец помещался на мокрую древесину, начинался процесс переноса влаги снизу вверх вдоль образца. Сначала влагой стали заполняться пустоты древесины, после чего вода начинала проникать и в стенки клеток. Предельное количество воды, которое может поглотить древесина, складывается из максимального количества связанной и свободной влаги. Наибольшее количество связанной влаги определяется точкой насыщения волокон, а количество свободной влаги зависит от объема пустот. Четкой границы между рассматриваемыми фракциями воды провести невозможно [33], поэтому вопрос о том, какое количество связанной и свободной влаги впитал в себя образец, в данной работе не рассматривался.

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 комнатных условиях предел насыщения клеточных стенок практически равен пределу гигроскопичности [91]. Согласно инструкции к прибору известно, что за пределами точки насыщения волокон измерения, сделанные влагомером, теряют в точности. 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. Дальнейшие пока-

затели влажности были существенно ниже. Это значение и было принято в качестве максимального гигроскопического – $W_{мг}$.

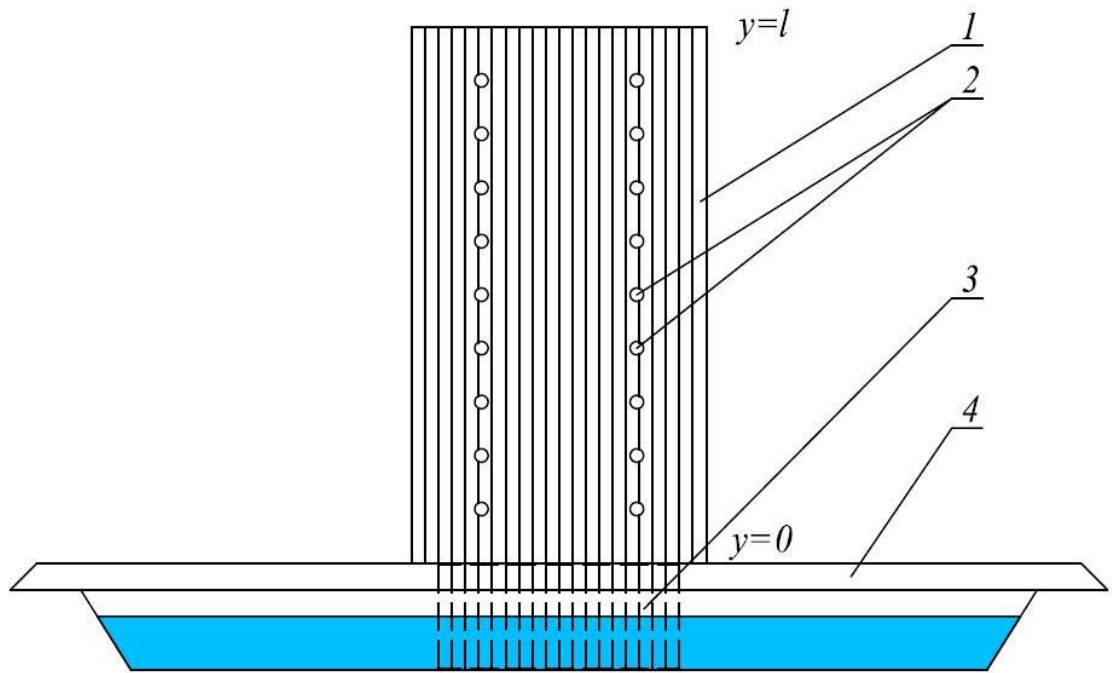


Рис. 4.10. Схема экспериментальной установки: 1 – исследуемый образец, 2 – места установки игл влагомера, 3 – влажный образец, 4 – ёмкость с водой

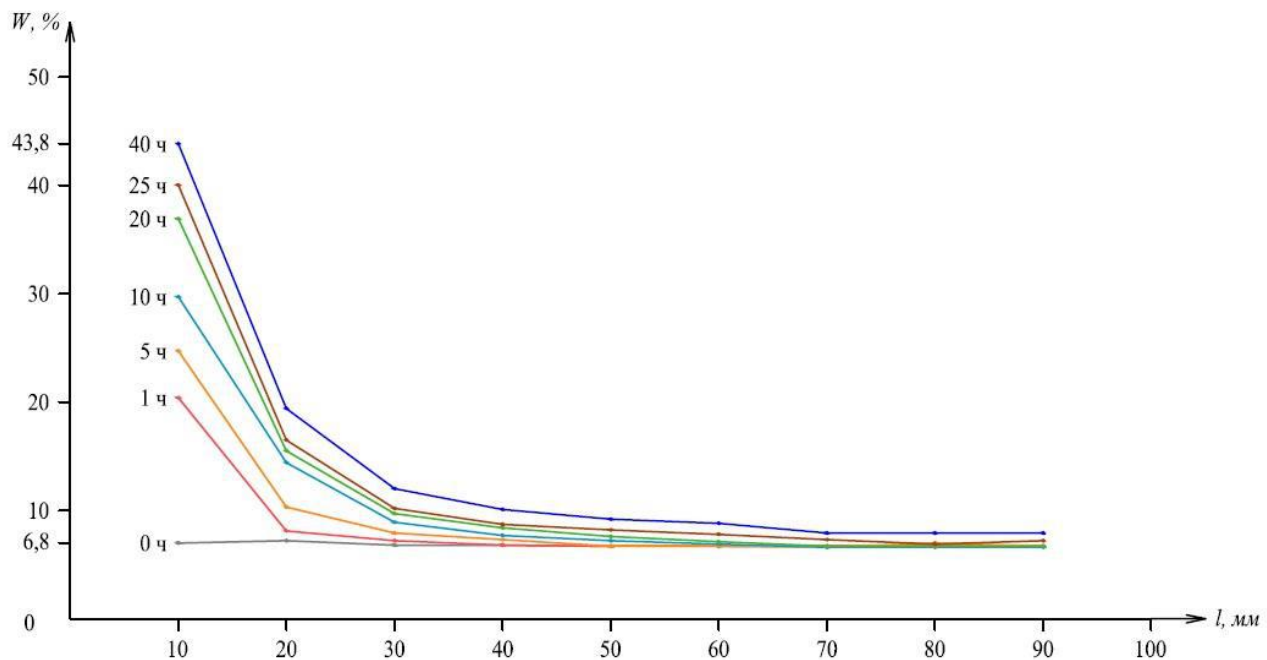


Рис. 4.11. Влажность древесины на расстояниях 10-90 мм от нижнего края образца

Некоторые результаты расчета по выражению (3.108) для рассматриваемого образца древесины приведены на рисунке 4.12. Кривые рисунка иллюстрируют изменение влажности по координате \bar{y} в безразмерном виде.

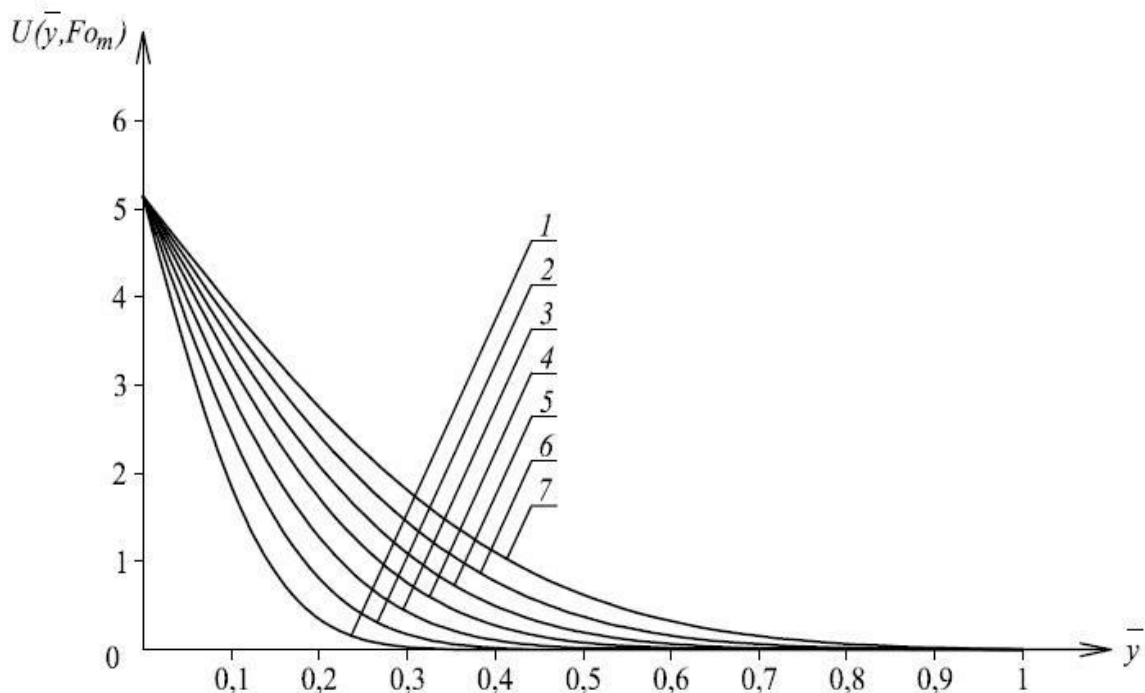


Рис. 4.12. Динамика полей безразмерных влагосодержаний при значениях массообменного критерия Фурье Fo_m : 1 – 0,006; 2 – 0,01; 3 – 0,015; 4 – 0,0215; 5 – 0,029; 6 – 0,0388; 7 – 0,052

По разработанной выше математической модели методом решения обратной задачи массопроводности было определено значение коэффициента влагопроводности древесины по следующей формуле:

$$k = \frac{Fo_m \cdot l^2}{\tau} \quad (4.1)$$

В формуле (4.1) значение массообменного критерия Фурье Fo_m принимается для того момента времени, при котором градиент влагосодержания возникает на определенной координате \bar{y} .

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

Данные проведенных экспериментальных исследований, полученные по предложенной методике, показывают возможность определения массопроводных характеристик древесно-волоконистых материалов (максимальной гигроскопической и равновесной влажности, коэффициента влагопроводности). Принципы методики могут быть использованы для исследования массопроводных характеристик волоконистых, тканых и нетканых материалов не только для текстильной и легкой промышленности, но также пищевой, строительной и других.

4.4. Пример практического расчета тепломассопереноса при конденсации и испарении влаги [203]

В рассмотренных выше разделах диссертации по моделированию тепло-массообменных процессов в нагельных соединениях элементов конструкций из древесины приведены постановка и решение краевых задач теплопроводности и массопроводности (диффузии влаги) в слоях древесины при циклических изменениях температурно-влажностного режима среды эксплуатации. Получены решения соответствующих задач. В настоящем разделе на базе полученных решений показан конкретный пример применения разработанных расчетных методик и определены пути практической реализации полученных результатов.

Кинетика конденсации (испарения) влаги определяется соотношением:

$$\frac{dm_{\text{вл}}(\tau)}{F d\tau} = (\pm)\beta[P_{\text{н}} - P_{\text{в}}] \quad (4.2)$$

Здесь: $m_{\text{вл}}(\tau)$ – количество свободной влаги, конденсированной в нагель, или испаряемой из него, кг; F – площадь поверхности нагеля, м²; β – коэффициент массоотдачи, кг/(м²·с·Па); $P_{\text{н}}, P_{\text{в}}$ – соответственно, парциальное давление насыщенного водяного пара и давление пара в воздухе при температуре нагеля, Па.

Количество влаги, сконденсированной в нагель за время $\Delta\tau_{1-2}$, определяется выражением:

$$\Delta m_{\text{вл}} = \beta F (P_{\text{нв}} - P_{\text{нс}}) \Delta\tau_{1-2} \quad (4.3)$$

Здесь: $P_{нв}, P_{нс}$ – соответственное, парциальное давление насыщенного водяного пара при достижении температуры «точки росы», и при окончании процесса охлаждения, Па.

При этом для вычисления величины толщины слоя древесины, увлажненного до максимально гигроскопического влагосодержания, можно записать:

$$\delta_{мг} = \frac{\beta[P_{нв} - P_{нс}] \Delta\tau_{1-2}}{\rho_0 (W_{мг} - W_p)} \quad (4.4)$$

Здесь: $W_{мг}, W_p$ – соответственно, максимальное гигроскопичное влагосодержание древесины, равновесное влагосодержание, кг_{влаги}/кг_{сухой} древесины; ρ_0 – плотность сухой древесины, кг/м³.

Сконденсированная в месте контакта нагеля и древесины влага начинает диффундировать в близлежащие слои древесины. Этот процесс моделируется краевой задачей массопроводности, изложенной выше. Решение данной задачи в безразмерных переменных определяется следующим выражением, характеризующим динамику профилей влагосодержаний в слоях древесины (3.129):

$$U(\bar{r}, Fo_m) = U_H \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \int_0^1 U_0(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \quad (4.5)$$

Здесь: $\bar{r} = r/(R_1 - R_6)$ – безразмерная координата, отмеряемая от нагеля вглубь древесины, м; $Fo_m, U(\bar{r}, Fo_m)$ – безразмерные комплексы определяемые выражениями:

$$Fo_m = k \cdot \tau / (R_1 - R_6)^2; \quad (4.6)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m) = [W(r, \tau) - W_p] / W_p. \quad (4.7)$$

Кинетика процесса изменения содержания свободной влаги в месте контакта нагельного соединения может быть представлена уравнением вида:

$$\frac{dm_{вл}(\tau)}{F d\tau} = k \rho_0 \left. \frac{\partial W_1(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R_6} \quad (4.8)$$

В безразмерном виде это уравнение запишется следующим образом:

$$\frac{dM_{вл}(Fo_m)}{dFo_m} = \left. \frac{\partial U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=0} \quad (4.9)$$

Здесь: $M_{\text{вл}}(Fo_m)$ – безразмерная величина, определяющая долю свободной (избыточной) влаги в нагельном соединении по отношению к максимальной гигроскопической, определяется как:

$$M_{\text{вл}}(Fo_m) = \frac{m_{\text{вл}}(\bar{r})}{F(R_1 - R_0)\rho_0 W_p} \quad (4.10)$$

Для определения явного вида функции $M_{\text{вл}}(Fo_m)$ продифференцируем (4.7) по \bar{r} и найдем значение производной при $\bar{r}=0$:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=0} = & -U_H \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + \\ & + 2\pi \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot \cos(\pi m \bar{r}) \int_0^1 U_0(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \\ & + 2\pi \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot \cos(\pi m \bar{r}) \int_0^1 U_0(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Подстановка полученного выражения в (4.9) приводит к следующей записи:

$$\begin{aligned} \frac{dM_{\text{вл}}(Fo_m)}{dFo_m} = & -U_H \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + \\ & + 2\pi \sum_{m=1}^{\infty} m \int_0^1 U_0(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Интегрирование данного уравнения в пределах от 0 до Fo_m и от $M_{\text{вл}}(0)$ до $M_{\text{вл}}(Fo_m)$ позволяет получить следующую зависимость для расчета кинетики "исчерпывания" влаги в нагельном соединении:

$$\begin{aligned} M_{\text{вл}}(Fo_m) = & M_{\text{вл}}(0) - U_H \cdot \left\{ Fo_m + \frac{2}{\pi^2} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} [1 - \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m)] \right\} + \\ & + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} [1 - \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m)] \cdot \int_0^1 U_0(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \end{aligned} \quad (4.13)$$

На рисунке представлены результаты расчетов по выражению (4.13). Интересно отметить влияние начального распределения влагосодержаний в древесине на кинетику удаления свободной влаги. Расчеты выполнены для трех возможных случаев:

$$\left. \begin{aligned} U_0(\xi) &= 1 \\ U_0(\xi) &= 1 - \xi \\ U_0(\xi) &= 1 - \xi^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

Наступающее утро, как правило, приносит повышение температуры воздуха и, следовательно, приводит к снижению парциального давления водяного пара.

Кинетика испарения влаги определяется уравнением (4.2), которое в безразмерном виде может быть записано следующим образом:

$$\frac{dM_{\text{вп}}(Fo_m)}{dFo_m} = -Sh \cdot K_M K_W \frac{\Delta P(Fo_m)}{T(Fo_m)} \quad (4.15)$$

Здесь: $Sh = \beta \cdot (R_1 - R_6)/k$ – безразмерный комплекс, аналог критерия Шервуда, характеризующий соотношение потоков влаги, испаряемой из нагеля, к потоку влаги, проводимой внутрь древесины посредством влагопроводности; K_M, K_W – размерные коэффициенты:

$$K_M = \frac{M_{\text{вп}}}{R_r} = \frac{18}{8314} = 2.165 \cdot 10^{-3}, (\text{кг} \cdot \text{К})/\text{Дж}, \quad (4.16)$$

$$K_W = \frac{F(R_1 - R_6)}{m_{\text{вп.0}}}, \text{м}^3/\text{кг}. \quad (4.17)$$

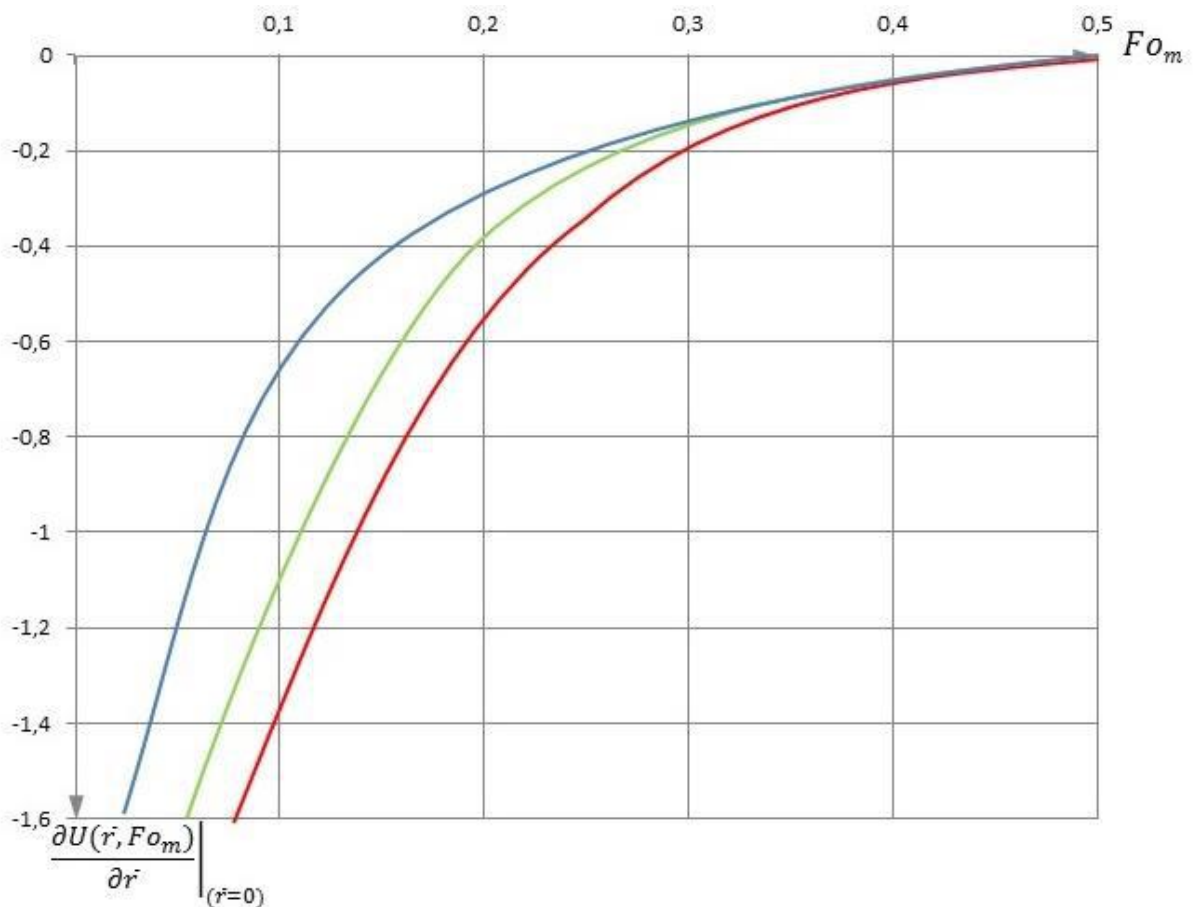


Рис. 4.13. Изменение безразмерного градиента влагосодержаний в нагеле в зависимости от массообменного критерия Фурье при $U_0(\xi): 1) 1; 2) 1 - \xi; 3) 1 - \xi^2$

Интегрирование (4.15) приводит к следующему выражению для описания кинетики удаления избыточной влаги из нагельного соединения:

$$M_{\text{вл}}(Fo_m) = M_{\text{вл},0} - Sh \cdot K_M K_W \cdot \int_0^{Fo_m} \frac{\Delta P(Fo_m)}{T(Fo_m)} dFo_m \quad (4.18)$$

И, в заключение, приведем конкретный пример расчета, иллюстрирующий возможности разработанного математического описания процессов тепло-массообмена и предлагаемой методики расчета.

Вновь обращаемся к рисунку 3.1., где воспроизведен фрагмент статистических наблюдений за температурно-влажностными характеристиками воздуха в Йошкар-Оле в период с 15.00 17.07.12 по 6.00 19.07.12. Из графиков этого рисунка следует, что в период с 21.00 17.07.12 до 12.00 18.07.12 в регионе г. Йошкар-Ола происходило изменение тепловлажностных параметров воздушной среды, при этом температуры сухого и влажного термометров были равны, т.е. остывание воздуха происходило при $\phi=100\%$. Следовательно, охлаждение воздуха от температуры $16,5^\circ\text{C}$ до 13°C сопровождалось выпадением влаги и ее конденсацией на поверхности нагеля.

Соответствующие этим температурам значения парциальных давлений насыщенного водяного пара, определяются по формуле [205] как:

$$P_{\text{н}} = 617,74 \exp\left(\frac{17,25t_{\text{вм}}}{238+t_{\text{вм}}}\right) \quad (4.19)$$

Отсюда:

$$P_{\text{нв}}(16,5) = 1890 \text{ [Па]}; P_{\text{нс}}(13) = 1509 \text{ [Па]} \quad (4.20)$$

Полагаем в первом приближении, что для коэффициента массоотдачи в газовой фазе в условиях естественной конвекции может быть принято условие [190]:

$$Sh = 2 \rightarrow \beta^* = \frac{2D}{R_1 - R_6} \quad (4.21)$$

Здесь: $D = 2 \cdot 10^{-5}$ – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$; $R_1 - R_6 = 10 \cdot 10^{-3}$ – характерный размер, м.

Перевод к единицам измерений формулы (4.4) осуществляется следующим образом:

$$\beta = \beta^* \frac{M_{в.п.}}{RT} \quad (4.22)$$

Здесь: $M_{в.п.}=18$ – молекулярная масса водяного пара, кг/кмоль; $R=8314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·кмоль); T –температура, К.

$$\beta = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{18}{8314 \cdot 283} = 3,06 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{кг}}{(\text{м}^2 \text{Па} \cdot \text{с})} \right]. \quad (4.23)$$

В соответствии с этим, определяем удельное количество влаги сконденсированной на нагеле за 15 часов:

$$\frac{m_{в.л}}{F} = \beta [P_{нв} - P_{нс}] \cdot \Delta \tau_{1-2} = 3,06 \cdot 10^{-8} [1890 - 1509] \cdot 15 \cdot 3600 = 0,63 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right]. \quad (4.24)$$

И, поскольку, в качестве примера рассматривается нагель в форме болта с размерами $d \times H=40 \times 100$ мм, то количество конденсирующейся влаги определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} m_{в.л} &= 0,63 \cdot \pi \cdot d \cdot H = \\ &= 0,63 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 7,91 \cdot 10^{-3} [\text{кг}]. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Сконденсированная влага добавляется к равновесной (деловой, отпускной) влаге, имеющейся в древесине, и сорбируется близлежащим к нагелю слоем древесины толщиной $\delta_{м.г.}$.

Это значение влажности нормировано [205] и находится в пределах:

$$W_p = 0,11 \div 0,22. \quad (4.26)$$

И, опять-таки, в качестве примера, выбираем среднее значение из этого диапазона: $W_p=0,165$ [кг/кг].

Полагая, из данных предварительных экспериментов, что набухание поверхностного слоя древесины происходит за время равное одному часу, по формуле (4.6) определяем размер зоны максимального гигроскопического влагосодержания:

$$\delta_{м.г.} = \frac{3,06 \cdot 10^{-8} \cdot 381 \cdot 3600}{550(0,333 - 0,165)} = 0,45 \cdot 10^{-3} [\text{м}]. \quad (4.27)$$

Объем этого слоя будет равен:

$$\begin{aligned} V_{сл} &= F \cdot \delta_{м.г.} = \pi \cdot d \cdot H \cdot \delta_{м.г.} = \\ &= 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} = 5,65 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3]. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Соответственно, масса сухого слоя и влаги в нем в условиях равновесия, определяются как:

$$m_{\text{сух}} = V_{\text{сл}} \cdot \rho_0 = 5,65 \cdot 10^{-6} \cdot 550 = 3,1 \cdot 10^{-3} [\text{кг}] \quad (4.29)$$

и

$$m_{\text{вл.р.}} = W_p \cdot m_{\text{сух}} = 0,165 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} = 0,512 \cdot 10^{-3} [\text{кг}]. \quad (4.30)$$

Определяем общее количество влаги в нагеле, добавляя сконденсированную воду:

$$m_{\text{вл.общ.}} = m_{\text{вл.р.}} + m_{\text{вл}} = 0,512 \cdot 10^{-3} + 7,91 \cdot 10^{-3} = 8,42 \cdot 10^{-3} [\text{кг}]. \quad (4.31)$$

Общая влажность прилегающего к нагелю слоя будет:

$$W_{\text{общ}} = \frac{8,42 \cdot 10^{-3}}{3,1 \cdot 10^{-3}} = 2,72 [\text{кг/кг}]. \quad (4.32)$$

Вновь обращаемся к литературным источникам и определяем [206], что в зависимости от сорта древесины значение максимальной гигроскопической влажности колеблется в пределах 20-30%. Как и ранее, выберем среднее значение и выразим его в относительных концентрациях:

$$W_{\text{м.г.}} = \frac{0,25}{1-0,25} = 0,333 [\text{кг/кг}]. \quad (4.33)$$

Очевидно, что в рассматриваемый временной период (15 часов) в месте контакта "нагель-древесина" конденсируется количество влаги, многократно превышающее максимальное гигроскопическое значение.

Продолжим оценку процессов массопереноса, протекающих в нагельном соединении. В соответствии с рисунком 3.1 с 12.00 18 июля начинается подъем температуры воздуха, однако, его средняя температура в течение последующих 15 часов остается равной 14,5°C, а относительная влажность $\varphi=84\%$.

Удельное количество влаги, испарившейся из места контакта нагеля и древесины, по аналогии с 4.24 и 4.25 определится как

$$\frac{m_{\text{вл.исп.}}}{F} = 3,06 \cdot 10^{-8} (1509 - 1397) \cdot 15 \cdot 3600 = 0,185 [\text{кг/м}^2]. \quad (4.34)$$

Здесь: 1397 – парциальное давление водяного пара в воздухе при $\varphi=84\%$, Па.

И тогда, физическое количество испарившейся влаги будет:

$$m_{\text{вл.исп.}} = 0,185 \cdot 12,56 \cdot 10^{-3} = 2,32 \cdot 10^{-3} [\text{кг}]. \quad (4.35)$$

Оставшееся количество влаги в соединении:

$$m_{\text{вл.ост.}} = m_{\text{вл.общ.}} - m_{\text{вл.исп.}} = (8,42 - 2,32) \cdot 10^{-3} = 6,1 \cdot 10^{-3} [\text{кг}]. \quad (4.36)$$

И, следовательно, через 15 часов испарения влаги в нагеле остается влага в концентрации, превышающей максимальное гигроскопическое влагосодержание:

$$W = \frac{m_{\text{вл.ост.}}}{m_{\text{сух}}} = \frac{6,1 \cdot 10^{-3}}{3,1 \cdot 10^{-2}} = 1,97 \gg 0,333 \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right]. \quad (4.37)$$

Следующим этапом определим количество продиффундированной влаги от нагеля в слой древесины. Для этого обращаемся к формулам (4.30) и (4.31). Среднее значение коэффициента массопроводности можно принять равным [33]: $k_1 = 5,55 \cdot 10^{-10} [\text{м}^2/\text{с}]$. Определяем среднее значение массообменного числа Фурье к моменту времени 03.00 19.07.12:

$$Fo_m = \frac{k \cdot \tau}{(R_1 - R_6)^2} = \frac{5,55 \cdot 10^{-10} \cdot 15 \cdot 3600}{(10 \cdot 10^{-2})^2} = 0,3. \quad (4.38)$$

В соответствии с этим, имеем следующее значение безразмерного градиента концентраций для $Fo_m=0,3$ равное:

$$\left. \frac{\partial U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=0} = -0,1. \quad (4.39)$$

Определим максимальное безразмерное влагосодержание в соответствии с выражением (4.10):

$$M_{\text{вл.}}(Fo_m)|_{Fo_m=0} = \frac{m_{\text{вл.общ.}}}{F(R_1 - R_6)\rho_0 \cdot W_p} = \frac{8,42 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-2} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-2} \cdot 550 \cdot 0,165} = 0,74. \quad (4.40)$$

С учетом (4.38) и (4.39) из (4.13) получаем:

$$M_{\text{вл.}}(Fo_m)|_{Fo_m=0,3} = 0,74 - 0,3 \cdot 0,1 = 0,71. \quad (4.41)$$

И тогда, количество влаги, оставшееся в нагеле после 15 часов испарения и диффузии, запишется следующим образом:

$$m_{\text{вл.н.}} = 0,71 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-2} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-2} \cdot 550 \cdot 0,165 = 8 \cdot 10^{-3} \quad (4.42)$$

Обращаем внимание на тот факт, что за время второго этапа количество испарившейся влаги более чем на порядок превысило количество влаги, продиффундировавшей от нагеля вглубь древесины. При этом оставшееся количество

влаги ($8 \cdot 10^{-3}$ [кг]) более чем на порядок превышало максимальное гигроскопическое ($0,333 \cdot 10^{-3}$ [кг]).

В свою очередь, повышение влагосодержания в древесине нагельного соединения неизбежно приводит к появлению грибковых микроорганизмов и последующей биокоррозии; об этом же убедительно свидетельствуют данные рисунка 4.5.

Отметим и еще одно обстоятельство. Приведенные в настоящем разделе диссертации расчеты выполнены для осредненных значений равновесной влажности ($W_p=16,5$ %) и максимального гигроскопического влагосодержания ($W_{м.г.}=33,3$ %) они опубликованы в [202.203]. Приведенные в 4.3 данные показали, что для исследованного образца из сосны имеем $W_p=6,8$ % и $W_{м.г.}=43,8$ %. Однако полагаем, что принципиального значения для выполнения модельных расчетов этот факт не имеет.

4.5. Техничко-экономическое обоснование применения зданий из деревянного каркаса в агрессивных средах (на примере отделочного производства текстильного предприятия)

При эксплуатации зданий с агрессивными средами происходит накопление вредных веществ телом несущих и ограждающих конструкций, причем чем массивнее конструкция, тем больше она впитает вредных веществ. После завершения срока эксплуатации появляется необходимость утилизации этих конструкций, поэтому использования лёгких и эффективных конструкций в зданиях с агрессивными средами выгодно не только в процессе строительства, но и после завершения эксплуатации здания.

Анализ результатов натурных обследований, проектных материалов и экспертный опрос специалистов позволяет заключить, что интенсивному воздействию агрессивных, в том числе хлоридсодержащих, сред подвергается до 75 % инженерных конструкций предприятий текстильной промышленности [208]. Отделка, а именно крашение текстильных изделий (ткани, пряжа, волокно, трикотаж, швейные нити) является одним из основных этапов отделочного производства текстильной продукции. В процессе мокрой обработки суровых тканей

используются растворы кислот, окислителей и органических веществ. Наличие большого числа циклов влажно-тепловых обработок (пропитка, запаривание, промывка, сушка и т.д.) приводит к циклическому изменению температурно-влажностного режима цеха.

В таблице 4.5 приведены характеристики агрессивной воздушной среды цехов отделочного производства предприятий текстильной промышленности [209].

Таблица 4.5. - Характеристики агрессивной воздушной среды цехов отделочного производства

Температура, °С		Относительная влажность, %		Агрессивные газы, пары, аэрозоли, пыль	
В рабочей зоне	Под потолком	В рабочей зоне	Под потолком	Наименование	Концентрация, мг/м ³
16-26	18-30	50-75	55-80	Углекислый газ	до 20,0
				Аммиак (NH ₃)	0,5-50,0
				Сернистый ангидрид (SO ₂)	0,5-10,0
				Сероводород (H ₂ S)	2,0-5,0
				Окислы азота (NO, NO ₂)	0,3-18,0
				Хлор (Cl ₂)	0,1-20,0
				Хлористый водород (HCl)	до 5,0
				Пыль красителей	следы

Согласно СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии» (приложение 1) газовые среды помещений с влажным режимом эксплуатации и с концентрациями газов, представленными в табл. 1, являются средне- и сильноагрессивными для железобетонных и стальных конструкций, слабо- и среднеагрессивными для деревянных конструкций.

Воздействие агрессивных сред оказывают негативное влияние на долговечность несущих конструкции из металла [210,211] и железобетона [212,213]. На древесину химически агрессивные среды оказывают не столь негативное воздействие. Известны примеры успешного использования деревянных каркасов для зданий бассейнов, складов минеральных удобрений, коровников и других промышленных и общественных зданий с агрессивными средами.

Для определения целесообразности использования тех или иных типов конструкций необходимо руководствоваться сметной стоимостью строительно-монтажных работ и сроками строительства, а также расходами на техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт здания. Учёт эксплуатационных и технико-экономических показателей при выборе конструктивного решения промышленных зданий в условиях действия агрессивных сред является актуальной задачей.

В данном разделе выполнено сравнение экономических показателей трёх конструктивных систем несущих каркасов здания красильного цеха: в металлическом каркасе, в железобетонном каркасе и в деревянном исполнении (рис.4.14). Параметры цеха: пролёт – 24 метра, длина здания – 120 метров, шаг колонн – 6 метров, высота здания – 9,6 метра.



Рис.4.14. Общий вид вариантов покрытия здания

В табл. 4.6. приведены затраты на производство строительно-монтажных работ различных вариантов каркаса, текущий и капитальный ремонт на основании локальных сметных расчётов, составленных в уровне цен 4 квартала 2016 г. для текстильного предприятия г. Иванова. В сметной стоимости затраты на монтаж ограждающих конструкций, полов, оборудования и т.д. не учитывались.

В табл. 4.7. приведён перечень работ по текущему и капитальному ремонту согласно действующим нормам.

**Таблица 4.6. Затраты на производство строительного-монтажных работ
различных вариантов каркаса**

Наименование затрат	Вариант конструктивного решения		
	Железобетонный каркас	Металлический каркас	Деревянный каркас
1	2	3	4
Первоначальные затраты: Фундаменты Колонны Стропильная система	1 174 тыс. руб. 2 620 тыс. руб. 8 819 тыс. руб.	1 011 тыс. руб. 2 902 тыс. руб. 3 031 тыс. руб.	1 174 тыс. руб. 813 тыс. руб. 2 736 тыс. руб.
Текущий ремонт	494 тыс. руб. раз в 2 года	627 тыс. руб. раз в 2 года	453 тыс. руб. раз в 2 года
Капитальный ремонт: - фундаменты	651 тыс. руб. (раз в 25 лет)	651 тыс. руб. (раз в 25 лет)	651 тыс. руб. (раз в 25 лет)
- колонны	1 301 тыс. руб. (раз в 40 лет)	1 423 тыс. руб. (раз в 40 лет)	1 301 тыс. руб. (раз в 40 лет)
- строп. система	1 520 тыс. руб. (раз в 15 лет)	1 968 тыс. руб. (раз в 15 лет)	765 тыс. руб. (раз в 12 лет)

Периодичность капитального ремонта принята согласно МДС 13-14.2000 «Положение о проведении планово-предупредительного ремонта производственных зданий и сооружений». Необходимость в текущем ремонте устанавливается на основании технического обследования. Конструкции эксплуатируются в агрессивной среде, принимаем периодичность текущего ремонта 2 года.

Первоначальные затраты на устройство железобетонного каркаса в 2 раза (на 6 млн. рублей) выше стоимости металлического каркаса и каркаса с деревянными стропильными фермами. Среда отделочных цехов для металлических конструкций является средне- и сильноагрессивной, поэтому затраты на текущий и капитальный ремонт будут больше (на 174 и 1325 тыс. рублей соответственно), чем для здания со стропильной системой из деревянных ферм. Таким образом использование деревянных стропильных ферм снижает стоимость каркаса и затраты на его техническое обслуживание.

Таблица 4.7. перечень работ по текущему и капитальному ремонту

Наименование	Перечень работ		
	Железобетонный каркас	Металлический каркас	Деревянный каркас
Текущий ремонт	– Восстановление защитного слоя арматуры и защитного покрытия железобетонных колонн и ферм	– Восстановление защитного покрытия колонн и ферм	– Восстановление защитного слоя арматуры и защитного покрытия железобетонных колонн и ферм
Капитальный ремонт	– Восстановление изоляции фундаментов и отмостки – Ремонт дренажей вокруг здания – Ремонт и укрепление колонн обоями. – Ремонт или замена стропильных ферм – Восстановление защитного слоя арматуры и защитного покрытия колонн и ферм	– Восстановление изоляции фундаментов и отмостки – Ремонт дренажей вокруг здания – Ремонт или замена стропильных ферм – Восстановление защитного покрытия колонн и ферм	– Восстановление изоляции фундаментов и отмостки – Ремонт дренажей вокруг здания – Ремонт и укрепление колонн обоями. – Ремонт или замена стропильных ферм – Восстановление защитного слоя арматуры и защитного покрытия колонн и ферм

Таким образом, выполненный анализ предпроектных решений красильного цеха отделочного производства с различными вариантами конструктивных решений показал, что использование несущих конструкций с использованием древесины экономически целесообразно.

При соблюдении соответствующих требований к проектированию, изготовлению и эксплуатации здания с деревянными конструкциями прослужат тот же срок, что и из других конструкций. Вместе с этим они экологичны, экономичны, не требуют больших трудозатрат при монтаже и утилизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 твердого тела) в древесине

в окрестностях металлического цилиндрического нагеля в условиях конденсации влаги в месте контакта нагеля с древесиной и последующего 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каган М.Е. Сопряжения элементов деревянных конструкций на нагелях. – М.: Издание Военно-инженерной академии Красной армии, 1940. – 10-26с.
2. Карлсен Г. Г. Деревянные конструкции в военном строительстве. М.: ВИА, 1947. - 290 с.
3. Карлсен Г. Г. и др. Конструкции из дерева и пластмасс. М. Стройиздат, 1975. - 668 с.
4. Коченов В.М. Экспериментально-теоретические исследования деревянных конструкций. – М. –Л.: ГОНТИ, 1938. – 150-196с.
5. Лентяшин А.В. Расчет нагельных сопряжений. – Сб. статей и аннотаций по деревянным конструкциям. – М. –Л.: Госстройиздат, 1934.- 52-61с
6. Гестеши Т. Деревянные сооружения. Гражданские и инженерные. Основы расчета и конструирования. Пер. с нем. Под ред. Проф. П.Я.Каменцева – Вологда. – ГТН, 1931. – 432с.
7. Иванов В.Ф. Деревянные конструкции гражданских зданий. Часть I. – М. – Л.: ГИЗ 1927. – 224с.
8. Жаксон А. Современные деревянные конструкции в инженерных сооружениях. Пер. с нем. Под ред. в обр. проф. Н.К.Лахтина. – М.: ГНТН, 1925. – 84с
9. Маслов В.Н. Расчет болтового соединения, работающего на срез, стыка деревянной фермы как упругой системы. – Сб. трудов МИИТ, вып.2. – М., 1926.
- 10.Метод Шнидтманна. В кн.: Николаи Б.Л. Теория расчета нагельных соединений в деревянных конструкциях. Харьков: ОНТИ, 1935. – 11-16с.
- 11.*Johansen, K.W.: Forsøg med Træforbindelser. Bygningsstatistiske Meddelelser. Vol. XII, Nr. 2, 1941, pp. 29-86.*
- 12.*Johanson, K.W. Theory of timber connections.International Association for Bridge and Structural Engineering. 9: 1949. - page 249-262.*
- 13.*EN 1995-1-1. Eurocode 5 - Design of Timber Structures.*

14. Möller, T. *En ny metod för beräkning av spikförband. Report No 117, Chalmers University of Technology, Sweden - 1951.*
15. Larsen, N. J. "Design of bolted joints", in: *Proceedings, CIB-W18 Meeting 1979, Bordeaux, France 1979, Paper 12-7-2.*
16. Aune, P. and Patton-Mallory, M. *Lateral load-bearing capacity of nailed joints based on the yield theory - Theoretical development verification. US Department of Agriculture, Forest Product Laboratory, Research Papers FPL 469 and 470, 1986.*
17. Whale L.R.J., Smith I., Larsen H.J. *Design of nailed and bolted joints proposals for the revision of existing formulae in draft EuroCode 5 and the CIB code. Paper 20-7-1, Proceedings CIBW18 meeting, Ireland, 1987.*
18. Hilson, B.O., Whale, L.R.J. and Smith, I. *Characteristic properties of nails and bolted joints under short-term lateral load. Part 5 - Appraisal of current design data in BS5268: Part 2:1984 Structural Use of Timber. J. Inst. Wood Sci. 11(6) 208-212, 1990.*
19. Слицкоухов Ю.В. Исследование работы симметричных сопряжений элементов деревянных конструкций на нагелях из круглой стали. - Дисс. канд. техн. наук. – М: МИСИ, 1955
20. Григорьев А.С. Метод расчета балки на упругопластическом основании, применение этого метода к расчету болтов в древесине. – Труды ЦАГИ, техн. отчет №600, 1946. – 30с.
21. Фаерберг И.И. К расчету болтовых соединений деревянных деталей. – Техн.отч. ЦАГИ, №19. – М, 1943.
22. Фаерберг И.И. Работа болта в дереве. - Техн.отч. ЦАГИ, №555. – М, 1944.
23. Никитин, Г.Г. Расчет нагельных соединений с учетом деформаций, развивающихся во времени. Дис. канд. техн. наук. - Л.: ЛИСИ, 1964г. -158с.
24. Никитин Г.Г. Теория расчета нагельных соединений в конструкциях из дерева и пластмасс с учетом времени и свойств материалов – В кн.: Инженерные конструкции. Доклады на VI Научной Конференции молодых ученых-строителей. – Л., 1965. – 172- 179с.

25. Дмитриев П.А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруговязких и пластических деформаций. Дис. ... докт. техн. наук. – Новосибирск: НИСИ, 1975.
26. Шапошников В.Н. Особенности работы многонагельных соединений элементов деревянных конструкций, и теория их расчета при действии кратковременных, длительных и повторных нагрузок. Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НИСИ, 1983. – 258с.
27. Мартинец, Д.В. Деревянные стропильные фермы на металлических зубчатых пластинах / Д.В. Мартинец, А.К. Наумов // Механическая обработка древесины. ВНИПИлеспром. - 1974. - №12. - С 12-14.
28. Наумов, А.К. Исследование соединений легких деревянных несущих конструкций на металлических зубчатых пластинах / А.К. Наумов // Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. — Москва, ЦНИИЭПсельстрой. - 1975.-143 с.
29. Дурновский, А.М. Разработка и исследование соединений деревянных конструкций металлическими зубчатыми пластинами / А.М. Дурновский // Дисс. ... канд. техн. наук. — Балобаново. - 1981. — 174 с.
30. Цепаев, В.А. Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах / В.А. Цепаев // Дисс. канд. техн. наук. - М.: 1982.-180с.
31. Котлов, В.Г. Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями: на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов//Дисс. канд. техн. наук.-Казань.-1991. - 191 с.
32. Крицин, А.В. Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций / А.В. Крицин// Дисс. на соиск. учен. степ, канд. техн. наук. — Нижегор. гос. архит.-строит. ун-т, Н. Новгород. - 2004.-180 с.
33. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. – М.: Издательство Московского государственного университета леса, 2005. – 340 с.

34. Ермолаев, В.В. Влияние влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах // Дисс. канд. техн. наук. – Нижний Новгород. – 2009. – 153 с.
35. Карельский, А. В. Технология изготовления составных деревянных конструкций с металлическими зубчатыми пластинами// Дисс. канд. техн. наук.-Архангельск.-2015. - 138 с.
36. Никитин Г. Г. Вопросы применения и расчета нагельных соединений из пластмасс // Клееные и клеефанерные конструкции с применением пластичных масс.-Л., 1961.-С. 78-117.-(Сб. тр. / Ленингр. инженер.-строит, ин-т.; Вып. 34).
37. Каган, М.Е. Выбор и изготовление образцов из стеклопластика АГ-4С для стандартных механических испытаний/М.Е. Каган, А.С. Лапидус//Бюллетень технико-экономической информации Тульского Совнархоза.- 1961.- № 10 (48).-С. 28-37.
38. Грезин, В.М. Исследование прочности и деформативности однонаправленного стеклопластика АГ-4С при кратковременном и длительном действии нагрузок: дис. канд. техн. наук.- М., 1964.- 256с.
39. Буданов В.Д., Туркин В.В. Вопросы применения болтов и нагелей из пластмассы в конструкциях из дерева и пластмассы. Сб. тр. МИСИ, № 60, М., 1968.-С. 95-102.
40. Туркин, В.В. Исследование работы цилиндрического нагеля из стеклопластика АГ-4С в сопряжениях элементов деревянных конструкций при действии кратковременных нагрузок: автореф. дисс. канд. техн. наук/В.В. Туркин.- М., 1970.- 14с.
41. Стрижаков Ю. Д. Исследование работы и расчет соединений деревянных элементов под углом на нагелях из стеклопластика АГ-4С при действии кратковременных и длительных нагрузок: Автореф. дис. канд. техн. наук.-Новосибирск, 1971.-17 с.

42. Панферов К. В., Потапов Ю. Н. Деформативность конструкционных пластмасс при переменных режимах нагружения // Расчет конструкций с применением пластмасс.-М., 1974.-С. 4-14.
43. Дмитриев, Исследование работы цилиндрических нагелей из АГ-4С в соединениях деревянных элементов/ П.А. Дмитриев, Ю.Д. Стрижаков//Труды НИСИ им. В.В. Куйбышева. Вып.11 Строительные конструкции,-1970.-С.87-95.
44. Дмитриев П.А., Ушаков В.И., Стрижаков Ю.Д. Применение стеклопластиков в креплениях элементов деревянных конструкций. Тез. докл. Международного симпозиума по проектированию, изготовлению и применению деревянных конструкций в строительстве. Киев, 1976.
45. Серова, Е.Т. Прочность и деформативность нагельных соединений из стеклопластика АГ-4С при длительном действии нагрузки: дисс. канд. техн. на-ук./Серова Евелина Титовна.-М, 1982.- 205с.
46. Умнова, О.В. Несущая и деформационная способность стеклопластиковых нагельных соединений в деревянных конструкциях с учетом времени и температуры эксплуатации: дисс. канд. техн. на-ук./Умнова Ольга Владимировна.-Воронеж, 2005.- 188с.
47. Жилкин В.А. Исследование деформированного состояния цилиндрического нагеля в симметричном двухсрезном соединении пластин из древесины АПК России. 2015. Т. 71. С. 29-41.
48. Михайленко О.А., Дмитриев П.А. Напряженно-деформированное состояние древесины под шайбой, установленной на торце стержня прямоугольного сечения, при ударе вдоль волокон // Известия вузов. Строительство. – 2013. - №11-12, с. 58-65.
49. Конструкции из дерева и пластмасс: учебное издание / Д.К. Арленинов, Ю.Н. Буслаев, В.П. Игнатьев и др. - Москва: АСВ, 2002. - 278 с.
50. Конструкции из дерева и пластмасс: учебное издание / Г.Н. Зубарев, Ф.А. Бойтемиров, В.М. Головина и др. - Москва: Академия, 2004 - 305 с.
51. Лоскутова Д.В. Прочность и деформативность узловых соединений на металлических зубчатых пластинах в сквозных деревянных конструкци-

- ях: дис. канд. техн. наук: 05.23.01: защищена 15.05.09 / Лоскутова Диана Владимировна. - Томск, 2009. - 184 с.
52. Столповский Г.А. Соединения деревянных элементов на витых крестообразных стержнях, работающих на выдергивание: дис. канд. техн. наук: 05.23.01: защищена 12.11.11 / Столповский Георгий Александрович. - Оренбург, 2009. - 186 с.
53. Зиновьев В. Б., Шведов В. Н. Исследование напряженного состояния, возникающего в деревянных элементах при забивке в них нагелей огнестрельным способом. // Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. (апрель 1994г.)/НГАС. Новосибирск. 1994. - 30 с.
54. Шведов В.Н. Соединения деревянных элементов на нагелях крестообразного сечения, забитых огнестрельным способом: дис. канд. техн. наук: 05.23.01: защищена 05.11.99 / Шведов Владимир Николаевич. - Новосибирск, 1999. - 185 с.
55. Линьков, Н.В. , Несущая способность деревянных балок составного сечения на соединении “КМ-вкладыш” / Н.В. Линьков // Вестник МГСУ: сб.статей. - Москва, 2011. - № 1-2. - с. 161-166.
56. Руднев, И.В., Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.В. Жданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство: сб.статей. - 2014. - № 14. - с. 5-12
57. Попов, В.М., Создание клеенных соединений для ограждающих конструкций из древесины / В.М. Попов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура: журнал. - 2013. - № 3 (31). - с. 16-20
58. Попов, В.М., Клеевые соединения древесины повышенной прочности на основе магнитообработанных клеев / В.М. Попов, А.В. Латынин , Е.Н. Лушникова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: журнал. - Воронеж, 2013 - №5. - с. 293-296
59. Солоника, В.Р., Исследование свойств клеевых соединений древесины, образованных поливинилацетатно-карбамидноформальдегидными ком-

- позициями / В.Р. Солоника, В.М. Шкурник // Актуальные проблемы лесного комплекса - Брянск, 2014 - № 40. - с. 126 - 131
60. Исупов, С.А., Деревянные составные стержни на нагельных пластинах / С.А. Исупов // Общество, наука, инновации: сборн. материалов. - Киров, 2013 - № 2013 . - с. 1578-1579
61. Симинский К. К. Об усталости дерева при повторной нагрузке // Вестн. инженеров, -1927.-№ 4.-С. 137-140; № 5.-С. 186-189.
62. Синицкий А. К. Исследование усталости древесины сосны // Тр. / Ленингр. ин-т инженеров гражд. воздуш. флота.-1936.-Вып. 3.-С. 125-171.
63. *Trayer G. N, Strength and characteristics of wood used in aircraft construction // Proceedings*
64. Белянюн Ф. П. Вплив асиметричних циюпв навантаження і концен-трацш напруг на мцнють деревини при повторних навантаженнях. Вид-ва Акад. наук УРСР. 1938, 41 стор.
65. Богданович А. Ф. Исследование соединений деревянных конструкций на нагелях под действием статической и пульсирующей нагрузок // Строительные конструкции.-М., 1952.-С. 53-92.-(Науч. тр. / Моск. ин-т инженеров ж.-д. трансп.; Вып.77).
66. Богданович А. Ф. К вопросу об ускоренном определении выносливости древесины при сжатии вдоль волокон // Мосты и строительные конструкции.-М., 1953.-С. 97-106.-(Науч. тр. / Моск. ин-т инженеров ж.-д. трансп.; Вып.78).
67. Иванов Ю. М. Основные вопросы изучения ползучести древесины // Исследования прочности, ползучести, пластичности строительных материалов.-М., 1955.-С. 100-115.
68. Муратов А. А. Испытания нагельных соединений динамической и статической нагрузок // Переправочно-мостовые вопросы.- М., 1957,- С. 156—164.- (Вестн. тр. акад. / Воен.-инженер, акад.; № 122).
69. Прокофьев А. С., Нагда Б. Ю. Совершенствование метода расчета строительных элементов на выносливость // Совершенствование и расчет строительных конструкций из дерева и пластмасс.-СПб., 1995.-С. 52-57.

70. Прокофьев А. С., Кабанов В. А. Усталость клееных деревянных балок при температурно-влажностных воздействиях // Конструкции из дерева и пластмасс.-Л., 1983.-С. 30-35.
71. Прокофьев А. С., Кабанов В. А. Экспериментальное исследование стойкости клееных деревянных балок к циклическим температурно-влажностным воздействиям // Работоспособность композиционных строительных материалов.-Казань, 1983.-С. 50-52.
72. Сморчков А. А. Выносливость и виброползучесть клееных деревянных балок: Автореф. дис. канд. техн. наук.-М., 1982.-23 с.
73. Кабанов В. А. Влияние температурно-влажностных воздействий на прочность и выносливость клеевых соединений деревянных балок: Автореф. дис. канд. техн. наук.-Л., 1983.-23 с.
74. Поветкин С. В. Сопrotивляемость длительному воздействию клееных деревянных балок циклическим нагрузкам // Облегченные конструкции из древесины, фанеры и пластмасс.-Л., 1984.-С. 132-135.
75. *Newlin S, Wilson J. Mechanical properties of woods grown in the United States // U. S. Depart. Agr. Bull № 556. - Washington. - 1917. - p. 35*
76. Леонтьев Н. Л. Влияние влажности на физико-механические свойства древесины.-М.: Гослесбумиздат, 1962.-114 с.
77. Чудинов, Б.С. Вода в древесине / Б.С. Чудинов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 270 с.
78. Чудинов, Б.С. Теоретические исследования теплофизических свойств и тепловой обработки древесины: автореф. дис. . д-ра техн. наук / Чудинов Борис Степанович. Л: ЛТА им. С.М. Кирова, 1967. 30 с.
79. Чудинов, Б.С. Теория тепловой обработки древесины / Б.С. Чудинов. М.: Наука, 1968. 255 с.
80. Чудинов, Б.С. О влиянии породы на тепловые свойства древесины / Б.С. Чудинов, В.И. Степанов // Исследования в области древесины и древесных материалов: Красноярск. - 1967. С. 32-38.

- 81.Шубин, Г.С. О влиянии породы древесины на ее равновесную влажность / Г.С. Шубин, А.В. Чемоданов // Науч. тр. М: МЛТИ. 1981. Вып. 117, С. 61-66.
- 82.Шубин, Г.С. О коэффициентах переноса тепла и влаги в древесине / Г.С. Шубин // Деревообрабатывающая промышленность. - 1989. №8. - С.10-13.
- 83.Шубин, Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины . / Г.С. Шубин. М.: Лесн. пром-сть, - 1973. - 248 с.
- 84.Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины . / Г.С Шубин. М.: Лесн. пром-сть, - 1990. - 336 с.
- 85.Пискунов, Ю.В. Влияния конструктивных параметров нагельных пластин на прочность и жесткость соединений деревянных конструкций / Ю.В. Пискунов, С.М. Чернявский // Р.Ж.-Сер. 10. Вып. 5. - М.,1982. -15 с.
86. Пискунов, Ю.В. Несущие деревянные конструкции с соединениями на нагельных пластинах и элементах /Ю.В. Пискунов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1988. - №6. - С. 13-17.
- 87.Миронов В. Г., Цепаев В. А., Авдеев А. В. Влияние влажности древесины на ползучесть соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах // Деревообраб. пром-сть.-2000.-№ 1.-С. 26-28.
- 88.Потыкалова М.В. Лесное товароведение с основами древесиноведения: учебно-методический комплекс. – Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2009. – 129 с.
- 89.Ребиндер, П.А. О формах связи влаги с материалами в процессе сушки . / П.А. Ребиндер // Всесоюз. научно-техн. совещание по сушке. М.: Профиздат, 1958. С.20-33.
- 90.Фрейдин А.С., Вуба К.Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. М.: Лесная промышленность, - 1980 - 223с.
- 91.Чулицкий, Н.Н. Исследование водопроводности и водопоглощаемости древесины различных пород / Н.Н. Чулицкий // Науч. тр. М.: ЦАГИ, 1932. 122 с.

92. Серговский, П.С. Вопросы статики процесса сушки и увлажнения древесины . / П.С. Серговский // Науч. тр. М.: МЛТИ, 1955. № 4. С. 98-123.
93. Stamm, A.J. Wood and Cellulose science Text. / A.J. Stamm // N.I. The Roland Press Company, 1964. P. 547.
94. Stamm, A.J. Termodinamics of the swelling of wood Text. / A.J. Stamm, W.K. Loughborough. Jour. Phys. Chem. 1934. № 39. p. 121-132.
95. Любимов, Н.Я. Теория и практика сушки дерева . / Н .Я. Любимов. М.: Гослестехиздат, 1932. 368 с.
96. Никитина, Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах . / Л.М. Никитина. М: Энергия, 1968. 499 с.
97. Франчук, А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов . / А.У. Франчук. М: НИИ строительной физики, 1969. 120 с.
98. Skaar, C.H. Water in wood Text. / C.H. Skaar. N. I., 1972. P. 218.
99. Кантер, К.Р. Исследование тепловых свойств древесины .: дис. . канд. техн. наук / Кантер К.Р. М.: МЛТИ, 1954.
100. Кантер, К.Р. О тепловых свойствах древесины . / К.Р. Кантер // Деревообрабатывающая промышленность. 1957. № 7. С. 17-18.
101. Комиссаров, А.П. Тепловые коэффициенты древесины лиственницы / А.П. Комиссаров // Деревообрабатывающая промышленность. 1969. №6. С. 9-10.
102. Комиссаров, А.П. Повышение эффективности производства строганного шпона .: дис. . д-ра техн. наук / Комиссаров Анатолий Петрович. Воронеж: ВГЛТА, 2002.
103. Щедрина, Э.Б. Исследование тепловых и влажностных характеристик древесины в условиях повышенных и пониженных температур .: автореф. дис. . канд. техн. наук / Щедрина Эмма Борисовна. М.: МЛТИ, 1976. 22 с.
104. Бойко М. Д. Влияние температурно-влажностного состояния древесины на ее прочность.-Л.: Госстройиздат, 1952.-95 с.

105. Перелыгин Л. М. К вопросу о влиянии влажности на крепость древесины // Изучение и испытание древесины.-М., 1935.-С. 34-42.
106. Перелыгин Л. М. К вопросу о влиянии влажности на крепость древесины // Изучение и испытание древесины.-М., 1935.-С. 34-42.
107. Перелыгин Л.М. О влиянии влажности на упругость и пластичность древесины //Механическая обработка древесины.-1934.-№ 9.-С. 25-27.
108. Быковский В. Н. Элементы деревянных клееных конструкций в условиях переменной и повышенной влажности // Сб. тр. / Науч.-исслед. ин-т по стр-ву М-ва машиностроения СССР.-1949.-Вып. 1.-С. 103-109.
109. Квасников Е.Н. Вопросы длительного сопротивления древесины.-Л.: Стройиздат, 1972.-95 с.
110. Мартинец Д. В. Влияние влажности на прочность древесины // Сб. тр. / Моск. инженер.-строит. ин-та.-(Исследования по деревянным конструкциям.-М., 1953.-С. 41-58.-№ 13).
111. Кашкаров К.П. Испытание древесины в мокром состоянии на сжатие и растяжение вдоль волокон // Сб. тр. / Науч.-исслед. ин-т по стр-ву М-ва машиностроения СССР.-1942.-Вып.2.-С. 13-37.
112. Андреев О.О. Комплекс программ для расчета строительных конструкций // Тр. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, - 1973, вып. 32, - с.5-12.
113. Кириллов, Н.М. Расчет процессов тепловой обработки древесины при интенсивном теплообмене . / Н.М. Кириллов. М.: Гослесбумиздат, 1959. 87 с.
114. Kollmann, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe Text. / Bd. I. Berlin. Göttingen. Heidelberg, Springer Verlag, J.F. Bergman / München. 1955.
115. Dunlop, F. The specific heat of wood Text. / F. Dunlop // V.S. Department of Agriculture, Forest Service. Bulletin № 110. Washington. 1912.
116. MacLean, J.D. Thermal conductivity of wood Text. / J.D. MacLean. Heat. Piping and Air Condition. № 13. 1941.
117. Cammerer, J.S. Die wärmeschutztechnischen Eigenschaften von Holz und holzhaltigen Baustoffen Text. / Holz als Roh-und Werkstoff. №6 1938.

118. Maku, T. Heat conduction in wood. Relation between the moisture content and the heat conduction vertical to the grain Text. / Wood. Res., R Kyoto, Japan, №6 1951.
119. Серговский, П.С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины . / П.С. Серговский. М.: Гослесбумиздат, 1952.
120. Серговский, П.С. Исследование влагопроводности и разработка методов расчета процессов сушки и увлажнения древесины .: автореф. дис. д-ра техн. наук / Серговский Павел Семенович. М., МЛТИ, 1953. 42 с.
121. Серговский, П.С. Влагопроводность древесины . / П.С. Серговский // Деревообрабатывающая промышленность. 1955. №2. С. 3 8.
122. Алпаткина, Р.П. О влагопроводности древесины главнейших отечественных пород / Р.П. Алпаткина // Деревообрабатывающая промышленность. 1967. № 9. С.12 14.
123. Алпаткина, Р.П. Метод исследования коэффициентов влагопроводности древесины / Р.П. Алпаткина // Изв. вузов: Лесной журнал, 1968. №2. С. 106-111.
124. Арциховская, Н.В. Исследование влагопроводности древесины . / Н.В. Арциховская // Тр. ин-та АН ССС. Т. IX. 1953.
125. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.-Л., Госэнергоиздат, - 1963. - 536 с.
126. Лыков, А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах . / А.В. Лыков. М.: ГИТТЛ. 1954.
127. Мартлей И. Движение влаги в древесине . / И. Мартлей // Сушка дерева. М.: Сельхозиздат. 1932.
128. Egner, K. Beiträge zur kenntnis der Feuchtigkeitsbewegung im Hölzern. Forschungsberichte Holz, Heft2, Berlin. 1924.
129. Лыков, А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения . / А.В. Лыков. М.: Гизлегром. 1938. 590 с.
130. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. М.: Энергия. 1968. 470с.

131. Федосов, С.В. Применение методов теории теплопроводности для моделирования процессов конвективной сушки / С.В. Федосов, В.Н. Кисельников, Т.У. Шертаев. Алма-Ата: Гылым, - 1992. - 167 с.
132. Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Очнев Э.Н. Зональный метод расчета непрерывно действующих массообменных аппаратов для систем с твердой фазой. // ТОХТ. - 1974. - Т.8. N 1. С. 22-29.
133. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, - 1980. - 248 с.
134. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Химия, - 1993. - 206с.
135. Драганов Б. Х., Кузнецов А. В., Рудобашта С. П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. М.: Агропромиздат. 1990. 463 с.
136. Кузнецов А.В., Рудобашта С. П., Симоненко А. В. Теплотехника, топливо и смазочные материалы. М. Колос. 2001. 240 с.
137. Рудобашта С.П. Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства /Амерханов Р. А., Бессараб А. С., Драганов Б. Х., Рудобашта С. П., Шишко Г. Г. М.: Колос-Пресс.2002.423 с.
138. Рудобашта С.П. // Энциклопедия «Машиностроение». Раздел IV. Расчёт и конструирование машин. Т. IV-12 «Машины и аппараты химических производств». Раздел 5. Машины и аппараты для массообменных процессов. М.: «Машиностроение». 2004. 832 с.
139. Техническая термодинамика : Учеб. пособие для втузов / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. - 3-е изд., испр. М. : Высш. шк., 2003. 261 с.
140. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел : Учеб. пособие для втузов / Э. М. Карташов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 2001. 550 с.
141. Аналитические методы теплопроводности : научное издание / В. А. Кудинов [и др. ; науч. ред. Э.М. Карташов]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. гос. техн. ун-т. - Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2004. - 208 с.

142. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций: [учеб. пособие для вузов] / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, В.В. Калашников. М. : Высш. шк., 2005. 429 с.
143. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости : [учебное пособие для вузов] / Э. М. Карташов, В. А. Кудинов ; Самар. гос. техн. ун-т. Самара : СамГТУ, 2010. 651 с.
144. Краткий курс математического моделирования физико-химических процессов: учебно-методическое пособие / И. А. Джемесюк, Э. М. Карташов, А. Г. Рубин ; Моск. гос. ун-т тон. хим. технологий им. М. В. Ломоносова, каф. высш. и прикладной математики. Москва : Изд-во МИТХТ, 2012. 51 с.
145. Prah, D. Moisture risk in unvented attics due to air leakage paths / D. Prah, M. Shaffer. – Golden, CO: U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, 2014. – 27 p.
146. Roppel, P. Attic ventilation and moisture research study / P. Roppel, M. Lawton. – Homeowner Protection Office, Burnaby, BC, Canada, 2014. – 25 p.
147. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 436 с.
148. Коперин, Ф.И. Защита древесины от гниения / Ф.И. Коперин. – Архангельск: Архангельское книжное издательство, 1961. – 192 с.
149. Ванин, С.И. Древесиноведение / С.И. Ванин. – 3-е изд. – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1949. – 472 с.
150. Бойтемиров, Ф.А. Конструкции из дерева и пластмасс / Ф.А. Бойтемиров. – М.: Академия, 2013. – 288 с.
151. Белянкин Ф.П. Метод расчета деревянных конструкций по предельным состояниям и задачи исследования длительной сопротивляемости древесины. В кн. : Исследования прочности и деформативности древесины. М., 1956, с. 3-20.

152. Ващев, Н.В. Влияние влажности воздуха и древесины на прочность клеевых соединений / Н.В. Ващев. – М.: Лесная промышленность, 1966. – 88 с.
153. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. – М.: Издательство «Лесная промышленность», 1978. – 224 с.
154. Рыжова Н.В., Шутов В.В. Физика древесины: учебное пособие. – Кострома: Издательство КГТУ, 2009. – 75 с.
155. Баженов В.А. Пьезоэлектрические свойства древесины. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 238 с.
156. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК ПресСто, - 2010. - 364 с.
157. Лабудин, Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой: Монография / Б.В. Лабудин. – Архангельск: Изд-во АГТУ, - 2008, - 267с.
158. Лабудин, Б.В. Геодезические купола из клееных деревянных элементов: Монография / Б.В. Лабудин, А.Ю. Гурьев. – Архангельск: Изд-во АГТУ, - 2007, - 172с.
159. Лабудин, Б.В. К обоснованию расчетной модели клееной древесины как ортогонального трансверсально-изотропного материала: Лесн.журн: изв. высш. учебн. заведений / Б.В. Лабудин. – 2006. -№5, - с.136-139
160. Пятикрестовский, К.П. К вопросу о проектировании большепролетных куполов с применением клееной древесины. / В кн. Пространственные конструкции здания сооружений. Вып. 5. М.: Стройиздат. - 1986г. - с. 44-53.
161. Пятикрестовский К.П., Хунагов Х.С. Нелинейный расчет с учетом податливости соединений конструкций из древесины. Известия Орловского государственного технического университета. Строительство, транспорт, №4/13, Орел, 2006, стр.92-102.
162. Пятикрестовский К.П., Хунагов Х.С. Использование метода интегральных оценок для нелинейного расчёта статически неопределимых деревянных конструкций. / Труды международной научно-технической

- конференции «Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела» в 2 томах. - М.: МИИТ, 2006. Т.2, с.341-344.
163. Пятикрестовский К.П., Хунагов Х.С. Обоснование зависимости между интенсивностями напряжений и деформаций для нелинейного расчета деревянных конструкций. Строительная механика и расчет сооружений. М. 2011, № 1, с. 62-69.
164. Слицкоухов Ю.В. Пятикрестовский К.П. Хунагов Х.С. Метод интегральных оценок при расчете пространственных конструкций из клееной древесины и фанеры. Известия ВУЗов. Строительство и архитектура 1986. № 12, с 6-10.
165. Турковский С.Б., Саяпин В.В. Исследование, монтажных узловых соединений клееных конструкций. В кн.: Несущие деревянные конструкции. - М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1981.
166. Турковский С.Б. Разработка и экспериментальные исследования несущих деревянных конструкций на основе соединений с наклонно вклеенными связями. Дис. на степень докт.техн.наук. М. 2001 79с.
167. Арленинов Д.К., Пятикрестовский К.П., Соловьев И.Н. Пространственное покрытие из клееной древесины. «На стройках России», 1987, № 12, с. 11-14.
168. Вдовин В.М. Конструкции из дерева и пластмасс: Учебник. – Пенза, 2006.
169. Вдовин В.М. Клееметаллические соединения в несущих деревянных конструкциях // Региональная архитектура и стр-во. – 2007. – № 1(2).
170. Вдовин В.М. Исследование пространственной работы полносборного крупнопанельного деревянного дома / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, С.Г. Багдоев // Стр-во и архитектура. Сер. Пром. и с.-х. комплексы, здания и сооружения / Госстрой России. – 2004.
171. Волынский, В.Н. Технология клееных материалов. Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по спец. "Технология деревообработки" / В. Н. Волынский. - Архангельск : Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 1998. - 295 с.

172. Дмитриев П.А., Кондаков А.Г. Натурные испытания клефанерной панели покрытия. Научн.техн.реф.сборник, ЦНИИСК, 1979, серия 8, вып. 11, 43-47с.
173. Дмитриев П.А., Кондаков А.Г., Стрижаков Ю.Д. Клефанерная плита кровли для структурных конструкций: Информ. листок о научно-техническом достижении. -Новосибирск: ЦНТИ, 1982, №39 - 82с.
174. Ермолаев В.В. Расчётные характеристики древесины в соединениях строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах /В.В. Ермолаев, В.А. Цепаев // Жилищное строительство. — 2006. №2. - С. 14-15.
175. Ермолаев В.В. О расчете деформаций соединений деревянных конструкций . / В.В. Ермолаев, В.А. Цепаев // Жилищное строительство. — 2006. — №6. -С. 21-23.
176. Ермолаев В.В. Экспериментальные исследования ползучести соединений деревянных элементов под углом на металлических зубчатых пластинах . / В.В. Ермолаев // Технические науки: Сб. тр. аспирантов и магистрантов Н. Новгород: ННГАСУ, 2006.- С. 21-25.
177. Жаданов, В.И. Крупноразмерные плиты на основе древесины для покрытий зданий / П.А. Дмитриев, В.И. Жаданов, // Известия вузов. Строительство, 2003. №6. - С. 4 - 10.
178. Жаданов, В.И. Крупноразмерные ребристые плиты на основе древесины для пролетных строений мостов / В.И. Жаданов // Современные строительные конструкции из металла и древесины, ч. 1. Одесса, 2005.- С. 94-98.
179. Жаданов, В.И. Новые конструктивные решения крупноразмерных плит на основе древесины / П.А. Дмитриев, Г.И. Гребенюк, В.И. Жаданов, С.В. Калинин, Е.В. Баев // Вестник ОГУ. 2004. - № 2. - С. 177 - 181.
180. Инжутов, И.С. Конструкция и результаты испытаний трехугольной деревометаллической блок-фермы / И.С. Инжутов, С.В. Деордиев // Изв. ВУЗов. Строительство, 1998. -№ 10. С. 129 - 134.

181. Ковальчук, Л.М. Деревянные конструкции — проблемы и решения / Л.М. Ковальчук // Промышленное и гражданское строительство. М., 2001. -№ 10.-С. 13-14.
182. Леннов В.Г. Исследование прочности и деформативности древесины сосны под действием длительной нагрузки применительно к теории расчета элементов деревянных конструкций, Автореф.дис.на степень доктора техн.наук, -Л., 1958 55с.
183. Леннов В.Г. Исследование сопротивления сосны с учетом фактора времени. В кн.: Исследования прочности и деформативности древесины. М., Госстройиздат, 1956 -93-106с.
184. Титунин, А.А. Проектирование и производство строительных материалов из древесины. Комплексный подход: монография / А. А. Титунин, К. В. Зайцева ; отв. ред. А. М. Ибрагимов. – Кострома : Изд-во Костромского гос. технол. ун-та, 2009. – 185 с.
185. Турковский С.Б. Разработка и экспериментальные исследования несущих деревянных конструкций на основе соединений с наклонно вклеенными связями. Дис. на степень докт.техн.наук. М. 2001 79с.
186. Рощина, С.И. Экспериментальные исследования треугольных армированных деревянных арок при длительных силовых воздействиях//ПГС. -№12, 2008. -С. 18 -21.
187. Щуко В.Ю., Рощина С.И. Клееные армированные деревянные конструкции//Учебное пособие. -СПб., ГИОРД, 2009. -128 с.
188. Рощина, С.И. Прочность и деформативность клееных армированных деревянных конструкций при длительном действии нагрузки: дис. д-ра техн. наук. М., 2009. 200 с.
189. Промерзание влажных грунтов, оснований и фундаментов / С.В. Федосов, Р.М. Алоян, А.М. Ибрагимов и др. М.: АСВ, - 2005. - 277 с.
190. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) – М., «Наука», 1974,832 с.;

191. Патент РФ на изобретение № 1604945. Кл. Е 04 В 1/49. Соединительный элемент для крепления деревянных деталей. В.Г. Котлов, Н.Н.Степанов. Оpubл. 08.07.1990 М.: Бюлл. № 4612756. – 3 с.;
192. Патент РФ на изобретение № 127775. Кл. Е 04 В 1/49. Крепежный элемент для соединения деревянных деталей / В.Г. Котлов, Б.Э.Шарынин, С.С.Муратова. Оpubл. 10.05.2013 М.: Бюлл. № 13. – 3 с.;
193. Гётц К.-Г., Хоор Д., Мёлер К., Наттерер Ю. Атлас деревянных конструкций, - М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.;
194. Богословский В.Н., Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1982. 416 с.
195. Алоян Р.М., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов. Иваново: Изд-во ИГЭУ – ИГАСУ, 2011. 256 с.
196. Simonson, C.J., Salonvaara, M., Ojanen, T. Improving indoor climate and comfort with wooden structures. VTT Building and Transport, Finland. Issue 431, 2001, 200 p.
197. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление – М., «Высшая школа», 1975, 408 с.;
198. 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.
199. 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.
200. 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.
201. 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.
202. 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.
203. 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.
204. 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.
205. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии, - М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961.-830 с.
206. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П., (под ред. Ю.А.Комиссарова). Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие,- М, "Химия", - 2011, - 1229 с.

207. Бойтемиров, Ф.А. Конструкции из дерева и пластмасс / Ф.А. Бойтемиров. – М.: Академия, 2013. – 288 с.
208. Овчинников И.И. Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред//Строительство уникальных зданий и сооружений. - 2012. №2. - С.46-60.
209. Руководство по проектированию антикоррозионной защиты строительных конструкций производственных зданий предприятий текстильной промышленности. -М., 1980, - с. 89.
210. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Федосова Н.Л., Румянцева К.Е. Антикоррозионная защита металлов в строительстве: проблемы и пути их решения//Строительство и реконструкция. 2011. № 2. С. 97-103.
211. Kobus J. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems according to EU standards // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2007. № 4. С. 125-130.
212. Овчинников И.Г. Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред / И. Г. Овчинников, В. В. Раткин, А. А. Землянский. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. - 232 с.
213. J.L. Smith Materials and methods for corrosion control of reinforced and prestressed concrete structures in new construction // J. L. Smith, Y.P. Virmani. National Technical Information Service, Springfield, Virginia, USA. August, 2000. P. 71.
214. 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.

215. 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. Деятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей международной междисциплинарной научной конференции. - Йошкар-Ола: ПГТУ, - 2016. - С. 292-295.

СПИСОК НОРМАТИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16588-91 Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. М.: Изд-во стандартов, 1992.
2. ГОСТ 9463-88 Лесоматериалы круглые хвойных пород. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 16 с.
3. ГОСТ 9462-88 Лесоматериалы круглые лиственных пород. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 15 с.
4. ГОСТ 2140-81 Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения. – М.: Стандартиформ, 2006. – 121 с.
5. ГОСТ 18288-87 Производство лесопильное. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2005. – 9 с.
6. ГОСТ 8486-86 Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2006. – 6 с.
7. ГОСТ 2695-83 Пиломатериалы лиственных пород. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2007. – 5 с.
8. ГОСТ 24454-80 Пиломатериалы хвойных пород. Размеры. – М.: Стандартиформ, 2007. – 4 с.
9. ГОСТ 26002-83 Пиломатериалы хвойных пород северной сортировки, поставляемые для экспорта. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2007. – 19 с.
10. СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М.: Министерство Регионального развития Российской Федерации, 2011. – 92 с.
11. СП 28.13330.2012 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. – М.: Министерство Регионального развития Российской Федерации, 2011. – 99 с.



Акционерное общество
**"Проектный институт
 "Агропроект"**

(АО «ПИ Агропроект»)

424004 Республика Марий Эл г. Йошкар-Ола
 ул. Комсомольская, 125
 тел. (8362) 64-14-39 факс (8362) 45-00-41
 e-mail: mariagroproekt@yandex.ru
 ИНН 1215015400, КПП 121501001
 р/с 40702810707240000598
 к/с 30101810200000000837, БИК 042202837
 Филиал Банка ВТБ (ПАО) в г. Нижнем Новгороде
 Г. Нижний Новгород



А К Т

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований на тему: «Разработка рекомендация по проектирования, изготовлению и эксплуатации деревянных конструкций с соединением на нагелях с учетом фактического напряженно-деформированного состояния при воздействии циклически изменяющихся параметров внешней среды с учетом протекающих процессов тепломассопереноса» были использованы при проектировании деревянных конструкций с узловыми соединениями на стальных цилиндрических нагелях.

Изложенный инженерный метод расчета в рекомендациях по проектированию и эксплуатации деревянных конструкций с узловыми соединениями на нагелях с учетом циклически изменяющихся параметров внешней среды обеспечит получение более точных результатов в реальном проектировании позволит определить сроки между ремонтными работами в процессе эксплуатации.

Разработали: академик РААСН, д.т.н., профессор Федосов С.В.
 советник РААСН, к.т.н., доцент Котлов В.Г.; инженер Бочков М.В.
 аспирант Иванова М.А.; аспирант Макаров Р.А.

Начальник технического отдела
 АО «ПИ Агропроект»

А.П.Кораблев

«МАРАГРОПРОМСТРОЙ»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

424000, Россия, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Гоголя, 3

телефон / факс: 64-18-01

Устав зарегистрирован Государственной регистрационной палатой РМЭ 29.11.2001 г., регистрационный № 4838.
Основной государственный регистрационный номер 1021200772273, свидетельство о внесении записи в Единый государственный реестр юридических лиц серии 12 № 000430229 выдано Инспекцией МНС России по г. Йошкар-Ола РМЭ,
дата внесения записи 16.12.2002 г.

ИНН 1215076548, КПП 121501001
ОКПО 57373488, ОКОГУ 49014, ОКATO 88401000000,
ОКВЭД 74.14, 45.21, 51.53, ОКФС 49, ОКОПФ 65
р/с 40702810418000001148 в филиале ОАО Внешторгбанк в
г. Йошкар-Ола г. Йошкар-Ола, БИК 048860717,
к/с 30101810100000000717
в ГРКЦ НБ РМЭ ЦБ РФ г. Йошкар-Ола, ИНН 7702070139



Утверждаю:

генеральный директор
ООО «Марагропромстрой»

В.Н. Хмелев
5 декабря 2016 года

Акт

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований на тему: «Разработка практических рекомендаций и соответствующих методик по определению сроков службы деревянных конструкций с узловыми соединениями на нагелях с учетом циклически изменяющихся тепловлажностных параметров среды эксплуатации», были использованы при проведении обследования, капитальных ремонтов и реконструкции зданий, построенных с 1980 по 2015 годы.

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.

Разработали: академик РААСН, д.т.н., профессор Федосов С.В.;
советник РААСН, к.т.н., доцент Котлов В.Г.;
инженер Бочков М.В.;
аспирант Иванова М.А.;
аспирант Макаров Р.А.