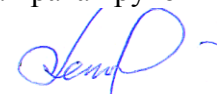


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

На правах рукописи



Котлов Виталий Геннадьевич

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

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
Академик РААСН, д.т.н., проф.
Сергей Викторович Федосов



**Йошкар-Ола, Иваново
2020**

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ И ХАРАКТЕРИСТИКАХ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ ДРЕВЕСИНЫ; ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАГЕЛЯХ	19
1.1. Краткие исторические сведения о древних памятниках мировой архитектуры из древесины	19
1.2. Основные структурно-механические и теплофизические характеристики древесины как строительного материала для сооружений различного назначения	22
1.3. Основные виды и способы крепления узловых элементов деревянных изделий в строительных конструкциях	40
1.4. Теоретические представления о напряжённно-деформированном состоянии конструкционных элементов из древесины и механика упруго-пластического разрушения нагельных соединений	52
1.5. Воздействие среды эксплуатации на физико-механические и теплофизические характеристики нагельных соединений	57
1.6. Методы защиты древесины и металла нагельного соединения в процессе совместной работы	66
1.7. Физико-теоретические методы изучения процессов переноса теплоты и влаги в древесине строительных конструкций	73
1.8. Основные методы решения краевых задач тепломассопереноса	80
1.9. Выводы по главе 1	82
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ НАДЕЖНЫХ И ДОЛГОВЕЧНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ДРЕВЕСИНЕ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	87
2.1. Разработка и обоснование методологии создания и обеспечения	87
в эксплуатации надежных и долговечных нагельных соединений	87
2.2. Постановка и решение задачи нестационарного теплопереноса в системе «цилиндрический нагель – древесина» при произвольном законе изменения температуры среды эксплуатации	102
2.3. Постановка и решение задачи нестационарного влагопереноса, осложненного капиллярной конденсацией и испарением влаги	123
2.4. Численная реализация и исследование математической модели взаимосвязанных процессов конденсации, испарения и массопереноса влаги и теплопереноса	132
2.5. Выводы по главе 2	141
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ДРЕВЕСИНЕ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ В ФОРМЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЛАСТИН (МЗП)	144
3.1. Физико-математическая постановка задачи взаимосвязанного тепло-влажностного переноса в системе «древесина – МЗП»	144
3.2. Решение одномерной задачи теплопроводности и диффузии влаги (массопроводности) в нагельных соединениях с МЗП	150

3.3. Моделирование нестационарных процессов переноса теплоты и влаги при двумерной постановке задачи	156
3.4. Проведение и анализ результатов численного эксперимента с помощью предложенной математической модели	168
3.5. Методика определения показателей ресурса нагельных соединений при циклических колебаниях температурно-влажностных условий эксплуатации	173
3.6. Выводы по главе 3	180
ГЛАВА 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ	183
4.1. Характеристики пород и сортов древесины и металлических крепежей	183
4.2. Методики и инструментарий для измерения характеристик теплопереноса и теплофизических параметров объектов исследования	186
4.2.1. Определение влажности древесины	186
4.2.2. Исследование процессов теплопереноса в древесине	191
4.3. Методики исследования сорбционных характеристик древесины промышленного назначения	192
4.3.1. Определение влагопоглощения древесины	192
4.3.2. Определение концентрации раствора кислоты методом прямого титрования	193
4.3.3. Определение плотности исследуемых растворов	193
4.4. Методики исследования механических характеристик древесины	195
4.5. Оборудование и методика исследования циклических процессов тепло-влажностного переноса в нагельных соединениях	202
4.6. Выводы по главе 4	211
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В МАТЕРИАЛАХ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	213
5.1. Исследование состояний статики в системе «древесина – влажный воздух»	213
5.2. Изучение динамики тепловых процессов с применением тепловизионной техники	219
5.3. Исследование динамики и кинетики процессов влагопереноса	227
5.4. Исследование деформационных характеристик нагельных соединений при циклических процессах увлажнения и высыхания древесины в условиях напряженно-деформированного состояния	233
5.5. Характеристики предельных механических и циклически изменяющихся климатических условий работы нагельных соединений	245
5.6. Выводы по главе 5	252
ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	256
6.1. Автоматизированная система мониторинга климатических, температурно-влажностных и механических показателей эксплуатации строительных конструкций из древесины	256
6.2. Оценка работоспособности нагельных соединений на основе статистических	

показателей их деформации	260
6.3. Порядок определения работоспособности нагельных соединений по количеству циклов увлажнения и высыхания древесины	267
6.4. Экономическая эффективность учета процессов тепломассопереноса в древесине нагельных соединений	272
6.5. Выводы по главе 6	281
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	284
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	287
ПРИЛОЖЕНИЕ А	320
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	326

ВВЕДЕНИЕ

В.1 Актуальность темы. Основной продукт, который дают человечеству леса – это древесина. В настоящее время Россия является крупнейшей лесной державой. Суммарная площадь лесов России составляет почти 800 млн га, а запасы древесины имеют величину чуть более 82 млрд м³. На долю России приходится около 1/5 покрытой лесами площади планеты и мировых запасов древесины. Причем приблизительно половина этих запасов – это древесина наиболее ценных, хвойных пород [1-6].

Древесина применяется практически во всех отраслях народного хозяйства. Этот материал достаточно прочен, легок, имеет хорошие теплоизоляционные свойства, способность без разрушения поглощать работу при ударных нагрузках, гасить вибрации. Он хорошо поддается механической обработке, склеиванию, удерживает металлические и другие крепления и т.д. Важнейшее применение древесины заключается в том, что она используется для производства строительных деталей и конструкций, домов [1-6].

Столетиями на Руси древесина являлась основным строительным материалом [1-6], из которого возводились величайшие храмы (Кижичи), замечательные резные терема удельных князей и несметные крестьянские подворья. Не меньшее распространение древесина в качестве строительного материала имеет и в других северных странах: Норвегии, Швеции, Финляндии, Канаде [7-9].

Со временем появился камень, естественный и искусственный; с начала XX 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 XVIII-XIX 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 [10, 11].

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 [3, 6, 12-23]. Вместе с тем влияние процессов циклического изменения температуры и влажности воздуха на прочность и долговечность нагельных соединений изучено недостаточно.

В.2 Степень разработанности темы исследований. 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, используемый 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, Г.Г. Карлсен, В.М. Коченов, А.В. Ляшин, И.А. Цыплёнков.

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

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

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

В.3 Цель работы – Создание и обеспечение в процессе эксплуатации прочных, надежных и долговечных нагельных соединений строительных деревянных конструкций на основе разработки и применения математических моделей процессов тепловлагодпереноса в древесине таких соединений при различных эксплуатационных условиях.

В.4 Задачи, решаемые в работе:

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

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

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

4. Разработка двухмерной математической модели взаимосвязанного тепло- и влагопереноса в древесине нагельного соединений с МЗП.

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

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

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

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

В.5 Объект и предмет исследований. Объектом исследования являются нагельные соединения деревянных строительных конструкций. Предметом исследования служат процессы тепло-влажностного переноса в древесине нагельных соединений при воздействии эксплуатационных факторов.

В.6 Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (строительство).

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.02.13 в диссертационной работе объектом исследований являются нагельные соединения деревянных строительных конструкций.

Соответствие диссертации области исследования специальности: представленные в диссертации результаты соответствуют области исследования специальности 05.02.13, а именно:

– п. 1: «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания...процессов...в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности»

– п. 5: «Разработка научных и методологических основ повышения производительности.....процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса»

– п. 6: «Исследование технологических процессов....и их взаимодействия с окружающей средой»

– п. 7: «Разработка и повышение эффективности методов технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта.... агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации и продления ресурса»

В.7 Методология и методы научных исследований. Для решения задач в работе использовались методы физического и математического моделирования, методы теории взаимосвязанного тепломассобаропереноса, современные методы оценки технико-экономических показателей производственных процессов, моделирование на ЭВМ с использованием программного комплекса MATLAB и Mathcad.

В.8 Научная новизна работы:

1. Сформулированы общие представления об особенностях процессов тепловлагопереноса в нагельных соединениях в условиях их напряженно-деформированного состояния при наличии суточных и сезонных циклически изменяющихся условиях эксплуатации; определены и обоснованы краевые условия решения системы дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепло- массопереноса в древесине нагельных соединений; составлена и обоснована общая методология создания и обеспечения в процессе эксплуатации прочных, надежных и долговечных нагельных соединений строительных деревянных конструкций.

2. Разработана математическая модель процесса тепломассопереноса в древесине болтовых нагельных соединений при циклических изменениях тепловлажностных параметров среды эксплуатации соответствующих реальным суточным и сезонным условиям с учетом фазовых переходов влаги,

находящейся в древесине, «лед-жидкость-пар», а также напряженно-деформированного состояния материалов соединения.

3. Как продолжение теоретических разработок, указанных в предыдущем пункте (п.2), разработана математическая модель процесса тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений, выполненных с использованием МЗП, для таких же условий эксплуатации, как и в случае болтовых соединений.

4. На основе предложенных математических моделей составлена инженерная методика расчета и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения для определения влияния таких процессов на эксплуатационные показатели и характеристики этих узлов деревянных конструкций в целях диагностики их состояния, прогнозирования ресурса и управления этим и другими эксплуатационными показателями.

В.9 Теоретическая значимость работы:

Разработаны и обоснованы математические модели процесса тепломассопереноса в древесине болтовых нагельных соединений и нагельных соединений с использованием МЗП при циклических изменениях тепловлажностных параметров среды эксплуатации соответствующих реальным суточным и сезонным условиям с учетом фазовых переходов влаги, находящейся в древесине, «лед-жидкость-пар», а также напряженно-деформированного состояния материалов соединения. Тем самым был сделан значительный вклад, не имеющий аналогов, в развитие и совершенствование общей теории тепло- массо- баропереноса. Разработана оригинальная инженерная методика расчета и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения для определения влияния таких процессов на эксплуатационные показатели и характеристики этих узлов деревянных конструкций в целях диагностики их состояния, прогнозирования ресурса и управления этим и другими эксплуатационными показателями. Выполненные теоретические разработки актуальны не только для строительной отрасли, но

и для других отраслей народного хозяйства в тех случаях, когда использование древесины сопровождается протеканием в ней процессов теплопереноса.

В.10 Практическая значимость результатов работы:

1. Предложенные математические модели процессов теплообмена в нагельных соединениях различной конструкции, представляющие собой удобный и эффективный инструмент досконального и достоверного изучения таких процессов при различных эксплуатационных условиях, позволяющие существенно экономить силы, средства и время при создании прочных, надежных и долговечных деревянных строительных конструкций.

2. Инженерная методика расчета и мониторинга теплообменных процессов в древесине нагельного соединения позволяет выполнять диагностику состояния и прогнозировать ресурс таких узлов, находящихся в эксплуатации, а также разрабатывать рекомендации по обеспечению необходимых параметров нагельных соединений, как на стадии проектирования, так и в процессе их эксплуатации, в том числе разрабатывать меры по продлению ресурса таких узлов строительных деревянных конструкций.

3. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждают достоверность теоретических разработок и доказывают высокую эффективность мер, предложенных в работе, по обеспечению требуемых эксплуатационных показателей нагельных соединений деревянных строительных конструкций.

4. С использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в настоящей работе, разработаны технические решения, защищенные патентами: на конструкции – 3; на соединения деревянные конструкций – 4; на автоматизированные системы мониторинга теплофизических качеств материалов – 10.

Премии. За лабораторный комплекс для определения теплотехнических характеристик при длительных режимах испытаний в климатических

условиях Республики Марий Эл в 2018 году присуждена Государственная премия в области архитектуры и строительства.

Внедрение результатов исследований. Результаты исследования были использованы при проектировании деревянных конструкций с узловыми соединениями на стальных цилиндрических нагелях, при этом обеспечено получение более точных инженерных расчетов в реальном проектировании и позволив определять сроки между ремонтными работами в процессе эксплуатации деревянных конструкций на нагелях с учетом циклически изменяющихся параметров внешней среды, что подтверждается справкой внедрения ПК «Альтернатива» (г. Тольятти), актом внедрения СК ООО «Альтитуда» (г. Москва), справкой внедрения ООО НПП СО «Региональная проектная компания» (г. Тольятти), справкой внедрения ПК «Перспектива» (г. Тольятти), справкой внедрения ООО «ПРОММЕТЕКС» (г. Самара), справкой внедрения ООО «Жигулевская долина» (г. Тольятти), актом о внедрении ОА «Проектный институт «Агропроект» (г. Йошкар-Ола), актом о внедрении ООО «Новосибирский центр сертификации» (г. Новосибирск), представленными в приложении Б.

Практические результаты исследований были использованы при проведении обследований, капитальных ремонтов и реконструкции зданий и сооружений компаниями ООО НПП «Промтехнология» (г. Оренбург), Министерством сельского хозяйства и продовольствия (г. Йошкар-Ола), Поволжским государственным технологическим университетом (г. Йошкар-Ола), ООО «Марагропромстой» (г. Йошкар-Ола), колхозом имени Мичурина Оршанского района Марийской АССР, отделом культуры Советского райисполкома Марийской АССР (акты и справки о внедрении представлены в приложении Б).

Внедрение результатов исследований и разработок позволило определить причины повышения деформативности деревянных конструкций с соединениями на нагелях, смоделировать работу конструкций под воздействием циклически изменяющихся температуры и влажности,

определять фактическую величину деформативности в любой момент эксплуатации конструкции; разработать эффективные мероприятия по обеспечению долговечности узловых соединений деревянных конструкций с соединениями на стальных цилиндрических нагелях.

В.11 Достоверность и обоснованность результатов

– обеспечиваются тем, что полученные в работе научные положения и выводы, приведенные в диссертации, основаны на результатах многолетних экспериментов, выполненных в лабораторных и производственных условиях с применением современных, апробированных, методов исследований, и их статистической обработки, подтверждены сходимостью результатов компьютерного моделирования и результатов эксперимента, а также их корреляцией с результатами других авторов.

В.12 Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенные теоретические разработки, представляющие собой удобный и эффективный инструмент создания и обеспечения в эксплуатации прочных, надежных и долговечных нагельных соединений деревянных строительных конструкций.

2. Результаты теоретических исследований характеристик процесса тепло- влагопереноса в нагельных соединениях различной конструкции и применения этих характеристик для решения практических вопросов по обеспечению долговечности деревянных строительных конструкций.

3. Результаты экспериментальных исследований процессов тепло- влагопереноса в нагельных соединениях, а также их показателей прочности и долговечности в условиях, соответствующих реальным условиям применения строительных деревянных конструкций.

4. Рекомендации и средства, предложенные в работе, по обеспечению требуемых эксплуатационных показателей нагельных соединений деревянных конструкций в зависимости от условий эксплуатации.

В.13 Диссертационные исследования и разработки выполнены при финансовой поддержке: нет.

В.14 Внедрение результатов исследований.

Научные и практические результаты работы внедрены и используются в учебном процессе на кафедре «Строительные конструкции и водоснабжение» Поволжского государственного технологического университета. С использованием рассматриваемых в работе соединений при личном участии автора были внедрены: покрытие эстрады танцевальной площадки размерами 12x12 м п. Советском Республики Марий Эл; покрытие эстрады танцевальной площадки размерами 12x12 м из перекрестных деревянных ферм на МЗП в п. Мочалище Республики Марий Эл; покрытие склада готовых столярных изделий размером 18x18 м из деревянных ферм на МЗП в п. Суслонгер Республики Марий Эл; ангар для столярных изделий размером 12x104 м из деревянных ферм на МЗП в с. Великополье Оршанского района Республики Марий Эл.

В.15 Личный вклад автора заключается

заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, разработки теоретических задач настоящей работы, подготовке расчетных программ, проведении вычислительных экспериментов на математических моделях, разработке и изготовлении экспериментальных установок, проведении экспериментов с помощью этих установок, анализе и оценке полученных результатов, разработке практических рекомендаций, организации внедрения результатов работы, апробации результатов исследования в форме докладов на научно-технических конференциях и подготовке публикаций по выполненной работе.

В.16 Апробация результатов исследований. Основные научные положения и результаты исследований докладывались, обсуждались и были одобрены на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников по итогам научно-исследовательской работы г. Йошкар-Ола: Марийский ордена Дружбы народов политехнический институт им. А.М. Горького, Марийский государственный технический университет (МарГТУ), «Поволжский

государственный технологический университет» ПГТУ (1987, 1996, 2011, 2015 - 2018 г.г.); Межрегиональной научно-практической конференции «Региональные проблемы строительного и дорожного комплексов», г. Йошкар-Ола (2000 г.); Всероссийской междисциплинарной научной конференции «Вавиловские чтения. Тема чтений: Глобализация и проблемы национальной безопасности России в XXI веке» г. Йошкар-Ола (2003, 2005, 2007, 2010, 2011, 2015 г.г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов» г. Йошкар-Ола (2004, 2013 г.г.); Всероссийской конференции «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции», г. Чебоксары (2005, 2012, 2014, 2015 г.г.); II Международной научно-практической конференции «Инновации и технологии в лесном хозяйстве», г. Санкт-Петербург (2012 г.); Всероссийской научной конференции преподавателей, аспирантов, соискателей и студентов по проблемам архитектуры и строительства, г. Казань (2012, 2014, 2015 г.г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения», г. Йошкар-Ола (2012 г.); 14-й Международном научно-промышленном форуме «Великие реки», г. Нижний Новгород (2012 - 2014, 2016 г.г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 30-летнему юбилею кафедры строительных конструкций ОГУ, посвященной 45-летнему юбилею архитектурно-строительного факультета «Инновационные строительные технологии, теория и практика», г. Оренбург (2013, 2015 г.г.); VIII Академических чтениях РААСН – Международной научно-технической конференции «Механика разрушения строительных материалов и конструкций», г. Казань (2014 г.); V Международной научно-практической конференции «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения», г. Санкт-Петербург (2014 г.); Всероссийской (с международным участием) научной конференции студентов и молодых ученых «Модернизирующая Россия: культура, техника, человек»,

г. Йошкар-Ола (2015 г.); III Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса», г. Кострома (2015 г.); Первых Международных Лыковских научных чтениях, посвященных 105-летию академика А.В. Лыкова «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе», г. Москва; Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности» (МНТК Плановского-2016), г. Москва (2015 г.); Межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием) «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера» (ПОИСК-2017), г. Иваново (2017 г.); VII Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), г. Москва (2018 г.); XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», г. Новосибирск (2018 г.); V Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт», направление конференции: «Цифровые технологии: декларации и реальность», г. Тамбов (2018 г.); VII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». г. Новосибирск (2018 г.); XX Международной конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры», г. Тула (2019 г.); VI Международной сетевой научно-практической конференции «Интеграционные процессы в научно-техническом и образовательном пространстве» вузов-участников Российско-Кыргызского консорциума технических университетов (РККТУ), г. Бишкек, (2020 г.).

В.17 Публикации.

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражено в 76 публикациях автора объемом 31,97 п.л., авторский вклад – 25,57 п.л., в том числе 3 монографии, 5 статей – в изданиях, индексируемых в международной цитатно-аналитической базе данных Scopus, 16 статей – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 37 статей опубликованы в сборниках трудов международных, всероссийских конференций и межвузовских сборниках научных трудов, 6 авторских свидетельств и 10 патентов.

В.18 Структура и объём диссертации. Работа включает введение, 6 глав, заключение, библиографический список и приложения. Библиографический список содержит 234 источника. Общий объем диссертации составляет 328 страниц, из них основной текст – 265 страниц, библиографический список – 33 страницы, приложения – 8 страниц.

Глава 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ И ХАРАКТЕРИСТИКАХ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ ДРЕВЕСИНЫ; ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАГЕЛЯХ

1.1. Краткие исторические сведения о древних памятниках мировой архитектуры из древесины

Насущные требования повышенной комфортности, технико-экономические преимущества, растущая популярность экологически чистых материалов и другие факторы способствуют увеличению спроса на рынке недвижимости строительных сооружений, выполненных из цельной древесины. Нельзя не вспомнить, что деревянные сооружения строились по всему миру с самых давних времен. Доказательством тому служит большое количество построек из дерева, которые находили и продолжают находить при археологических раскопках. Больше всего деревянных построек обнаружено на территориях, расположенных в северной части Евразии, – по направлению от Норвегии через Швецию, Финляндию и далее на европейскую часть Российской Федерации до Сибири. В этих странах необходимость использования дерева для строительства жилых домов диктовалась суровыми климатическими условиями.

Самым древним деревянным сооружением, сохранившимся в первозданном виде до наших дней, является японский храм Хорюдзи (Храм Процветания Закона), возведенный более полутора тысячи лет назад – древнейший буддийский храм в Японии, место сосредоточения важнейших памятников самобытного буддийского искусства [24].

Считается, что Норвегия чуть ли не единственная страна, где в неприкосновенности сохранились древние деревянные церкви. Столбовая церковь Рингебю – одна из них. Она является одной из самых больших

деревянных церквей, сохранившихся до наших дней, и относится к культурному наследию страны. Датой ее постройки считается примерно 1220 год [8].

Самая крупная деревянная церковь Норвегии – церковь Хеддал. Она является действующей церковью для современных прихожан в городе Нутодден в губернии Телемарк. На стене наружной галереи видны рунические надписи, которые свидетельствуют о том, что церковь была построена в честь Пресвятой Девы Марии. Внутри церкви можно увидеть деревянный стул, украшенный красивой резьбой, который датируется 1200 годом [8].

Деревянное зодчество на Руси зародилось очень давно. Первые упоминания о деревянных ансамблях относятся к IV-V векам [25, 26]. Уже в X веке деревянные постройки на Руси строились массово. Многие памятники древнего зодчества сохранились до сих пор и являются ярчайшим примером умения работы топором. Например, в Кировской области есть деревянные строения без следов плесени и гнили, датированные 1805-1810 годами. Самое древнее деревянное сооружение на территории Кировской области - Михайло-Архангельская церковь с надвратной часовней. Деревянная церковь, которая на сто лет старше знаменитых Кижей, была срублена в 1610 году в Слободском Богоявленском мужском монастыре талантливыми вятскими мастерами без пилы и гвоздей. Первоначально она была и крепостной башней с воротами, и церковью одновременно [25, 27].

Несомненным памятником деревянной архитектуры является Преображенская церковь из села Козлятьево Кольчугинского района Владимирской области, которая была построена в 1756 году. В 1965 году церковь перевезена в Суздаль и восстановлена архитектором В.М. Анисимовым. Церковь является одним из главных экспонатов Суздальского музея деревянного зодчества [2]. Основу церкви создают три уменьшающиеся в размере восьмерика, стоящие на четверике. Они образуют гармоничную и уравновешенную пирамидальную конструкцию. Верхний восьмерик

завершается барабаном с луковичной главой. В церкви восстановлен иконостас.

Известным во всем мире и привлекающим тысячи туристов из разных стран архитектурным деревянным ансамблем являются Кижы, или Кижский погост, расположенный на острове Кижы Онежского озера. Он состоит из двух церквей (церковь Преображения Господня и Покровская церковь) и колокольни XVIII-XIX веков, окруженных единой оградой, представляющих собой реконструкцию традиционных оград погостов [28, 29]. В январе 1966 года на базе архитектурного ансамбля Кижского погоста был основан Государственный историко-архитектурный музей «Кижы», сюда кроме стоящих на своих первоначальных местах построек было свезено большое количество часовен, домов и хозяйственных построек из Заонежья, а также других регионов Карелии. По одной из легенд, церковь Преображения Господня построена одним топором без гвоздей в 1714 году плотником Нестором. Вторая церковь (Покровская церковь) была построена на полвека позже, в 1764 году [29].

Доступность дерева является одним из основных факторов популярности в качестве строительного материала. Однако применение цельной древесины ограничено размерами сортамента лесоматериала как по размерам поперечного сечения, так и по длине. Поэтому для получения более крупных конструкций, выходящих за пределы сортамента, используются различные виды соединений элементов деревянных конструкций: узловые соединения, сращивание, сплачивание. Все они осуществляются с помощью многочисленных вспомогательных элементов, которыми являются врубки, шпонки, колодки, хомуты, тяжи, нагели, гвозди, болты, клей [30-32].

1.2. Основные структурно-механические и теплофизические характеристики древесины как строительного материала для сооружений различного назначения

Согласно ГОСТ 23431-79* [33], древесина – это совокупность проводящих, механических и запасающих тканей, расположенных в стволах, ветвях и корнях древесных растений между корой и сердцевиной.

В основном древесина состоит из органических веществ, причем химический состав древесины разных пород практически одинаков. Абсолютно сухая древесина в среднем содержит 49 % углерода, 44 % кислорода, 6 % водорода, 0,1-0,3 % азота (рис. 1.1) [34, 35].

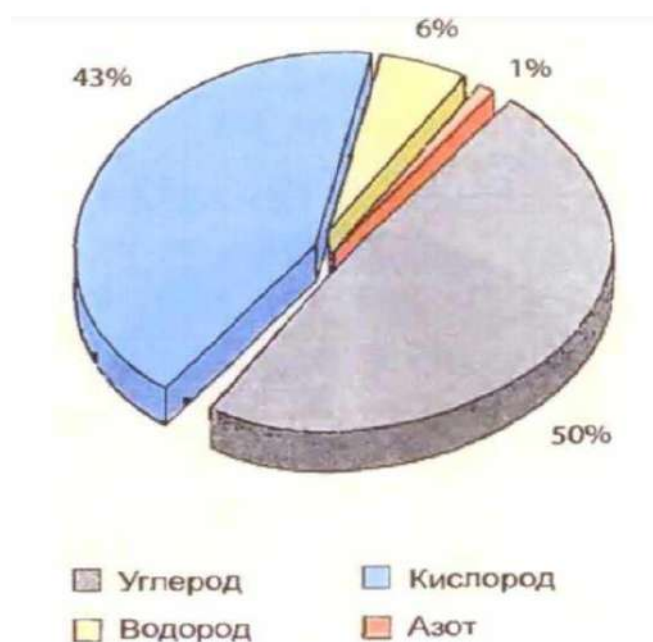


Рисунок 1.1. Химический состав древесины

На изменение химического состава древесины оказывают влияние такие параметры, как температура и влажность древесины, удельное давление и продолжительность прессования материала [1, 2, 32-35]. 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 и экстрактивные вещества (рис. 1.2) [3, 13].

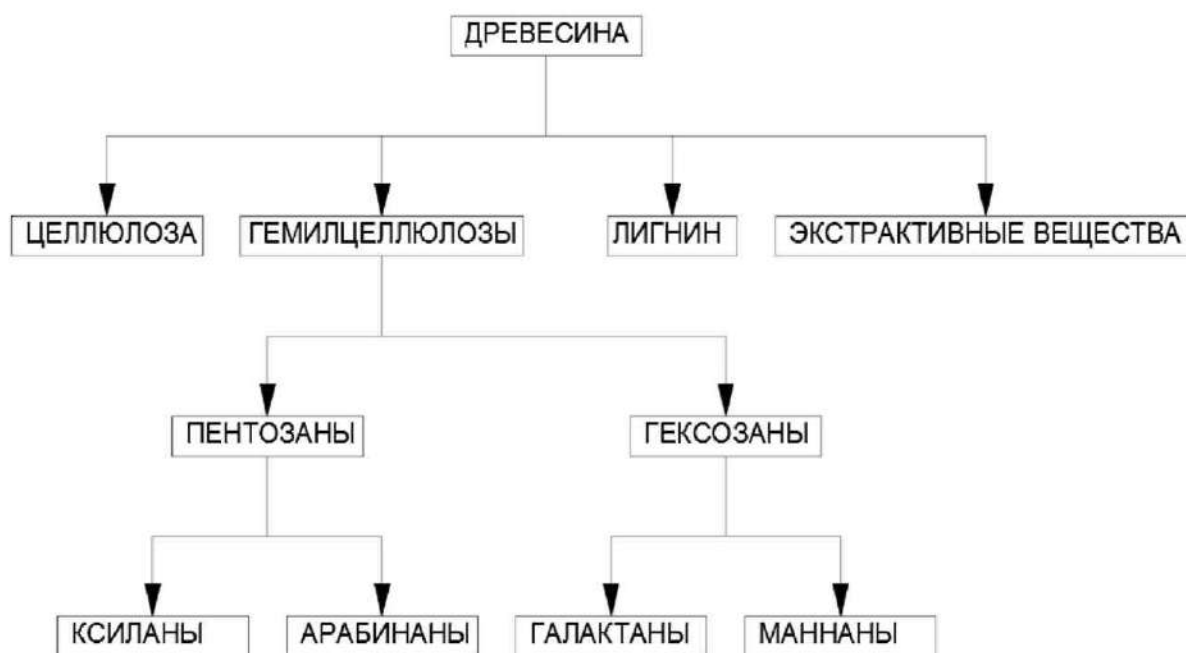


Рисунок 1.2. Органический состав древесины

Основное вещество древесины – целлюлоза, представляющая собой линейный полимер – полисахарид. Именно целлюлоза обеспечивает упругость и механическую прочность (рис. 1.3) [16, 33]. Это очень стойкое вещество белого цвета, не растворимое в воде, а также в обычных органических растворителях (эфире, спирте, ацетоне и других). Пучки макромолекул целлюлозы – тончайшие волокна, называются микрофибриллами,

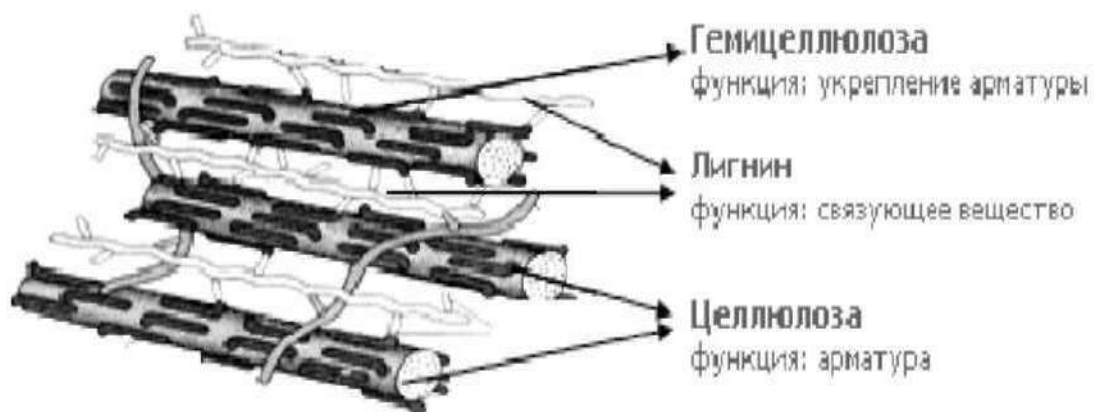


Рисунок 1.3. Строение клеточных стенок древесины

образующие целлюлозный каркас стенки клетки. Микрофибриллы ориентированы преимущественно вдоль длинной оси клетки, между ними находятся лигнин, гемицеллюлоза и вода. В древесине хвойных пород целлюлозы содержится больше (41-58 %), чем в древесине лиственных пород (39-47 %) [3, 13, 33].

Лигнин – полимер ароматической природы (полифенол), имеет сложное строение. По сравнению с целлюлозой он содержит больше углерода и меньше кислорода. Именно с этим веществом связан процесс одревеснения молодой клеточной стенки. Лигнин химически нестоек, легко окисляется, взаимодействует с хлором, растворяется при нагревании в щелочах, водных растворах сернистой кислоты, а также ее кислых солей [36].

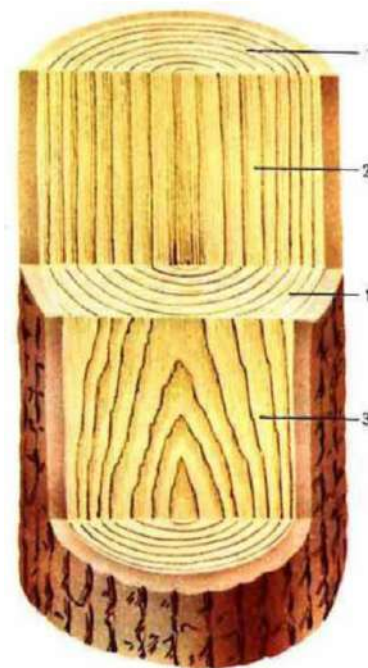
Гемицеллюлоза – группа полисахаридов, в которую входят пентозаны и гексозаны, находящиеся в составе клеточной стенки [37]. По сравнению с целлюлозой у гемицеллюлозы невысокая степень полимеризации, чем и объясняется повышенная растворимость в разбавленных щелочах и легкая гидролизуемость. В хвойной древесине пентозаны и гексозаны содержатся почти в одинаковых количествах, в лиственной древесине гемицеллюлозы почти исключительно состоят из пентозанов.

Древесина, кроме основных органических веществ, содержит сравнительно небольшое количество экстрактивных веществ – это смолы, пектины, жиры, таниды, камеди, дубильные и красящие вещества. Они растворяются в воде, спирте и эфире [38].

Известно, что древесина – материал анизотропный, т.е. отличается неодинаковыми свойствами в различных структурных направлениях [39]. Само слово «анизотропия» происходит от двух греческих слов – «анизос» (неравны) и «тропос» (направление) [1]. Анизотропия возникает вследствие особенностей анатомического строения древесины и ее волокнистого строения, в результате чего ее механические и упругие свойства резко отличаются для направлений вдоль и поперек волокон.

Для более полного представления о свойствах древесины их необходимо рассматривать относительно двух основных направлений (рис. 1.4) [40]:

- 1) *вдоль волокон* (совпадает с продольной осью деревянного элемента);
- 2) *поперек волокон* (проходит перпендикулярно продольной оси деревянного элемента), а именно:
 - *радиальное* (по радиусу ствола дерева);
 - *тангенциальное* (по касательной к годовому слою).



Прочностные и упругие свойства древесины резко отличаются для направлений вдоль и поперек волокон [13,41]:

- вдоль волокон достигается наибольшая прочность, наименьшие температурные деформации и деформации усушки;

- поперек волокон наблюдается наименьшая прочность, наибольшие температурные деформации и деформации усушки.

К физическим свойствам древесины относятся: влажность; средняя плотность; звукопроводность; электропроводность; теплопроводность; теплоемкость; температурный коэффициент линейного расширения; стойкость к коррозии; внешний вид (цвет, блеск, запах, текстура, макроструктура); механические свойства [42].

Влажность. Различают два вида влаги, содержащейся в древесине [16]:

- связанную, или гигроскопическую;
- свободную, или капиллярную.

Также различают влагу (химически связанная влага), которая входит в химический состав веществ, образующих древесину [38]. Она имеет значение только при химической переработке древесины.

Рисунок 1.4. Основные разрезы ствола:
1 - поперечный;
2 - радиальный;
3 - тангенциальный

Максимальное количество гигроскопической влаги при отсутствии свободной влаги в полостях клеток называется точкой насыщения волокон и составляет 30 % [43]. Дальнейшее увеличение влажности может происходить только путем заполнения пустот свободной влагой.

При содержании влаги 8-12 % различают комнатно-сухую древесину, при 15-20 % - воздушно-сухую, полусухой древесина считается от 40 % и выше содержания влаги, а сырой - до 200 % [19].

Существует термин «равновесная влажность древесины» – под ним понимают собственное значение влажности древесины, которое она приобретает, если длительно находится в неизменяемых условиях окружающей среды, т.е. при определенной температуре и влажности окружающего воздуха [23].

Чтобы определить равновесную влажность, можно воспользоваться диаграммой профессора Н.Н. Чулицкого [46] или профессора П.С. Серговского [19, 20, 44, 45].

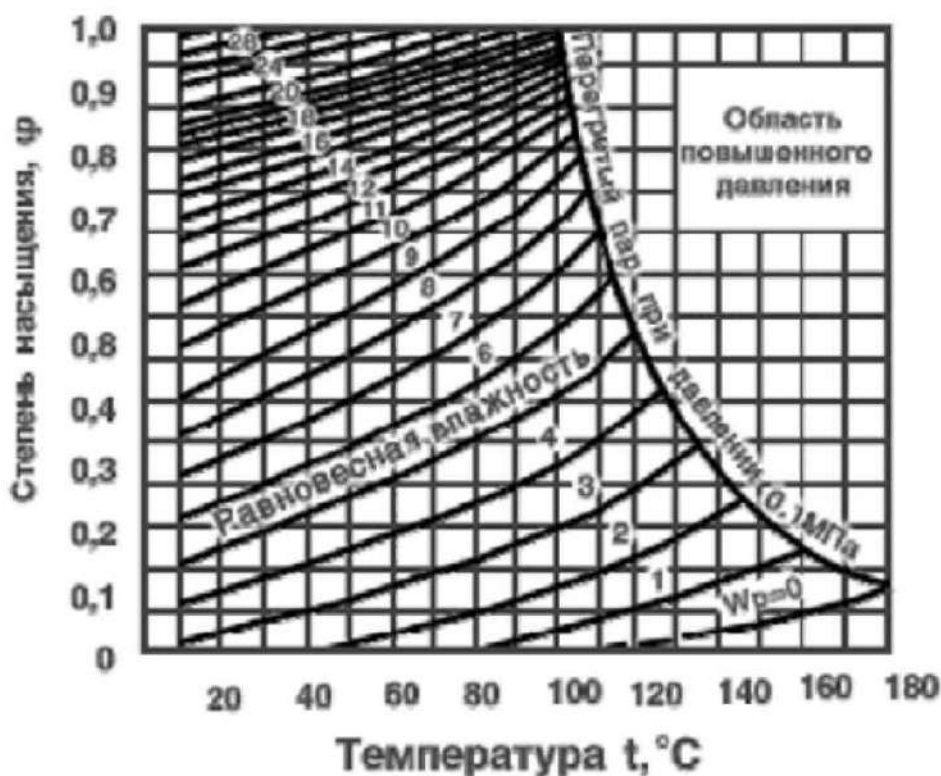


Рисунок 1.5. Диаграмма равновесной влажности П.С. Серговского [47]

Диаграмма профессора П.С. Серговского (рис. 1.5) построена в координатах температура – степень насыщения воздуха (по вертикали - относительная влажность воздуха, по горизонтали - его температура). Пересечение данных показателей позволяет получить наклонную линию, которая показывает в процентах влажность древесины.

Свою диаграмму для определения влажности древесины, хранящейся в помещении с той или иной влажностью и температурой воздуха, составил профессор И.Н. Чулицкий. С помощью его диаграммы можно установить влажность с точностью до 0,75 % [460]. На диаграмме И.Н. Чулицкого (см. рис. 1.6) по вертикали расположена влажность воздуха, по горизонтали – температура воздуха. Наклонные линии показывают влажность древесины.

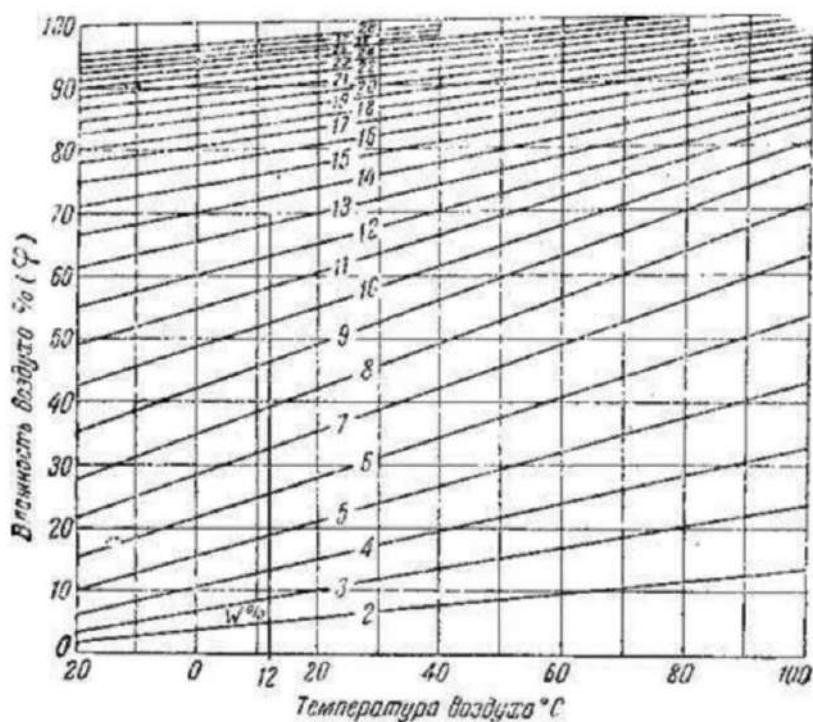


Рисунок 1.6. Диаграмма равновесной влажности древесины И.Н. Чулицкого [46]

Содержание влаги в древесине (относительная или абсолютная влажность) можно определить по формуле [48]:

$$W_{\text{отн}} = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\%; \quad W_{\text{абс}} = \frac{m - m_0}{m} \cdot 100\% \quad , \quad (1.1)$$

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

Между этими характеристиками существует очевидная связь:

$$W_{\text{отн}} = W_{\text{абс}} \frac{100}{1 - W_{\text{абс}}} \quad (1.2)$$

Наиболее влажной в свежесрубленной древесине является заболонь, наименее влажной – ядро [49]. Свободная влага при высыхании такой древесины удаляется быстро и не оказывает влияния на изменение свойств древесины, а гигроскопическая влага требует искусственной сушки. Необходимо иметь в виду, что 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 повышении – разбухание [18]. Все это, безусловно, следует обязательно учитывать при использовании древесины в различных конструкциях.

Усушка древесины – это уменьшение ее линейных размеров и объема при высыхании. При этом усушка составляет всего 0,1% вдоль волокон, поперек же волокон она оказывается более существенна. В радиальном направлении – 3-5 %, в тангенциальном – 6-10 % [15, 43, 50].

Разбухание – при поглощении влаги способность древесины увеличивать свои размеры и объем. При повышении влажности свыше точки насыщения волокон (когда влага занимает полости клеток древесины) дальнейшего разбухания не происходит [51].

Растрескивание торцов происходит по причине различной скорости испарения влаги через боковые и торцевые поверхности.

Усушка сильно вредит деревянным конструкциям еще и потому, что при этом возникают трещины в растянутой части. Они имеют радиальное направление. Главная трещина идет по кратчайшему направлению от периметра сечения к сердцевине и может вызвать расслоение балки [51].

Средняя плотность, ρ , кг/м³. С изменением влажности меняется средняя плотность древесины, в связи с чем плотность древесины принято сравнивать при одной и той же стандартной влажности – 12 % [18].

Плотность древесины зависит от породы, количества пустот, толщины стенок клеток и содержания в ней влаги. При уменьшении влажности снижается плотность древесины, и она становится легче почти в 2 раза. Плотность поздней древесины годовичного слоя в 2-3 раза больше, чем ранней. Самая высокая плотность отмечается у дуба, далее (по убывающей) следуют ясень, клен, лиственница, бук, береза, орех, сосна, липа, осина, ель, пихта [52].

Звукопроводность – так называют способность древесины проводить звук. У древесины она довольно высока и зависит от породы дерева и от направления волокон. Быстрее всего звук проходит вдоль волокон, медленнее – в радиальном и еще медленнее в тангенциальном направлении. В продольном направлении звукопроводность древесины в 16 раз выше, чем у воздуха, а в поперечном – в 4 раза. Не случайно деки всех музыкальных инструментов делают из древесины ели и пихты, это связано с тем, что их древесина резонирует звук. Сырая и загнившая древесина проводит звук значительно хуже [3].

Электропроводность, γ , $1/\text{Ом}$. Данное свойство древесины характеризует ее сопротивление прохождению электрического тока. Способность древесины проводить электрический ток находится в обратной зависимости от электрического сопротивления. В сухом состоянии древесина не проводит электрический ток, т.е. выступает диэлектриком, что дает возможность использовать ее в качестве изоляционного материала. Электрическая прочность – это способность древесины противостоять пробое, 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 [53].

Теплопроводность, λ , $\text{Вт}/(\text{мК})$. Теплопроводность древесины – это свойство, характеризующее интенсивность переноса тепла в материале [54]. Вследствие пористого строения древесина плохо проводит тепло. Теплопроводность древесины зависит от плотности, влажности и направления

волокон. 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. Коэффициент теплопроводности древесины колеблется в пределах $\lambda = 0,095 \dots 0,4 \text{ Вт/(мК)}$ [54].

Температурное расширение, k_T , 1/К. Под ним понимается способность древесины при нагревании увеличивать линейные размеры и объем [54]. Линейное расширение при нагревании характеризуется коэффициентом линейного расширения k_T , показывающим величину изменения размера тела при нагревании на 1°C. В древесине она различна вдоль волокон и поперек волокон. Коэффициент линейного расширения поперек волокон пропорционален плотности древесины и в 7-10 раз больше коэффициентов расширения вдоль волокон. Незначительное линейное расширение от тепла вдоль волокон дает возможность при возведении деревянных зданий и сооружений отказаться от устройства температурных швов. Влияние теплового расширения поперек волокон компенсируется наличием щелей усушки между элементами [51].

Стойкость к коррозии. Коррозия древесины – это разрушение материала под воздействием внешней агрессивной среды. Очевидно, что коррозионная стойкость древесины очень важна для строений и изделий, особенно тех, что эксплуатируются под открытым небом.

Скорость коррозии древесины зависит от влияния различных факторов окружающей среды [1]:

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

Кроме того, большое значение на разрушение древесины от коррозии имеет воздействие на нее солей, щелочей, кислот [54]. При воздействии некоторых сильных неорганических кислот или их солей разрушается одна из основных составляющих древесины – целлюлоза. Древесина в результате гидролиза целлюлозы теряет свою прочность. На целлюлозу практически не оказывают агрессивного воздействия большинство растворителей (эфир, ацетон, спирт), разбавленные растворы щелочей и минеральных кислот, органические кислоты. Постепенное разрушение лигнина происходит при воздействии на материал щелочей и их растворов (сернокислые соли высоких концентраций, соли цинка, железа и алюминия). Слабые (с концентрацией до 5%) растворы минеральных кислот и пыль солей калия оказывают лишь незначительное агрессивное воздействие на поверхностный слой древесины, не разрушая при этом ее структуры и не оказывая пагубного влияния на прочность материала. С увеличением концентрации и повышением температуры минеральных солей, древесина поддается уже более активной коррозии. Под воздействием минеральных кислот сначала дерево меняет окрас, темнея, далее наблюдается разрушение основных составляющих и потеря связей между волокнами. При этом механическая прочность древесины, безусловно, существенно уменьшается [55].

Доказано, что лиственные породы химически менее устойчивы к коррозии, по сравнению с хвойными. Обусловлено это наличием в составе хвойных пород смолистых веществ, благодаря которым древесина не разрушается при воздействии нейтральных солей любых концентраций и их растворов [3].

Внешний вид древесины. Внешний вид древесины характеризуется: цветом, текстурой, блеском, запахом, макроструктурой [3].

Цвет древесины. Под ним понимают определенное зрительное ощущение, в большей степени зависящее от спектрального состава светового потока, отраженного древесиной. Цвет многих пород известен и служит одним из устойчивых признаков при их распознавании и идентификации. Зависит

цвет от породы дерева, места его произрастания, воздуха, а также других факторов. По цвету древесины, наличию различных вкраплений порой можно сделать выводы о состоянии и качестве материала. Например: цвет здоровой ели – от светло-желтого до белого; синеватая окраска хвойной древесины говорит о начальной стадии загнивания (известно, что цвет здоровой сосны – от коричневатого-желтого в зонах, насыщенных смолой, до светло-желтого; черные и темно-коричневые пятна на буковой древесине выступают признаком загнивания (цвет здорового бука – от желто-бежевого до розовато-бежевого). Цвет хорошей, качественной древесины не должен быть достаточно однородным. Например, у древесины дуба отмечают до 20 цветовых оттенков, а у ореха – до 40. Кроме того, с годами древесина у всех пород деревьев темнеет [1].

Блеск древесины. Это ее способность направленно отражать световой поток. Зависит блеск от плотности, количества и размеров сердцевинных лучей и плоскости разреза. Блеск древесины будет тем значительнее, чем крупнее сердцевинные лучи и чем плотнее древесина. Кроме того, в радиальной плоскости блеск древесины выражен всегда сильнее, чем в тангенциальной.

Загнивание и другие негативные факторы приводят к потере блеска. Известно, что наибольшим блеском обладает древесина таких пород, как бук, дуб, акация. Липа, тополь, осина, тик имеют матовый блеск. Золотистый блеск характерен для черешни. Серебристым блеском отличается сибирский кедр [54].

Текстура древесины. Это рисунок, образующийся на поверхности древесины вследствие перерезания ее анатомических элементов (серцевинных лучей, годичных слоев, сосудов). При этом характер рисунка зависит от направления разреза, размера сердцевинных лучей, расположения волокон, ширины годичных слоев и различий в окраске между ранней и поздней древесиной. Красивой текстурой отличается древесина ореха, дуба, ясеня, красного дерева. Изменение этого свойства вызывают химические

окраски и грибные поражения. Существенное значение имеет текстура (а также и цвет) при изготовлении мебели, предметов декора и в художественных работах [1].

Запах древесины. Зависит от содержания в древесине смолистого эфирного масла, ароматических и дубильных веществ. Деревья хвойных пород (сосна, кедр), содержащие смолу, обладают наиболее сильным запахом. Из лиственных пород это можно сказать о дубе. А вот древесина тополя и липы запаха практически не имеет. После раскроя древесины в сыром виде по мере высыхания запах древесины значительно снижается. Выветривание ароматических веществ и потерю естественного запаха вызывают загнивание, поражение грибами, а также длительное хранение [3].

Макроструктура древесины. Это такие особенности древесины, которые можно исследовать простейшими оптическими средствами, или те, что доступны невооруженному глазу. При оценке макроструктуры определяют такие характеристики: степень равнослойности древесины; равноплотность древесины; ширину годичных слоев; содержание поздней древесины в годичных слоях; величину и характер распределения естественных неровностей, которые возникли в результате перерезания анатомических элементов [30, 31].

Показателем, характеризующим ширину годичных слоев, служит число слоев, приходящееся на 1 см отрезка, отмеренного по радиальному направлению на торцовой поверхности образца [30].

Как правило, степень равнослойности древесины оценивают по разнице в числе годичных слоев на двух соседних отрезках.

Содержание поздней древесины равно отношению (в процентах) суммарной ширины зон поздней древесины к общей протяженности в радиальном направлении участка измерения, включающего целое число слоев [1].

Равноплотность древесины характеризует равномерность распределения механических тканей по ширине годичного слоя. Малой равноплотностью

обладают такие породы, как лиственница, сосна, дуб, ясень. Высокая раноплотность характерна для осины, клена, ольхи, липы [22, 52].

Поверхность древесины всегда (даже после тщательной обработки режущими инструментами) будет иметь определенные неровности, образованные перерезанием полых анатомических элементов. Самые большие неровности наблюдаются у лиственных пород с крупными сосудами (дуб, ясень, грецкий орех). В связи с тем, что древесину этих пород обычно используют для отделки помещений, производится порозаполнение, так как перед полированием необходимо уменьшить величину этих неровностей.

Механические свойства древесины. К таким свойствам древесины относятся: твердость, жесткость, упругость, ударная вязкость, прочность, способность удерживать металлические крепления [22].

Твердость – это способность древесины сопротивляться внедрению в нее других тел [1]. Учитывая этот показатель, следует иметь в виду, что твердость торцевой поверхности выше твердости боковой поверхности (тангенциальной и радиальной) у лиственных пород на 30 %, а у хвойных на 40 %. Твердость древесины, высушенной до 12 % влажности, в 1,52 раза выше твердости древесины 30 % -ой влажности [22]:

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).

Упругостью называют способность древесины восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. При этом модуль упругости древесины вдоль волокон в 20 раз больше модуля упругости древесины поперек волокон. Очевидно, что чем больше модуль упругости, тем древесина более жесткая [1].

Жесткость древесины – это способность ее сопротивляться деформированию под действием внешних сил. Жесткость древесины зависит от направления нагрузок по отношению к волокнам и их длительности, а кроме того, от влажности древесины [54].

Прочность – это способность древесины сопротивляться разрушению от механических усилий, характеризующихся пределом прочности [54]. Прочность древесины зависит от действия разных факторов: направления и скорости действия нагрузки, плотности, влажности, наличия пороков и, конечно, породы древесины. Прочность в значительной мере зависит от характера и направления действия нагрузок. С увеличением плотности древесины увеличивается и ее прочность. Влажность же, напротив, уменьшает прочность древесины. Например, прочность древесины вдоль волокон под действием растягивающих нагрузок составляет порядка 130 МПа, а под действием сжимающих нагрузок – около 50 МПа; прочность под действием изгибающих сил – около 100 МПа, прочность при скалывании – около 0,5 МПа [1].

Ударная вязкость – это способность древесины поглощать работу при ударе без разрушения. Определяется данная характеристика при испытаниях на изгиб. Чем больше величина работы, потребной для излома образца древесины, тем выше его вязкость. Доказано, что ударная вязкость древесины деревьев лиственных пород при этом примерно в 1,5-2 раза выше вязкости древесины хвойных пород [1].

Способность удерживать металлические крепления. Важное свойство древесины удерживать в себе гвозди, шурупы, нагели, а также другие металлические крепления объясняется ее упругостью [54]. Вбиваемый в древесину гвоздь раздвигает волокна, которые благодаря своей упругости давят на поверхность гвоздя, чем оказывают сопротивление его выдергиванию. Это сопротивление зависит от объемного веса, строения древесины, влажности и 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. Соответственно гвозди с квадратными или многогранным поперечным сечением, которые имеют большую поверхность, по сравнению с гвоздями круглого сечения, держатся в древесине прочнее. При этом 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, составляющей не меньше 1/2 его длины. Разумеется, в твердой древесине гвоздь держится прочнее, чем в мягкой. Удельное сопротивление гвоздей и шурупов выдергиванию определяется на основании ГОСТ 16483.33-77 [56].

Механические свойства древесины также характеризуют способность древесины сопротивляться воздействию внешних сил: смятию, растяжению, скалыванию, сжатию, сдвигу, изгибу, кручению [1].

При этом выделяют ещё упругие деформации и деформации последействия. Непосредственно после приложения нагрузки появляются *упругие (мгновенные)* деформации. При действии этой же нагрузки с течением времени, помимо упругих, развиваются *деформации последействия*. При напряжениях, не превышающих предел длительного сопротивления, развиваются деформации упругого последействия (*эластичные*). При напряжениях, превышающих предел длительного сопротивления, развиваются уже *пластические* деформации. Пластические, или остаточные, деформации являются неупругими, необратимыми и остаются после снятия нагрузки. Они составляют значительно большую долю, чем упругие и эластичные деформации. В процессе разгрузки упругие деформации вскоре исчезают, через некоторый промежуток времени исчезают и эластичные деформации, а пластические деформации остаются навсегда. Действие упругих деформаций и деформаций последействия приводит к полной деформации.

Смятие. Смятие – это напряженное состояние элемента по поверхности, воспринимающей нагрузку. Различают смятие вдоль волокон, поперек

волокон и под углом к ним [4]. Прочность древесины на смятие вдоль волокон мало отличается от прочности древесины на сжатие вдоль волокон. Смятие древесины поперек древесины слабее, чем вдоль волокон и зависит от размеров сминаемой площади и отношения ее ко всей плоскости смятия. При смятии древесины поперек волокон по всей поверхности сминаемого элемента деформации будут больше, чем при смятии части поверхности, т.е. наличии незагруженной части сминаемого элемента. В целом работа древесины на смятие происходит с сильным развитием деформаций и постепенным разрушением.

Растяжение. Испытание древесины на растяжение проводится на образцах сечением 0,4x2 см. Сопротивление чистой древесины растяжению вдоль волокон довольно велико. Средняя величина предела прочности при растяжении вдоль волокон для всех пород составляет 1300 кгс/см. Большое влияние на прочность при растяжении вдоль волокон оказывает строение древесины. Древесина при таком растяжении работает подобно хрупким материалам, т.е. без развития пластических деформаций. В связи с тем, что прочность древесины при растяжении поперек волокон оказывается в 25-30 раз меньше, чем вдоль волокон, то при проектировании конструкций важно избегать приложения усилий, действующих поперек волокон. Прочность древесины на растяжение поперек волокон имеет существенное значение при разработке режимов резания, а также сушки древесины [57].

Сжатие. Испытание на сжатие проводится на образцах в форме призм размером 2x2x3 см [4]. Различают сжатие вдоль и поперек волокон. Если сжатие осуществляется вдоль волокон, то деформация выражается в небольшом укорочении образца. Разрушение при сжатии начинается с продольного изгиба отдельных волокон, что во влажных образцах из вязких и мягких пород проявляется как смятие торцов и выпучивание боков, а в сухих образцах и в твердой древесине приводит к сдвигу одной части образца относительно другой. Предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон в 2-2,5 раза меньше, чем при растяжении. Прочность древесины при сжатии

вдоль волокон выше, чем поперек волокон приблизительно в 8 раз [58]. В случае сжатия поперек волокон не всегда удается установить точно момент разрушения древесины и определить величину разрушающей нагрузки. На сжатие поперек волокон древесину испытывают в радиальном и тангенциальном направлениях. У лиственных пород с широкими сердцевинными лучами (бук, дуб) прочность при радиальном сжатии в 1,5 раза выше, чем при тангенциальном. У хвойных пород наоборот – при тангенциальном сжатии прочность выше. В среднем для сосны и ели предел прочности при сжатии составляет 40-50 МПа. Влияние на качество пороков древесины при сжатии меньше, чем при растяжении. Все это позволяет констатировать, что благодаря пластическим деформациям работа сжатых элементов в конструкциях оказывается более надежной, чем при растяжении [57].

Изгиб. При изгибе верхние слои древесины испытывают напряжение сжатия, а нижние – растяжения вдоль волокон. Примерно посередине высоты элемента проходит плоскость, где нет ни напряжения растяжения, ни напряжения сжатия, эта плоскость называется нейтральной, здесь возникают максимальные касательные напряжения [57]. Значение предела прочности при изгибе занимает промежуточное положение между прочностью на сжатие и растяжение и составляет в среднем 75-80 МПа. Влияние пороков значительно из-за наличия растянутой зоны. В пределах небольших напряжений наблюдается упругая стадия работы древесины. С увеличением нагрузки усилие сжатия все больше воспринимают волокна, находящиеся ближе к нейтральной оси, а крайние волокна начинают терять устойчивость, т.е. краевое напряжение сжатия меньше, а напряжение растяжения больше.

Сдвиг. Сдвиг – это перемещение одной части детали по отношению к другой, вызванное внешними силами. Существует три типа сдвига древесины: скалывание поперек волокон; скалывание вдоль волокон; перерезание поперек волокон (рис. 1.7) [57].

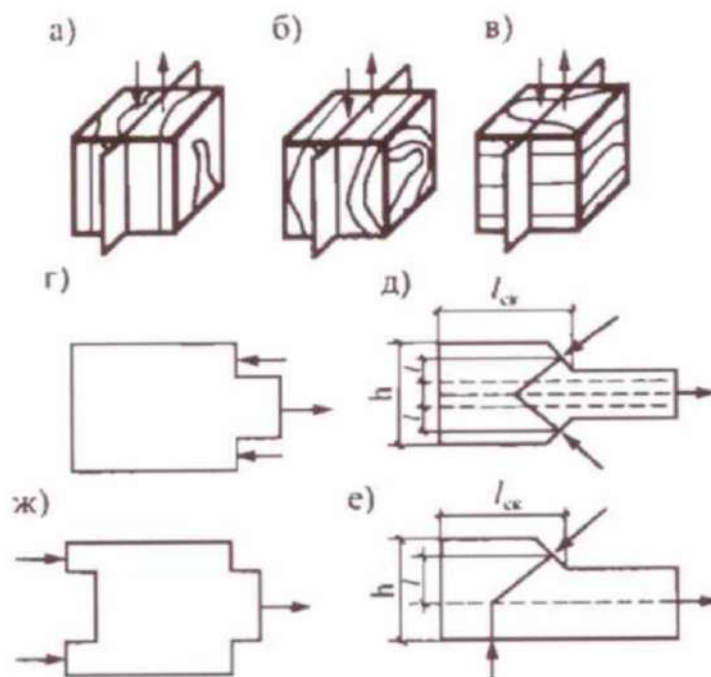


Рисунок 1.7. Виды сдвига: а – сдвиг, вызывающий скалывание древесины вдоль волокон; б – сдвиг, выдвигающий скалывание древесины попер волокон; в – сдвиг, вызывающий перерезание поперек волокон древесины; г-е – сдвиг, вызывающий одностороннее скалывание древесины (г- без обжатия по плоскости скалывания); ж – сдвиг, вызывающий двустороннее скалывание древесины без обжатия по плоскости скалывания

Скалывание. Скалывание древесины – это разрушение в результате сдвига одной части материала относительно другой. Предел прочности при скалывании поперек волокон в 2 раза меньше предела прочности при скалывании вдоль волокон [57]. Древесина лиственных пород обладает прочностью при скалывании вдоль волокон в 1,6 раз выше, чем древесина хвойных пород. У лиственных пород, древесина которых обладает широкими сердцевинными лучами (дуб, бук, граб), скалывание в радиальной плоскости на 10-30 % ниже, чем в тангенциальной. На скалывание вдоль волокон древесина работает довольно часто (например, в соединениях стропильных ферм способом лобовых врубок). На скалывание поперек волокон древесина работает реже (например, в шпонках и шпунтовых соединениях).

Перерезание поперек волокон. Предел прочности древесины при перерезании поперек волокон в 4 раза выше прочности при скалывании вдоль

волокон [58]. В связи с тем, что сопротивление древесины сжатию поперек волокон значительно меньше, чем перерезанию, то разрушение деталей из древесины, работающих на перерезание, обычно происходит от сильного местного смятия. В общем случае при перерезании древесины поперек волокон происходит смятие волокон и изгиб их под действием срезающего усилия. На перерезание поперек волокон древесина работает нечасто (например, в нагелях). Сопротивление перерезанию в тангенциальном направлении обычно несколько ниже, чем в радиальном.

Кручение. Прочность древесины при кручении в значительной мере определяется ее прочностью при скалывании. Прочность при кручении в 1,5 раза выше, чем прочность при скалывании вдоль волокон, что может быть объяснено повышением коэффициента внутреннего трения древесины при кручении стержня. При кручении в материале возникают касательные напряжения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: в плоскости, параллельной оси, и в плоскости, перпендикулярной оси закручиваемого стержня. Эти напряжения возрастают от центра, где они равны нулю, по направлению к периферии, где они достигают максимума. Древесина работает на кручение в валах, осях повозок, в лопастях винта в самолетах, при завинчивании свай и т.д.

1.3. Основные виды и способы крепления узловых элементов деревянных изделий в строительных конструкциях

Известно, что первые болты с нарезкой начали применять еще в Древнем Египте. Болты без нарезки – прототипы современных гвоздей использовали еще раньше в Древнем Риме в качестве осевых стержней в дверных устройствах. Они представляли собой стержень со специальными прорезями, куда вставлялся клин, препятствующий смещению болта. Вместе с другими крепежными деталями винты были задействованы И. Гуттенбергом в его первом печатном станке. Вскоре их начали применять изготовители доспехов

для воинов и мастера часовых дел. В записных книжках Леонардо да Винчи найдены записи и зарисовки проектов нескольких винторезных станков. Однако первый станок, который был построен, датируется 1568 годом, это изобретение французского математика Ж. Бессона. К концу XVII века винты получили широкое распространение в огнестрельном оружии. Первые сведения о гайках с резьбой относятся к XVI - началу XVII веков. Винтом тогда называли болт, имеющий резьбу. Широчайшее распространение и применение гайки и болты получили с началом промышленной революции примерно в 1765 году, когда стало известно, что использование резьбовых крепежных элементов значительно повышает технологичность и надежность машин.

По этой же причине подобные крепежные элементы вскоре начали применять также для скрепления частей деревянных конструкций. Очевидным преимуществом таких соединений по сравнению с уже известным креплением с помощью металлических гвоздей стало то, что они обладают более высокими прочностью, надежностью и долговечностью, а кроме того, являются полностью разборными (без потери качества) и пригодными для повторного применения. Такие металлические соединения деревянных конструкций получили название нагельные соединения.

Нагельное соединение (нагель) – это соединение элементов деревянных конструкций с помощью нагелей [60], которые представляют собой стержни из металла, стеклопластика, древесины (в редких случаях) или пластины прямоугольной формы. Основными материалами соединения являются древесина и металл. Легкие деревянные конструкции с применением нагелей нашли широкое применение в малоэтажном строительстве, промышленном строительстве, мансардном строительстве, в кровельных конструкциях, при реконструкции зданий.

Само название термина «нагель» пошло от морского «кофель-нагель», который обозначает круглый стержень, изготовленный из дерева или металла, имеющий рукоять. Такой стержень использовался для крепления и укладки

спускаемого такелажа. После того, как данный термин вышел за границы Германии, он стал обозначать обструганный до определенной длины элемент, которым соединяли бревна.

Нагельные соединения существенно потеснили такие крепежные элементы, гвозди. Первые гвозди изготавливались из природных материалов (рыбьи кости и шипы растений). Появление первых металлических гвоздей датируется бронзовым веком, когда их отливали и выковывали. Впоследствии материалом для производства гвоздей стала служить проволока - железная или медная. Бронзовые гвозди находили при раскопках строений Древнего Египта и других древних культур. На Руси гвозди ковали с X-XIII веков. Изначально производство гвоздей было ручным и дорогостоящим. Гвозди стали доступным товаром лишь в начале XIX века с появлением машин для изготовления кованых гвоздей и гвоздей из проволоки. К концу XIX века проволочные гвозди практически вытеснили из употребления кованые за счет своей более удобной формы. Современные гвозди изготавливают в основном из стали.

В последние годы все большее распространение получают деревянные конструкции с новой разновидностью нагельных соединений – на металлических зубчатых пластинах (МЗП). Металлические зубчатые пластины (МЗП) представляют собой стальные прямоугольные элементы толщиной $1 \div 2,5$ мм с выштампованными и отогнутыми в одну сторону зубьями [41], которые при изготовлении конструкций вдавливаются в древесину. Каждый зуб имеет специальный желоб для увеличения его жесткости, а в вершине — смещение острия, благодаря чему зубья при запрессовке изгибаются и заанкериваются в древесине. Специальное расположение зубьев позволяет на 1 кв.дециметре расположить их до 70 штук. Выбранная толщина металла пластины оптимальна для ферм пролетом до 12,0 м, арочных и рамных конструкций – до 30,0 м, балок – до 10,0 м. Металлические зубчатые пластины МЗП 1,2x70 изготавливаются в соответствии с техническими условиями ТУ 1111-002-48314050-98 [61] на

основании сертификата соответствия № РОСС RU СЛ44 Н0076 из оцинкованной листовой или рулонной холоднокатаной стали толщиной 1,2 мм марки 08пс по ГОСТ 14918-80 [62] с цинковым покрытием толщиной 14...17 мкм. МЗП используются для сборки деревянных строительных конструкций (стропильных ферм, составных балок, ферм перекрытия, стеновых панелей). В настоящее время можно перечислить следующие направления применения МПЗ.

1. Изготовление стеновых панелей, балок перекрытия на МЗП, ферм покрытия на МЗП осуществляется в заводских условиях на установке, снабженной приспособлениями для фиксирования элементов в проектном положении и прессом для запрессовки МЗП в узловые соединения.

2. Конструкции деревянные на МЗП соответствуют требованиям ТУ 5389-001-48314050-98 [63] и СП 64.13330.2017 [64].

3. Конструкции деревянные на МЗП, стеновые панели изготавливают из фрезерованных досок хвойных пород (сосна) второго сорта, оторцованных до размеров и формы, указанных на чертежах. Конечное сечение фрезерованных досок стропильных конструкций заводского изготовления – 46x196, 46x146, 46x96. Точность размеров при изготовлении заготовок по длине: 2 мм, по толщине 0,5 мм, по ширине 1 мм. Влажность древесины в момент изготовления не превышает 15%.

4. Сечение исходных пиломатериалов – 50x200, 50x150, 50x100 с плюсовыми припусками.

5. Требования к качеству исходных пиломатериалов, применяемых в конструкциях заводского изготовления: пиломатериал соответствует второму сорту по ГОСТ 8486-86*Е [65]; количество сросшихся здоровых сучков на каждом м.п. не более 4-х при максимально допустимом размере сучка в долях ширины пластин; на кромках пиломатериала не более 3-х сучков на любом м.п. при размере сучка не более ширины кромки; сумма размеров всех сучков, расположенных на участке длиной 200 мм, не превышает предельного размера допускаемых сучков; покоробленность продольная по кромке – макс. 4 мм на

длине 2 м, покоробленность по плоскости – макс. 10 мм на длине 2 м; обзол – не разрешен, растрескивание торцов – не разрешено, гниль – не разрешена; предельное отклонение от номинальных размеров по толщине заготовок – $\pm 0,5$ мм, по ширине – $\pm 0,8$ мм; ширина годичных слоев в древесине нижних (растянутых) поясов конструкций не более 5 мм, а содержание в них поздней древесины не менее 20 %.

Высокие требования к сырью вместе с использованием уникального крепежного элемента - МЗП обеспечивают уникальные потребительские качества продукции.

1. Высокие показатели несущей способности соединений на МЗП (1 см² МЗП несет до 11 килограмм силы). Это позволяет создавать большепролетные конструкции, обеспечивая расстояние между опорами до 10-12м.

2. Точность изготавливаемых конструкций. Поскольку проектирование ведется с использованием современных компьютерных программ, точность при проектировании ± 1 мм, а при производстве конструкций ± 10 мм.

3. Возможность воплотить замыслы архитектора. Нетиповое строительство предполагает всевозможные формы крыш. Обычными традиционными методами достичь этого бывает достаточно дорого и трудоемко, а порой и невозможно. Конструкции на МЗП позволяют сделать это.

4. Быстрота и качество работ на стройплощадке. Поскольку все конструкции произведены на заводе, на строительной площадке их остается только собрать все вместе. Дом собирается как из конструктора, причем совместимость всех деталей этого конструктора обеспечивается точностью при проектировании и производстве конструкций.

5. Легкость конструкций, обусловленная высокой технологичностью их сборки. Соединяемые элементы расположены в одной плоскости, что позволяет уменьшить расход древесины от 1,5 до 3 раз. Несущие деревянные конструкции весят, как правило, порядка 70-80 кг (но не более 110кг), что позволяет вести монтаж без использования специальной подъемной техники

бригадой из 4-5 человек.

6. Снижение издержек при транспортировке и монтаже конструкций, обусловленное их малым весом.

7. Древесина обладает рядом преимуществ по сравнению с другими материалами. Древесина экологична, доступнее других конструкционных строительных материалов; легче стали в 16 раз и бетона в 5 раз, что позволяет сократить расходы при транспортировке и строительстве фундаментов; дерево приятно на ощупь независимо от тепла или холода и т.д.

8. Гарантированная прочность конструкций. Все изготавливаемые конструкции рассчитываются на нагрузки в соответствии с требованиями Строительных норм и правил (СНиП) с использованием современных программных средств.

9. Чистота строительной площадки и культура производства. При строительстве из деревянных конструкций единственный мусор – обрезки и опилки.

10. Долговечность соединений на МЗП, поскольку соединительные элементы имеют антикоррозионное покрытие.

11. Компактность и эстетичный вид узлов с соединениями на МЗП.

Вместе с тем у МЗП с однонаправленными зубьями имеются недостатки. Один из основных – различная прочность и деформативность в зависимости от угла между осью пластины и осью действия усилий, а также угла направления волокон древесины к оси действия усилия. Недостатком является также малая изгибная жесткость зубьев у основания в продольном направлении [14].

Металлические зубчатые пластины (МЗП) (рис. 1.8) предназначаются для использования в узловых и стыковых соединениях дощатых ферм, рам, каркасов, плит покрытий и панелей стен и других конструкций. Соединение при помощи МЗП заранее собранных и зафиксированных элементов конструкции осуществляется на специальном столе с использованием механизированных средств запрессовки. Несущая способность соединений

деревянных элементов на МЗП зависит от их типа, размеров, формы, глубины вдавливания в древесину и расположения зубьев, от толщины пластины и перекрываемой ею площади сопрягаемых элементов, от породы древесины и ее влажности [14, 17].

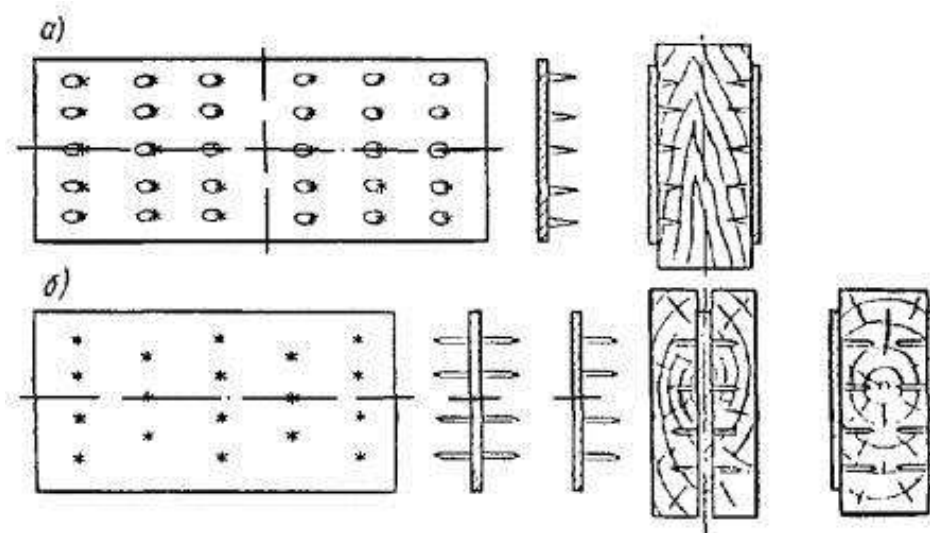


Рисунок 1.8. Типы металлических соединений, применяемых для сопряжения деревянных элементов: а – металлическая зубчатая пластина МЗП; б – металлическая пластина с двусторонними и односторонними заостренными зубьями;

МЗП рекомендуется изготавливать из листовой углеродистой стали марок 08кп или 10кп по ГОСТ 1050-74 (с изм.) толщиной 1,2 и 2 мм (рис. 1,9). Антикоррозионную защиту МЗП выполняют оцинковкой по ГОСТ 14623-69 или покрытиями на основе алюминия в соответствии с рекомендациями по антикоррозионной защите стальных закладных деталей и сварных соединений сборных железобетонных и бетонных конструкций [66].

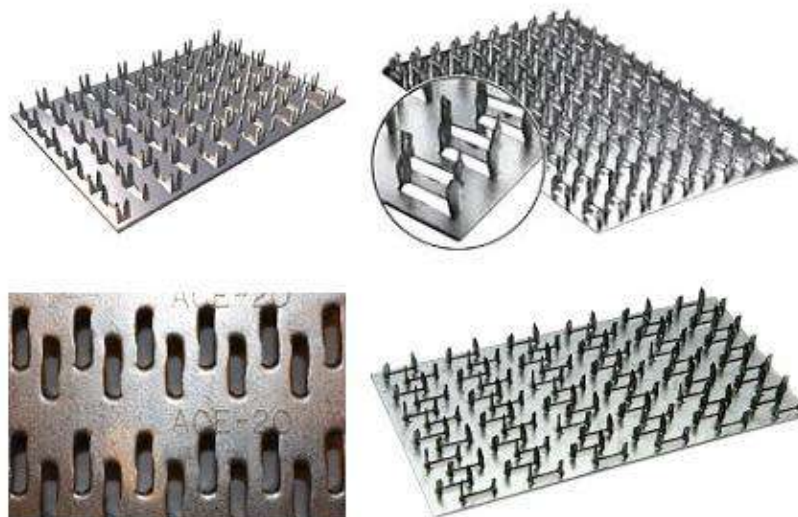


Рисунок 1.9. Внешний вид готовых к применению МЗП

Расчетная несущая способность одной пластины на сдвиг определяется по формуле $T = R_{пл} F_{расч}$, где $R_{пл}$ – расчетное сопротивление сдвигу, МПа, которое зависит от типа и материала МЗП, породы и влажности древесины, от угла β между направлением усилия и волокон для каждого из соединяемых элементов; $F_{расч}$ – расчетная площадь части МЗП, приходящейся на данный элемент за вычетом площади краевых полос по линиям примыкания шириной 10 мм [66].

Сопротивление пластины растяжению и срезу должно быть выше сопротивления сдвигу и обеспечиваться за счет правильного назначения ее толщины. Учет эксцентриситета приложения усилий к МЗП при расчете опорных узлов треугольных ферм осуществляется снижением расчетной несущей способности соединения и умножением на коэффициент η , определяемый в зависимости от уклона верхнего пояса. Кроме того, проверяют саму пластинку на растяжение и срез [17].

При проектировании конструкций на МЗП следует стремиться к унификации типоразмеров МЗП и сечений пиломатериала в одной конструкции. На обеих сторонах узлового соединения должны располагаться МЗП одного типоразмера. Площадь соединения на каждом элементе (с одной стороны плоскости соединения) должна быть для конструкций пролетом 12 м не менее 50 см², а для конструкций пролетом 18 м не менее 75 см². Минимальное расстояние от плоскости соединения элементов должно быть не менее 60 мм. МЗП следует располагать таким образом, чтобы расстояния от боковых кромок деревянных элементов до крайних зубьев были не менее 10 мм [66].

В несущих конструкциях соединение дощатых элементов на МЗП должно осуществляться парами пластин одного типоразмера и одинакового расположения с обеих сторон узлов и стыков. Стыки сжатых элементов следует осуществлять непосредственно упором с постановкой МЗП конструктивно для обеспечения монтажной жесткости. В сквозных конструкциях стыки растянутых и сжатых поясов должны располагаться

вблизи узлов, а стыки неразрезных сжато-изгибаемых поясов - в точках нулевых моментов. Расстояние крайних зубьев МЗП от кромок и обреза торцов должно быть св. 10 мм. Площади, перекрываемые пластинами на каждом из присоединяемых элементов, определяются расчетом и должны быть не менее 50 см² [14].

К настоящему времени в мире известно свыше 100 видов МЗП, используемых в узловых соединениях деревянных конструкций. Они отличаются между собой формой зубьев, формой пластины и в основном не имеют выраженных преимуществ друг перед другом. Наибольшее распространение в зарубежной практике строительства получили МЗП системы «Gang-Nail» (США) [14, 29], «TTS-100» (ФРГ), «N» и «Торех-81» (Финляндия), «MiTek» (Великобритания), «Arapad» (Венгрия), а в СССР применялись соединения на МЗП типа МЗП-1,2 и МЗП-2, которые были разработаны ЦНИИСК им. Кучеренко [67], МЗП 1,2×70 фирмы «Металлипресс»: пластины толщиной 1,0 и 1,2 мм ЗАО «Техкомплект». Это пластины с однонаправленным расположением зубьев, отличающиеся размерами, толщиной листа, сечением зубьев. Для большинства пластин соотношение основных геометрических параметров к толщине металла сохраняется практически постоянным. В Англии деревянные фермы с соединениями на пластинах системы Gang-Nail изготавливает фирма Dartington – Timberwork. Во Франции металлические зубчатые пластины применяются при изготовлении ферм системы «Hydro – Air» [68]. Производство деревянных ферм на металлических зубчатых пластинах было освоено в Швеции [7, 9].

В последнее время для узловых соединений дощатых элементов применяются металлические зубчатые пластины. В зарубежной практике строительства чаще используются МЗП системы Gang-Nail. Такие МЗП (см. рис. 1.10) представляет собой стальные пластины толщиной 1–2 мм, на одной стороне которых после выштамповки на специальных прессах получают зубья различной формы и длины. МЗП ставят попарно по обе стороны

соединяемых элементов таким образом, чтобы ряды МЗП располагались в направлении волокон присоединяемого деревянного элемента, в котором действуют наибольшие усилия. Изготовление конструкции должно производиться специализированными организациями, оснащенными оборудованием для сборки конструкций, запрессовки МЗП и контрольных испытаний конструкций. Ручная запрессовка МЗП не рекомендуется.

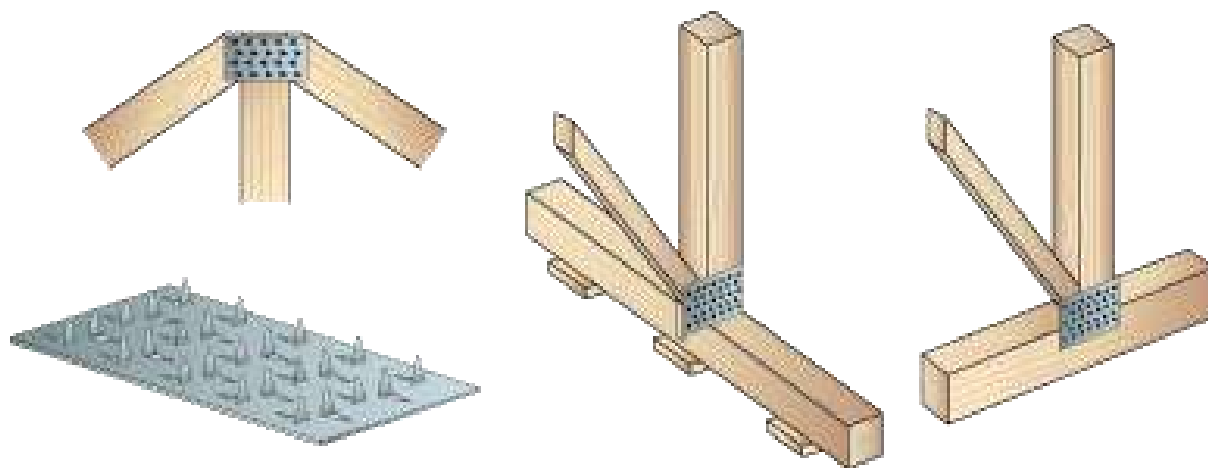


Рисунок 1.10. Примеры соединений на МЗП

Несущую способность деревянных конструкций на МЗП определяют по условиям смятия древесины в гнездах и изгиба зубьев пластин, а также по условиям прочности пластин при работе на растяжение, сжатие и срез. МЗП изготавливаются из листовой углеродистой стали толщиной 1,2 и 2 мм. Антикоррозийную защиту МЗП выполняют оцинковкой или покрытиями на основе алюминия.

Расчет и проектирование дощатых ферм и рам на металлических зубчатых пластинах производят согласно «Рекомендациям по проектированию и изготовлению конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах» (Москва: ЦНИИСК им В.А.Кучеренко, 1983) [67].

В нашей стране применяют соединения на металлических зубчатых пластинах типа МЗП-1,2 и МЗП-2 (в соответствии с толщиной применяемой стали). 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 длина 160–400 мм и ширина

80-200 мм с длиной зубьев 23,5 мм. В табл. 1.1 ниже приведены основные расчетные характеристики соединений типа МЗП-1,2 и МЗП-2.

Несущую способность соединения на металлических зубчатых пластинах N_c , кН по условиям смятия древесины и изгиба зубьев при растяжении, сдвиге и сжатии, когда элементы воспринимают усилия под углом к волокнам древесины, определяют по формуле $N_c = 2RF_p$, где R – расчетная несущая способность по табл. 1.1 [71]; F_p – расчетная площадь поверхности МЗП на стыковом элементе, определяемая за вычетом площадей участков пластины в виде полос шириной 10 мм, примыкающих к линиям сопряжения элементов и участков пластины, которые находятся за пределами зоны рационального расположения МЗП. Последняя ограничивается линиями, параллельными линии стыка, проходящими по обе стороны от нее на расстоянии половины длины стыка [72, 73].

Таблица 1.1. Расчетная несущая способность соединений на МЗП

Обозначение	Напряженное состояние соединения	Характерный угол β , α , γ , град.	Расчетная несущая способность соединений с пластинами типа	
			МЗП-1,2	МЗП-2
R , МПа, рабочей площади соединения	Смятие древесины и изгиб зубьев при углах между направлением волокон и действующим усилием β	0-15	0,8	0,8
		30	0,7	0,7
		45	0,6	0,6
		60	0,5	0,5
		75-90	0,4	0,4
R_p , кН/м, ширины рабочего сечения пластины	Растяжение пластины при величине угла между продольной осью пластин и действующим усилием α	0-15	115	35
		45-90	200	65
$R_{ср}$, кН/м, длины срезаемого сечения пластины	Срез пластины при величине угла между продольной осью пластины и направлением срезающего усилия γ	65	35	65
		45	50	95
		90	35	65

При проектировании конструкций на МЗП стремятся к унификации типоразмеров МЗП и сечений пиломатериалов в одной конструкции. Площадь соединения на каждом элементе (с одной стороны) должна быть для

конструкции пролетом до 12 м не менее 50 см², а для конструкций пролетом до 18 м – не менее 75 см². Минимальное расстояние от плоскости соединения элементов должно быть не менее 60 мм. МЗП следует располагать таким образом, чтобы расстояния от боковых кромок деревянных элементов до крайних зубьев были не менее 10 мм.

Главное отличие МЗП типа Арпад состоит в том, что оси пар шипов, выштампованные в пластине, образуют с направлением основной нагрузки определенный угол, а ряды шипов поочередно расположены под углом друг к другу (рис. 1.11) [74].

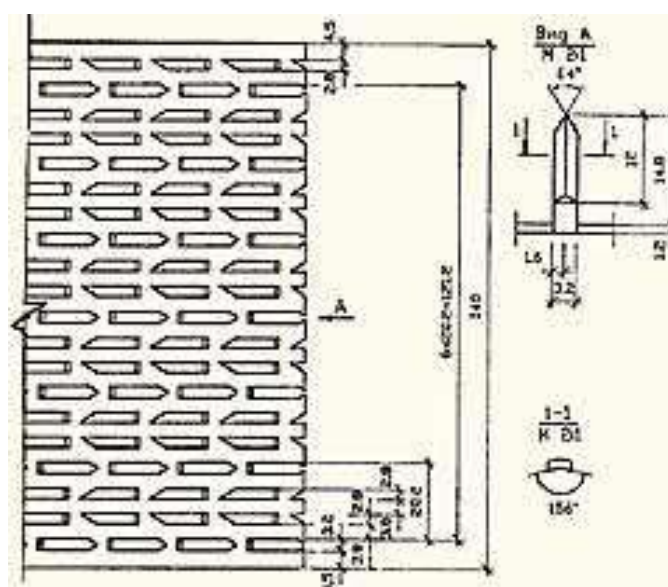


Рисунок 1.11. Конструкция МЗП типа «Арпад»

При такой геометрии зубьев при нагружении узла возникает явление заклинивания шипов в древесине, тем самым увеличивается прочность соединения.

В январе 1995 года в БелНИИС были проведены испытания деревянных безврубочных соединений на металлических зубчатых пластинах типа «Арпад» (Заключение от 9 февраля 1995 года) [74]. Фирмой «Аверс-компакт» были представлены образцы, выполненные из сосновых досок 40x150 мм: серия 1 – три образца для испытания соединения растянутых элементов вдоль волокон; серия 2 – три образца для испытания соединения растянутого элемента под углом 45° к другому элементу; серия 3 – четыре образца для

испытания соединения растянутого элемента под углом 90° к другому элементу. Результаты испытаний представленных образцов позволили установить следующие значения несущей способности металлических зубчатых пластин типа «Арпад»: для пластин толщиной 1 мм при передаче усилий вдоль волокон элемента 290 Н на одну пару зубьев (60 Н/см^2); для пластин толщиной 0,8 мм при передаче усилий под углом 45° к волокнам древесины 290 Н на одну пару зубьев (60 Н/см^2); для пластин толщиной 0,8 мм при передаче усилий под углом 90° к волокнам древесины 250 Н на одну пару зубьев (57 Н/см^2). Для сравнения: несущая способность соединения растянутых деревянных элементов на гвоздях односрезных диаметром 4,6 мм, длиной 130 мм, 160 штук (по восемьдесят с каждой стороны) в пять рядов только $33,8 \text{ Н/см}^2$ [74, 164].

1.4. Теоретические представления о напряжённо-деформированном состоянии конструктивных элементов из древесины и механика упруго-пластического разрушения нагельных соединений

Нагель по сути тонкий стержень или пластинка, которая соединяет элементы деревянных конструкций, препятствуя их взаимному сдвигу. Работа такого соединения представляет собой сложный процесс вследствие такого свойства древесины, как анизотропия, а именно ортотропия, которое представляет собой неодинаковость физико-химических свойств среды по взаимно перпендикулярным направлениям. Для древесины действительно характерно различие прочностных и упругих свойств в зависимости от направления. Например, вдоль волокон достигаются большая прочность и меньшие температурные деформации, чем поперек волокон. Поэтому конструирование соединений конструкций требует продуманного подхода. 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.

Работу нагельного соединения можно рассмотреть на примере соединения двух сдвигаемых элементов (рис. 1.12). 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 неравномерных по всей длине нагеля напряжений смятия [38].

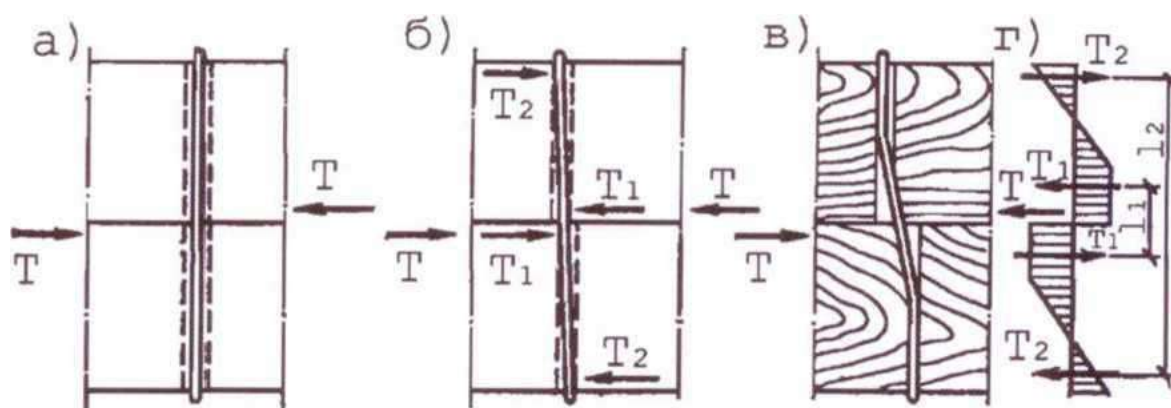


Рисунок 1.12. Схема работы нагеля: а – исходное положение; б – поворот нагеля; в – деформированный нагель; г – эпюры сминающих упругопластических напряжений древесины; T – сдвигающие усилие; T_1 и T_2 – равнодействующие сминающих напряжений древесины

Напряжения смятия древесины нагелем (рис. 1.12) имеют разные знаки, и их равнодействующие образуют две пары взаимно уравновешенных продольных сил, которые препятствуют повороту нагеля, как показано также на рис 1.13. По условию равновесия нагеля моменты этих пар равны (рис. 1.12, г) [17, 29, 75]:

$$T_1 \cdot l_1 = T_2 \cdot l_2, \quad (1.3)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{l_2}{l_1}. \quad (1.4)$$

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.

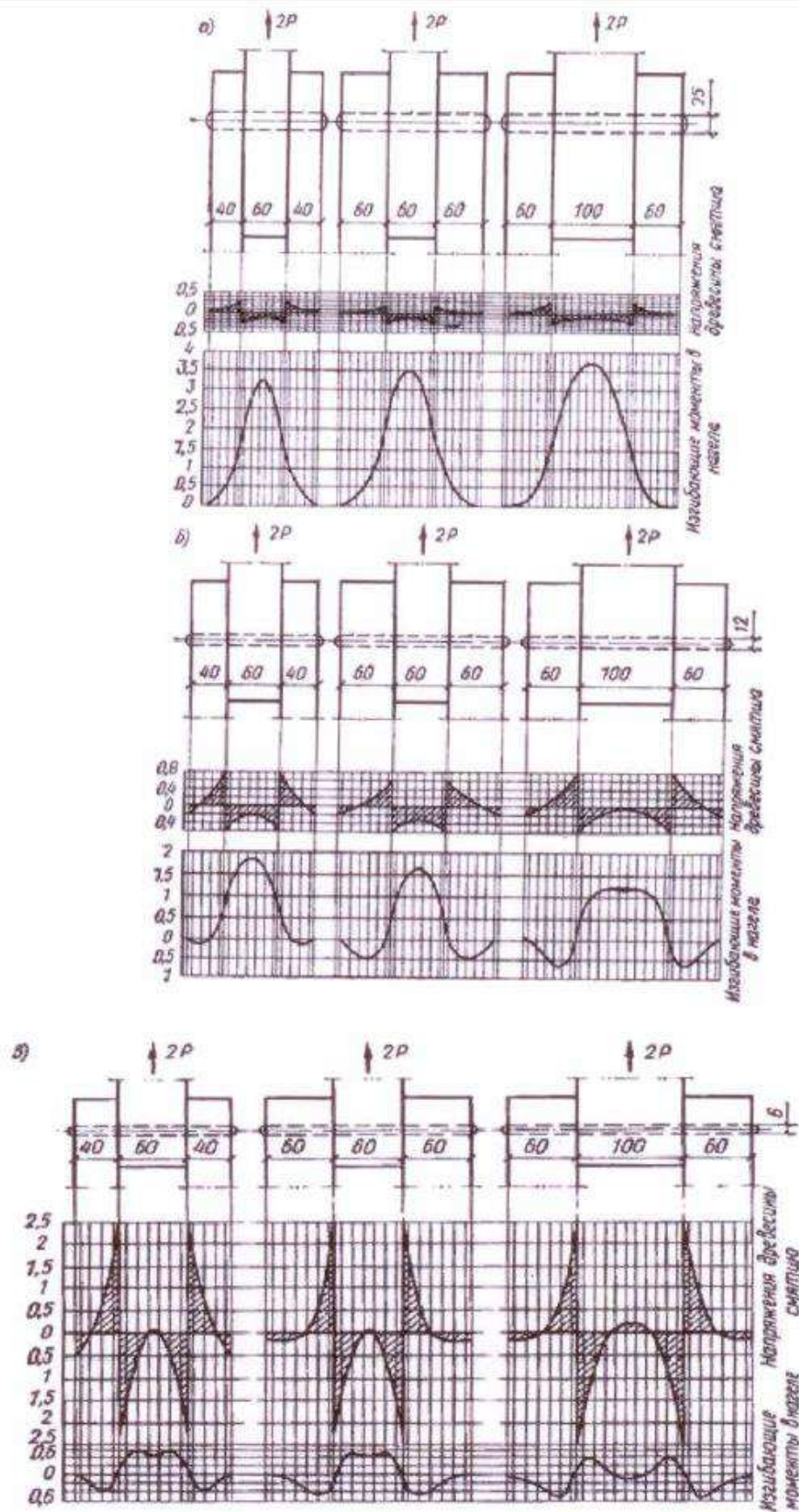


Рисунок 1.13. Эпюры напряжений древесины нагельного гнезда смятия и изгибающих моментов в нагеле: а - при диаметре нагеля 25 мм; б - при диаметре нагеля 12 мм; в - при диаметре нагеля 6 мм

Нагель можно рассмотреть как балку, лежащую на сплошном упругопластическом основании (древесине нагельного гнезда). Напряжения смятия по длине нагеля неравномерны и тем больше, чем меньше жесткость нагеля [29].

Кроме этого, наблюдается неравномерность распределения сминающих напряжений по контуру нагельного соединения, как схематично показано на рис. 1.14. 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 $a'-a'$ (рис. 1.14). 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 [75].

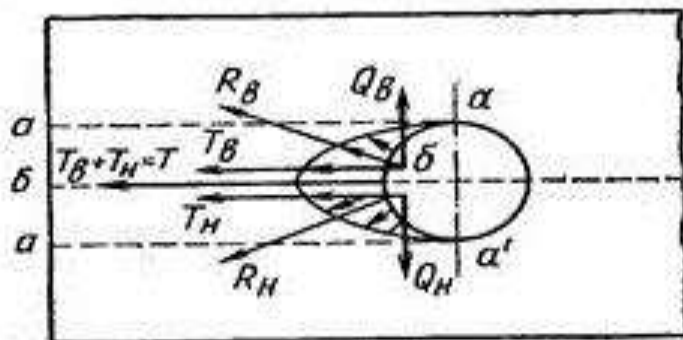


Рисунок 1.14. Эпюры радиальных напряжений смятия древесины в месте нагельного соединения

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 истощение несущей способности по смятию или изгибу нагеля [14]. Данные

расстояния определяются видом нагелей и толщиной соединяемых элементов. Расстановка нагелей в соединениях может быть прямой или в шахматном порядке, как показано на рис. 1.15.

Согласно [64], необходимо соблюдать минимальные расстояния (рис. 1.15):

- между осями цилиндрических нагелей вдоль волокон древесины S_1 (между осями стальных нагелей $S_1 = 7d$, между осями алюминиевых и стеклопластиковых нагелей $S_1 = 6d$, между осями дубовых нагелей $S_1 = 5d$, где d – диаметр цилиндрического нагеля;

- между осями цилиндрических нагелей поперек волокон S_2 (между осями стальных нагелей $S_2 = 3,5d$, между осями алюминиевых и стеклопластиковых нагелей $S_2 = 3,5d$, между осями дубовых нагелей $S_1 = 3d$);

- от кромки элемента до нагеля S_3 ($S_3 = 3d$ между осями стальных нагелей, $S_3 = 3d$ между осями алюминиевых и стеклопластиковых нагелей, $S_3 = 2,5d$ между осями дубовых нагелей).

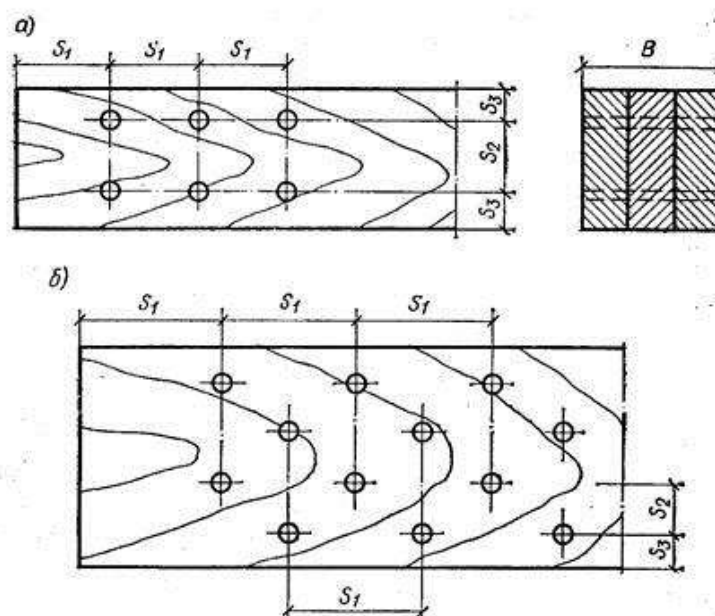


Рисунок 1.15. Расстановка нагелей: а – в прямом порядке; б – в шахматном порядке

При толщине пакета меньше $10d$ и при использовании клееных элементов с расположением нагелей перпендикулярно клеевым швам минимальные расстояния следует принимать равными:

- между осями цилиндрических нагелей вдоль волокон древесины S_1 (между осями стальных, алюминиевых и стеклопластиковых нагелей $S_1 = 6d$, между осями дубовых нагелей $S_1 = 4d$);

- между осями цилиндрических нагелей поперек волокон S_2 (между осями стальных, алюминиевых и стеклопластиковых нагелей $S_2 = 3d$, между осями дубовых нагелей $S_2 = 2,5d$);

- расстояние от кромки элемента до нагеля S_3 (между осями стальных, алюминиевых, стеклопластиковых, дубовых нагелей $S_3 = 2,5d$).

Таким образом, несущая способность нагеля на один условный шов сплачивания (условный срез) элементов определяется из условия смятия древесины и изгиба самого нагеля. Для ее обеспечения необходимо знать диаметр и материал нагеля, толщины соединяемых элементов, направления действия усилия нагеля по отношению к волокнам древесины, а также схему соединения. По последнему признаку различают симметричные (двухсрезные, многосрезные) и несимметричные (односрезные, многосрезные) нагельные соединения [64].

1.5. Воздействие среды эксплуатации на физико-механические и теплофизические характеристики нагельных соединений

Важнейшим фактором, влияющим на физико-механические свойства древесины, является содержание влаги. Рассматривать влияние влажности на физико-механические свойства древесины можно только в контексте с другими параметрами древесины: температурой, плотностью, напряженным состоянием. При высыхании свежесрубленной древесины исчезновение свободной влаги происходит сравнительно быстро – в течение одного-двух летних месяцев. Оно не связано с изменением каких-либо свойств древесины, кроме ее массы. Удаление гигроскопической влаги происходит значительно труднее. Оно требует искусственной сушки древесины и сопровождается значительным изменением ее физико-механических свойств. При этом

механические свойства древесины повышаются, одновременно происходит усушка – сокращение размеров элементов. По этой причине показатели механической прочности древесины должны приводиться к стандартной влажности по формуле [1, 3, 47, 54, 58]:

$$R_{12} = R_W [1 + \alpha(W - 12)], \quad (1.5)$$

где R_{12} – предел прочности при влажности 12 %; R_W – предел прочности при влажности в момент испытания; W – влажность в момент испытания; α – коэффициент, который отражает влияние влажности на механические свойства ($\alpha = 0,03$ – скалывание вдоль волокон, $\alpha = 0,04$ – статический изгиб, $\alpha = 0,05$ – сжатие вдоль волокон).

Обратный процесс (увлажнение до 30 %) сопровождается разбуханием древесины и понижением ее механических свойств [76]. Эффективным методом борьбы с таким недостатком древесины, как подверженность влиянию влаги является модификация древесины полимерами и химическими веществами. Модифицированная древесина обладает повышенной стойкостью к действию агрессивных сред, что объясняется замедленной диффузией агрессивных жидкостей внутрь древесины, а также повышенной химической стойкостью пропитывающих полимеров [77].

Относительная влажность воздуха влияет на значение равновесной влажности древесины. Изменение относительной влажности воздуха от 30 % до 60 % при температуре 20 °С приведет к изменению равновесной влажности древесины на 5 %. Если влажность древесины будет больше чем относительная влажность окружающей среды, то будет происходить высыхание древесины. Высокие значения относительной влажности воздуха также влияют на развитие большинства домовых грибов.

Другим важным фактором, влияющим на характеристики нагельных соединений, является температура окружающей среды с учетом ее суточных и сезонных колебаний. В разных оценкам диапазон колебания температуры может составлять от $-20 \div 25$ °С и ниже (зимой в ночные часы) до $+40 \div 50$ °С и

более (летом в жаркие солнечные дни). Очевидно, что этот фактор неизбежно оказывает влияние на процессы тепловлагодпереноса в древесине нагельного соединения.

На древесину в процессе эксплуатации также воздействует совокупность факторов внешней окружающей среды, приводящих к ее разрушению. К ним относятся климатические факторы среды эксплуатации (ультрафиолетовое излучение, относительная влажность воздуха, ветровые нагрузки, кислород воздуха) и биологические факторы среды эксплуатации (поражение насекомыми, бактериями, грибные поражения) [76].

Ультрафиолетовое излучение – это электромагнитное излучение, занимающее спектральный диапазон между видимым и рентгеновским излучениями. Естественным источником ультрафиолетового излучения является солнце. Способность древесины большинства пород флуоресцировать в ультрафиолетовом свете была замечена давно. Чаще всего облученная древесина светится фиолетовым, синим или голубым цветом. Цвет и интенсивность свечения зависят от породы и состояния древесины.

Воздействие ультрафиолетового излучения является простым и эффективным способом улучшения смачиваемости поверхности древесины [78, 79]. При определенной интенсивности ультрафиолетового излучения поверхностная свободная энергия древесины значительно возрастает, что указывает на хорошие свойства поверхности активированного материала. Ультрафиолетовое излучение оказывает вредное воздействие на некоторые микроорганизмы (бактерии и грибы) [80]. Оно обеспечивает очистку поверхности древесины, тем самым открывая поры, что приводит к изменению строения поверхности. Свойство древесины светиться при ультрафиолетовом излучении используется при разработке инструментов для обнаружения пороков древесины, контроля качества обработки. Под действием активного ультрафиолетового излучения древесина начинает высыхать и трескаться. Солнечная радиация приводит к химическому изменению целлюлозы, разрушению лигнина. Частое увлажнение

атмосферными осадками с последующим высыханием под действием солнечной радиации и контакта с воздухом приводит к размягчению волокон древесины, в результате чего происходит их отслоение и нарушение связи между волокнами [81].

Ветровые нагрузки на древесину конструкций зданий и сооружений довольно часто вызывают проблему переохладения. Продолжительное воздействие ветра может привести к выдуванию тепла из ограждающих конструкций, особенно в чердачных помещениях. В последнее время появилась тенденция к значительной повторяемости в холодный период сочетания сравнительно высокой температуры и повышенной относительной влажности воздуха (более 70 %), что приводит к оттепелям, отрицательно воздействующим на конструкции зданий [82].

Кислород воздуха является основным фактором, оказывающим влияние на биохимический процесс разрушения древесины. С другой стороны, древесина, полностью насыщенная водой или находящаяся в воде без доступа кислорода воздуха, гниению не подвергается [1].

Древесина является органическим продуктом естественного происхождения, и при определенных сочетаниях температуры и относительной влажности воздуха возможно начало биологического разрушения древесины как результат жизнедеятельности растительных организмов [83]. Развитию грибных поражений древесины способствуют теплые и влажные условия окружающей среды и отсутствие воздухообмена. При этом может произойти поражение древесины только поверхностно от действия плесени или путем проникновения в толщу древесины дереворазрушающих грибов. Споры грибов находятся повсеместно. Заражение древесины спорами может произойти в лесу, при распиловке, транспортировке, эксплуатации.

Защита от гниения имеет важнейшее значение для обеспечения долгодлительной службы деревянных конструкций. Она состоит в том, что исключается одно из условий, необходимых для жизнедеятельности грибов.

Изолировать древесину от попадания в нее спор, от окружающего воздуха и положительной температуры в большинстве случаев практически невозможно. Можно только уничтожить грибы и их споры высокой температурой, не допустить повышения влажности древесины до опасного уровня или пропитать ее ядовитыми для грибов веществами. Это и достигается путем химической защиты древесины от гниения. Химические меры защиты деревянных конструкций от действия биологических агентов производятся путем антисептирования, консервирования, нанесения лакокрасочных составов или составов комплексного действия [83].

Некоторые виды бактерий способны разрушать древесину. Однако бактерии разрушают древесину ограниченно. Они размножаются посредством деления клеток и способны разрушать полисахариды и лигнин. Воздействие бактерий ограничивается заболонной древесиной, компоненты ядровой древесины устойчивы к воздействию бактерий [84].

На металлические крепежные изделия в процессе эксплуатации оказывает большое влияние влажность древесины. Со временем она приводит к коррозии материала крепежных изделий – металла. Коррозия металлических крепежных изделий относится к атмосферной коррозии, при которой весь процесс протекает под пленкой влаги, покрывающей поверхность металла. Крепежные металлические изделия должны иметь цинковое покрытие. Их следует защищать от коррозии в соответствии с требованиями раздела 9 СП 28.13330.2017 [85].

К числу теплофизических показателей, имеющих практическое значение с точки зрения условий эксплуатации нагельных соединений (разд. 1.2), относятся такие, как тепловое изменение размеров материалов (характеризуется коэффициентом теплового расширения k_T), теплопроводность (характеризуется коэффициентом теплопроводности λ), теплоемкость (характеризуется удельной теплоемкостью c), влагопроводность (характеризуется коэффициентом влагопроводности k), термодиффузия влаги (характеризуется коэффициентом термодиффузии δ_T). При исследовании и

конструировании нагельных соединений деревянных конструкций необходимо учитывать влияние на величину различных факторов [53].

Как уже было отмечено выше (разд. 1.2), наименьшее тепловое изменение размеров древесины имеет место в направлении вдоль волокон, поперек волокон оно значительно больше (иногда в 10... 15 раз), а в тангенциальном направлении еще больше (обычно в 1,5... 1,8 раза), чем в радиальном. Коэффициент теплового расширения k_T , являющийся количественной мерой такого физического свойства и показывающий, на сколько изменяется единица длины тела при нагревании его на 1 К, для сухой древесины колеблется в пределах (2,5...5,4) – 10~6 1/К. Коэффициент линейного расширения вдоль волокон древесины составляет 1/10... 1/3 коэффициентов теплового расширения стекла, бетона и металлов. При нагревании влажной древесины одновременно происходит усушка, которая маскирует в десятки раз меньшее тепловое расширение древесины поперек волокон [3, 35].

Низкая теплопроводность древесины – это то качество, которое обеспечило ей широкое применение в строительстве. Как уже отмечалось (разд. 1.2), она зависит от плотности, влажности и направления волокон. Наименьшие значения коэффициента теплопроводности λ у сухой древесины, что объясняется пористостью ее строения: полости, межклеточные пространства заполнены воздухом, который является плохим проводником теплоты. При одинаковой плотности и влажности λ поперек волокон в 2,5÷3 раза меньше, чем вдоль волокон. Увеличение влажности древесины повышает ее теплопроводность, так как вода, вытесняющая воздух из древесины, по сравнению с воздухом является лучшим проводником теплоты. Величина λ поперек волокон при стандартной влажности 12 % более чем в 2 раза ниже, чем при влажности 30 % [86]. Численные значения коэффициента теплопроводности древесины колеблются в пределах $\lambda = 0,095...0,4$ Вт/(мК) и для расчетов выбираются по таблице Д.1 приложения Д СП 23-101-2004 [87].

Что касается теплопроводности стальных элементов нагельных соединений, то коэффициент теплопроводности такого материала для

значений температуры, соответствующей условиям эксплуатации, определяется маркой стали и колеблется в пределах $\lambda = 12 \div 90$ Вт/(мК), многократно превышая величину этого параметра для древесины. Численные значения этого показателя хорошо изучены и при известной марке стали могут быть найдены с помощью специальной и справочной литературы.

Удельная теплоемкость материала c – важнейший теплофизический показатель любого материала, определяющий характер процесса теплопередачи. Величина этого параметра у древесины зависит в основном от двух факторов: температура и влажность древесины. С увеличением температуры теплоемкость древесины возрастает. Например, при изменении температуры от 0 до 100° удельная теплоемкость абсолютно сухой древесины возрастает на 18 %. При увлажнении теплоемкость древесины увеличивается, так как удельная теплоемкость воды больше теплоемкости абсолютно сухой древесины. При положительной температуре (выше 0 °С) влияние влажности сказывается в большей мере, чем при отрицательной температуре. Например, увеличение влажности с 10 до 120 % при температуре +20 °С приводит к повышению теплоемкости на 70 %; изменение влажности в тех же пределах, но при температуре -20 °С вызывает увеличение теплоемкости [58] всего на 15%; это объясняется меньшей теплоемкостью льда. Значение удельной теплоемкости в кДж/(кгК) древесины при разной температуре и влажности можно определить по диаграмме на рис. 1.16.

Как показывают имеющиеся в настоящее время результаты исследований, удельная теплоемкость древесины не зависит от породы, так как состав древесного вещества у всех пород одинаков [3].

Поскольку содержание влаги оказывает сильное влияние на тепловые показатели древесины, представляют интерес сведения о величине коэффициента влагопроводности k . При влажности выше предела насыщения влагой клеточных стенок древесины $W_{\text{пн}}$ – градиент влажности, по данным П. С. Серговского, не определяет скорость передвижения воды. Если древесина содержит свободную воду по всему объему сортамента, в ней

возможно лишь передвижение свободной воды в виде жидкости под действием внешних сил (например, разности гидростатического или избыточного давления). В этом случае передвижение свободной воды будет определяться влагопроводностью (или капиллярной проницаемостью) древесины.

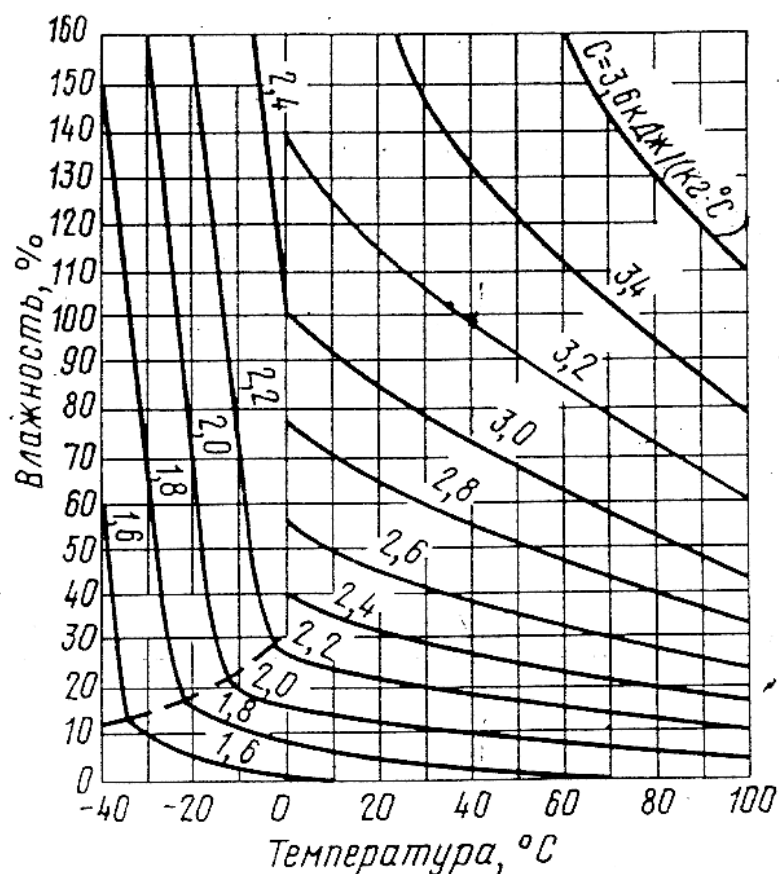


Рисунок 1.16. Определение удельной теплоемкости древесины

С уменьшением плотности древесины коэффициент влагопроводности возрастает. У сосны при температуре 20 °C коэффициент влагопроводности поперек волокон равен $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, а у лиственницы — $1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Меньшая влагопроводность ядровой (спелой) древесины по сравнению с заболонной при одинаковой плотности объясняется разной проницаемостью клеточных стенок. В радиальном направлении влагопроводность несколько больше, чем в тангенциальном. У пород с широкими лучами (бук, дуб) отношение коэффициентов влагопроводности в указанных направлениях составляет соответственно 1,7 и 1,5, а у сосны с очень узкими лучами — только 1,15.

Коэффициент влагопроводности древесины вдоль волокон в 15...20 раз больше, чем в тангенциальном направлении поперек волокон [88]. Влагопроводность значительно увеличивается при повышении температуры вследствие возрастания коэффициента диффузии пара и снижения вязкости воды [3].

На процесс влагопереноса в древесине оказывает влияние и величина коэффициента термодиффузии δ_T . Термодиффузия (термовлагопроводность), которая представляет собой перенос влаги под действием градиента температуры, возникает при неизотермических условиях в древесине (присутствует градиент температуры), когда имеет место перенос влаги из мест с большей температурой в места с меньшей. На участках с меньшей температурой влажность увеличится, а с большей – уменьшится. При этом в образце возникает градиент влажности, под действием которого влага будет стремиться к перемещению в обратном направлении. При определенном соотношении между влажностным и температурным градиентами эффект влагопроводности полностью компенсирует эффект термовлагопроводности и в материале устанавливается стационарное поле температуры и влажности. Отношение градиента влажности к градиенту температуры при таком стационарном состоянии $\delta = \Delta W / \Delta t$ носит название термоградиентного коэффициента. Он показывает, какому перепаду влажности эквивалентно изменение температуры на 1 К. На термоградиентный коэффициент влажной древесины влияет, кроме того, и абсолютное значение температуры. Характер этого влияния, экспериментально установленный Г.С. Шубиным [23], иллюстрируется кривыми, представленными на рис. 1.17.

Неизотермические условия (градиенты температуры) возникают в древесине в процессе нагревания или охлаждения, но на непродолжительное время и поэтому существенного переноса влаги не происходит. Длительное время перепад температур по сечению древесины имеет место в ограждающих конструкциях зданий. Особенно большие градиенты температуры по толщине стены возникают в зимнее время. Это приводит к перераспределению влаги по

толщине стены.

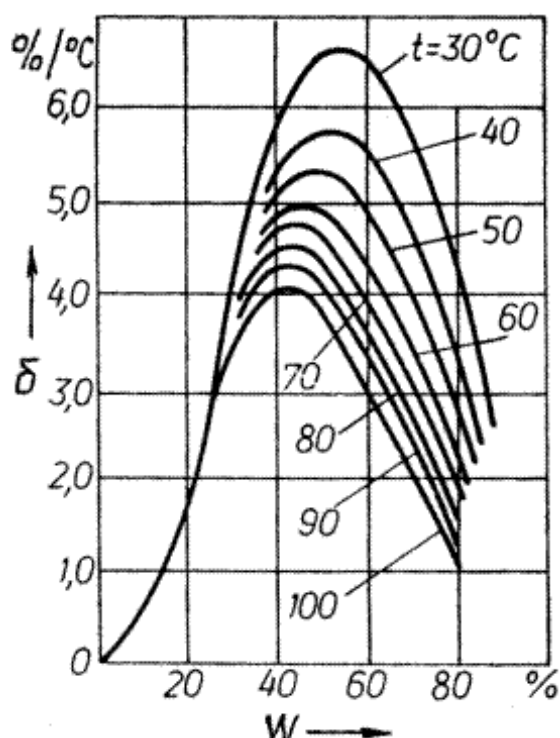


Рисунок 1.17. Диаграмма термоградиентного коэффициента древесины поперек волокон

Анализ условий, при которых эксплуатируются нагельные соединения, позволяет сделать вывод о том, что на практике наблюдается совместное действие нескольких факторов среды эксплуатации на физико-механические и теплофизические свойства материалов нагельного соединения, которые действуют одновременно или в определенных сочетаниях.

1.6. Методы защиты древесины и металла нагельного соединения в процессе совместной работы

Как показано в разд. 1.5, в процессе эксплуатации на материалы нагельного соединения элементов деревянных конструкций воздействуют суровые условия окружающей среды, характер которых определяют климатические и биологические факторы. Вследствие их воздействия происходят сначала поверхностные изменения в структуре материалов, затем – разрушение структуры вглубь и, в конечном счете, их полное разрушение. При этом наблюдается эффект совместного разрушающего действия

нескольких факторов одновременно или в парных сочетаниях.

Основными климатическими факторами, способствующими разрушению древесины, являются ультрафиолетовое излучение, относительная влажность воздуха, ветровые нагрузки, кислород воздуха, колебания влажности и температуры воздуха, атмосферные осадки. При этом большое значение имеют суточные, сезонные и годовые изменения данных показателей [83]. В процессе эксплуатации под действием ультрафиолетового излучения и повышенных температур происходит старение древесных материалов, приводящее к изменению структуры материала, которое можно выявить с помощью дилатометрических кривых [77, 89]. Существенная деструкция древесины происходит в результате циклического изменения температуры и относительной влажности воздуха.

Старение по-разному сказывается на прочности и долговечности древесных материалов. При тепловом старении прочность древесины цельного и клееного сечения снижается незначительно, а прочность древесностружечных и древесноволокнистых материалов существенно падает. При ультрафиолетовом излучении прочность натуральной древесины увеличивается на 30 % [77]. На модифицированную парафином древесину ультрафиолетовое излучение действует положительно, а на модифицированную полимерами древесину – отрицательно. Наилучшей защиты древесины от ультрафиолетового излучения позволяют добиться пигментированные краски, так как пигменты обеспечивают максимально возможное отражение ультрафиолетового излучения. Они обеспечивают защиту древесины на срок 5 лет и требуют повторного нанесения через небольшие промежутки времени. На древесину с низкой сопротивляемостью перед нанесением основного покрытия следует нанести биоцидную пропитку от синевы и гнили [83].

Для защиты древесины клееных конструкций от расслоения и растрескивания необходимо на боковые поверхности наносить лакокрасочные покрытия, которые позволяют предотвратить быстрые и резкие изменения

влажности древесины в периферийной зоне. Длительными наблюдениями за изменениями влажности клееных элементов на открытом воздухе установлено, что сезонные колебания влажности древесины в наружных слоях элементов с лакокрасочными покрытиями, обладающих низкими значениями паропроницаемости и водопроницаемости, примерно в два раза ниже, чем в элементах без покрытия [90, 91].

Среди биологических факторов основная разрушающая роль принадлежит дереворазрушающим грибам и насекомым (жукам и термитам). Дереворазрушающие грибы в зависимости от характера процесса разложения подразделяются на две основные группы: грибы, разрушающие целлюлозу, и грибы, разрушающие лигнин [92]. Целлюлозоразрушающие грибы подвергают своему воздействию всю древесную массу, не оставляя неразрушенных частей древесины. Они разлагают целлюлозу, которая определяет все физические свойства древесины. Лигнинразрушающие грибы, кроме целлюлозной части древесины, разрушают и лигнин. Во всех случаях древесина становится мягкой и волокнистой.

Одним из основных факторов набухания и снижения механических характеристик древесины и коррозии металла является наличие влаги, которая может появиться вследствие конденсационных процессов. Защита от гниения имеет важнейшее значение для обеспечения долговечной службы деревянных конструкций. Она состоит в том, что исключается одно из условий, необходимых для жизнедеятельности грибов. Изолировать древесину от попадания в нее спор, от окружающего воздуха и положительной температуры в большинстве случаев практически невозможно. Можно только уничтожить грибы и их споры высокой температурой, не допустить повышения ее влажности до опасного уровня или пропитать ее ядовитыми для грибов веществами. Это и достигается путем стерилизации, конструктивной и химической защиты древесины от гниения [92].

Стерилизация древесины происходит естественно в процессе искусственной, особенно высокотемпературной, сушки [30]. Прогрев

древесины при температуре свыше 80 °С приводит к гибели всех присутствующих в ней спор домовых грибов. Такая древесина гораздо дольше сопротивляется загниванию и должна в первую очередь применяться в конструкциях.

Конструктивная защита древесины от гниения обеспечивает такой режим эксплуатации конструкций, при котором ее влажность не превышает благоприятного для загнивания уровня [93]. Защита древесины закрытых помещений от увлажнения атмосферными осадками достигается полной водонепроницаемостью кровли, выполненной из высококачественных материалов. Кровля должна иметь необходимые уклоны, и в ней не должно быть внутренних водостоков и ендов. Защита древесины от увлажнения капиллярной влагой осуществляется отделением ее от бетонных, каменных или металлических конструкций слоями гидроизоляции. Деревянные конструкции должны опираться на фундаменты выше уровней пола на 15 см и грунта на 50 см. Защита древесины от увлажнения парами воздуха достигается тем, что в помещениях с влажностью более 60 % поверхность ее изолируется водостойкими лакокрасочными материалами. Защита древесины от конденсационной влаги также важна. Эта влага возникает в холодное время года в толще теплоизоляционного слоя ограждающих конструкций отапливаемых помещений в результате конденсации водяных паров. Такое увлажнение происходит длительное время и не всегда может быть обнаружено. Для защиты от проникновения в конструкцию водяных паров со стороны помещения укладывается слой пароизоляции. Основные несущие конструкции помещаются вне зоны перепада температур либо полностью внутри помещения ниже слоя теплоизоляции или вне его, например, в холодном помещении чердака выше утепленного чердачного перекрытия. Хорошее проветривание древесины благоприятно для ее естественного высыхания в процессе эксплуатации. Для этого делают осушающие продухи в толще конструкций, сообщающиеся с наружным воздухом. Естественные продухи образуются между листами асбестоцементной кровли. Элементы

основных конструкций следует проектировать без зазоров и щелей, где может застаиваться влажный воздух. Защиту участков боковых поверхностей элементов несущих клееных деревянных конструкций, находящихся в толще наружных стен отапливаемых зданий, осуществляют путем нанесения органического антисептика на обрабатываемую поверхность кистью в несколько слоев, а затем влагоизолируют путем устройства бандажа с помощью наплавленного гидроизоляционного материала на основе битумно-полимерного вяжущего [91].

Химическая защита древесины необходима в тех случаях, когда ее увлажнение в процессе эксплуатации неизбежно [86]. Конструкции, эксплуатируемые на открытом воздухе, в земле, в толще ограждающих конструкций зданий и в других случаях, например, конструкции мостов, мачт, свай, неизбежно увлажняются атмосферной, грунтовой или конденсационной влагой. Химическая защита таких конструкций от загнивания заключается в покрытии или пропитке их ядовитыми для грибов веществами, т.е. путем процесса антисептирования или консервирования древесины.

Антисептирование – это химическая защита древесины путем нанесения защитного средства на поверхность, не рассчитанная на его проникновение вглубь [93]. Антисептиками называют химические вещества и составы, применяемые для предохранения древесины от гниения и повреждения дереворазрушающими насекомыми. Их разделяют на две группы: фунгициды – вещества, токсичные для дереворазрушающих грибов; инсектициды – вещества, токсичные для насекомых. Некоторые препараты, применяемые для защиты древесины в конструкциях, обладают одновременно фунгицидными и инсектицидными свойствами. Используемые в строительстве антисептики должны обладать высокой токсичностью по отношению к грибам и насекомым, сохранять токсичность в течение длительного времени после внедрения их в древесину, не оказывать вредного влияния на здоровье людей, соприкасающихся с обработанной древесиной, не ухудшать физико-механические свойства древесины. Все антисептики делятся на три большие

группы: неорганические (водорастворимые), органические, комбинированные. При этом органические антисептики можно подразделить на две подгруппы. К первой подгруппе относятся жидкости, имеющие маслянистую консистенцию (маслянистые антисептики). Это, например, каменноугольное креозотовое масло, антраценовое масло, сланцевое масло. Ко второй подгруппе относятся кристаллические и порошкообразные ядовитые вещества, получаемые из продуктов органического происхождения. Примером кристаллических органических антисептиков может служить оксидифенолят натрия. Комбинированные антисептики – это препараты, состоящие из двух или нескольких веществ, токсичность которых в смеси оказывается выше суммарной токсичности входящих в нее компонентов [90].

Консервирование – это химическая защита древесины путем обработки защитным составом, рассчитанная на проникновение в глубь материала. Консервирование древесины осуществляется в основном диффузионным методом. Успех действия этого способа основан на способности водорастворимых антисептиков постепенно проникать в глубину древесины по законам диффузии, растворяясь в содержащейся в древесине влаге, а также при последующих увлажнениях ее в условиях эксплуатации.

Соотношение капиллярного и диффузионного проникновений защитных средств является важным показателем для выбора варианта пропитки некондиционированной древесины [94]. Оно зависит от плотности и влажности материала, растворимости защитного средства, величины и времени действия давления, температуры среды и длительности послепропиточной выдержки. К диффузионным способам относятся обработка пастами и сухими защитными средствами элементов. Пасты на поверхность древесины наносятся в виде пленки толщиной 1-2 мм и защищают от испарения. Скорость пропитки древесины, обработанной пастами, идет тем быстрее, чем выше ее влажность, и в среднем составляет 1 мм в сутки [86].

Особенностью жизнедеятельности жуков является их заселение на

загнившей древесине, т.е. они являются вторичными биоразрушителями [94]. При этом наибольший вред оказывают личинки жуков, поскольку в течение последующего жизненного цикла до превращения в куколку они питаются древесиной. В отличие от грибков, разрушающих компоненты клеточной стенки древесины (целлюлозу и лигнин), личинки жуков проделывают в толще древесины ходы и заполняют их продуктами своей жизнедеятельности. Для уничтожения древоточцев можно применить тепловой нагрев с помощью волн СВЧ [95]. Этот метод борьбы основан на том, что содержащийся в клетках живых организмов протеин коагулирует в СВЧ-поле, а так как распространение личинок происходит относительно медленно, можно последовательно ликвидировать всех вредителей. Микроволны подходят для локальной обработки элементов зданий. Они обеспечивают эффективный нагрев по всей глубине [95].

Повреждения деревянных конструкций от воздействия агрессивных сред выражаются как в деструктивном разрушении самой древесины, так и выходом из строя стальных крепежных изделий. При этом скорость деструктивных процессов составляет до 2 мм в год, а общее снижение прочности – до 20 % [96].

Металлические крепежные изделия, применяемые для соединения элементов деревянных конструкций, должны быть защищены от коррозии в соответствии с требованиями СП 28.13330.2017 «СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии» [85]. Крепежные металлические изделия должны иметь цинковое покрытие, поскольку цинк имеет более отрицательный потенциал и корродирует медленнее, чем сталь. Обычно плотность цинкового покрытия составляет 275 г/м², а толщина цинкового покрытия составляет 14-17 мкм. Покрытие наносится методом горячего цинкования [85].

Таким образом, для эффективной защиты материалов нагельного соединения элементов деревянных конструкций от воздействия климатических и биологических факторов должны применяться следующие

меры: учет условий эксплуатации на стадии проектирования, применение практических защитных мероприятий при изготовлении конструкций (стерилизация, конструктивные и химические меры защиты), постоянный мониторинг частей здания для определения очагов заражения и своевременного их устранения. Для обнаружения жуков-точильщиков можно применять акустические детекторы (например, акустический детектор канадского производства AED-2000) [95]. Присутствие вредителя при этом определяется по звуку, напоминающему тихое тиканье часов, который издают личинки жуков в ночное время.

1.7. Физико-теоретические методы изучения процессов переноса теплоты и влаги в древесине строительных конструкций

Анализ сведений, приведенных выше, позволяет сделать заключение, что в процессе эксплуатации в нагельных соединениях происходят сложные процессы тепловлагопереноса. Закономерности этих процессов и их влияние эксплуатационные показатели таких узлов остаются до сих пор малоизученными. Вполне очевидно, что теплоперенос в элементах нагельного соединения обусловлен явлением 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 [53, 60, 97].

Основной задачей исследования 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 [53, 98, 99, 100].

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

$$t = f(x, y, z). \quad (1.6)$$

Данное выражение описывает трехмерное стационарное температурное поле. Если оно будет зависеть еще и от времени, то будет называться уже нестационарным и приобретет следующий вид [53]:

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1.7)$$

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 [53]

$$\text{grad } t = \frac{dt}{dl} \cdot \vec{n}, \quad (1.8)$$

где \vec{n} – единичный вектор, направленный по касательной к кривой изменения температуры и в сторону ее возрастания; l – обобщенная координата.

Перенос теплоты посредством теплопроводности 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 температуры, а количество переносимой теплоты пропорционально этому градиенту. Поэтому плотность потока теплоты (или удельного теплового потока) q , переносимой посредством теплопроводности, пропорциональна градиенту температур [53]:

$$q = -\lambda \text{ grad } t, \quad (1.9)$$

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

Выражение (1.9) является основой для вывода дифференциального уравнения температурного поля – закона теплопроводности Фурье, знак

«минус» в котором показывает, что направление теплового потока противоположно направлению градиента температуры [53].

Вывод дифференциального уравнения теплопроводности осуществляется из баланса тепла для единицы объема тела с учетом всех его составляющих и градиентного закона переноса тепла Фурье [53,99,101-104]. В окончательном виде дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности действующим источником теплоты выглядит так:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (c_p t \rho) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_{VT}, \quad (1.10)$$

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

В уравнении (1.10) величины $c_p, \lambda, \rho, q_{VT}$ 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 [21, 53, 99]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_{VT}}{c_p \rho}, \quad (1.11)$$

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

Если источников или стоков тепла в среде нет, то мощность внутренних объемных источников $q_{VT} = 0$. Тогда уравнение (1.11) примет вид [53]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (1.12)$$

Выражение (1.12) называется дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье, представленным в частных производных второго порядка параболического типа. Оно устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке неподвижной среды [53].

Другим физическим явлением, обеспечивающим протекание процессов тепло-массопереноса в нагельных соединениях, является массо(влаги)проводность древесины. Массопроводность – процесс переноса массы вещества, например влаги, от тел с большим массосодержанием к телам с меньшим содержанием переносимого вещества [97, 105].

Поле массосодержаний – это совокупность значений влагосодержаний для всех точек пространства в данный момент времени. Если эта совокупность 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 [105]:

$$u = \varphi(x, y, z). \quad (1.13)$$

Плотность потока массы переносимого компонента определяется уравнением Фика [105]:

$$i = -D \operatorname{grad} u, \quad (1.14)$$

где i – плотность потока массы вещества, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; D – коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; u – концентрация диффундирующего вещества в теле, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Формула (1.14) нередко представляется в общем виде, описывающем плотность потока вещества в твердом теле посредством массопроводности [105]:

$$i = -k \operatorname{grad} u, \quad (1.15)$$

где k – коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; u – массосодержание, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Нетрудно заметить, что градиентные уравнения Фика (1.14), (1.15) и уравнение Фурье (1.12) аналогичны по форме, поэтому дифференциальное уравнение диффузии выводится аналогично дифференциальному уравнению теплопроводности. Соответственно, дифференциальное уравнение диффузии в частных производных имеет вид.

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\operatorname{div} i + q_{VM}, \quad (1.16)$$

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

Используя закон Фика (1.14), получают дифференциальное уравнение молекулярной диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} c) + q_{VM}. \quad (1.17)$$

В уравнении (1.17) величины D, c, q_{VM} в общем случае являются функциями координат x, y, z , температуры t и времени τ , т.е. данное уравнение нелинейно. Если же считать свойства среды практически неизменяемыми, то уравнение упроститься и примет следующий вид [53]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \nabla^2 c + q_{VM}. \quad (1.18)$$

Если допустить отсутствие источника массы, то получим классическую запись дифференциального уравнения молекулярной диффузии (второй закон Фика) [53]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \nabla^2 c. \quad (1.19)$$

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 [38].

Начальные условия характеризуют значения полей температур или концентраций в момент времени, принимаемый за начало отсчета. Для

нестационарного температурного поля начальные условия имеют следующий вид [53, 105]:

$$t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x, y, z), \quad (1.20)$$

Начальные условия для нестационарного поля влагосодержаний описываются следующим соотношением [102]:

$$u(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x, y, z), \quad (1.21)$$

Граничные условия характеризуют значения температуры и 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 родов [103].

Граничное условие первого рода (условие Дирихле) [103] является заданием потенциала переноса (температуры, влагосодержания) на границе рассматриваемой области в любой момент времени:

$$t(x, y, z, \tau)|_S = t_0(x, y, z, \tau), \quad (1.22)$$

$$u(x, y, z, \tau)|_S = u_0(x, y, z, \tau), \quad (1.23)$$

где S – поверхность, ограничивающая рассматриваемую область V , на которой задано соответственно поле температур в уравнении (1.22) и поле массосодержаний в уравнении (1.23).

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

$$q_{нов} = f(x, y, z, \tau)|_S. \quad (1.24)$$

Если на границе рассматриваемой среды и окружающей происходит конвективный перенос теплоты или массы вещества, то это характерно для граничных условий третьего рода (условия Ньютона) [104]:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_S = \alpha(t_S - t_{cp}), \quad (1.25)$$

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, так как ими можно имитировать и другие граничные условия.

Для диффузии на поверхности тела задают аналогичные условия массоотдачи [21]:

$$-D\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_S = \beta(u_s - u_{cp}), \quad (1.26)$$

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:

$$t_1(x, y, z, \tau)|_{x, y, z=S_1} = t_2(x, y, z, \tau)|_{x, y, z=S_2}, \quad (1.27)$$

$$u_1(x, y, z, \tau)|_{x, y, z=S_1} = u_2(x, y, z, \tau)|_{x, y, z=S_2}. \quad (1.28)$$

Дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса совместно с начальными и граничными условиями дают полную математическую формулировку соответствующих краевых задач, решение которой может быть выполнено аналитическим, численным или экспериментальным методом [53].

В соответствии с теорией тепломассопереноса может быть записана следующая система дифференциальных уравнений нестационарного взаимосвязанного тепломассо(влаги)баропереноса [53, 106, 101-104]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) + \varepsilon \cdot \frac{r^*}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) + \operatorname{div}(k \delta_T \operatorname{grad}(t)) + \operatorname{div}(k \delta_p \operatorname{grad}(p)) \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= \operatorname{div}\left(\frac{\rho_0}{c^*} k \delta_p \operatorname{grad}(p) - \frac{\varepsilon \rho_0}{c^*} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (1.29)$$

где a, k – коэффициенты температуро- и влагопроводности материала (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 [12].

Решение системы дифференциальных уравнений (1.29) с учетом краевых условий и при известных значениях входящих в них констант позволяет решать задачи по определению изменения температуры, массосодержания и давления в пространстве и во времени. Другими словами, система уравнений (1.29) и ее решение являются универсальным инструментом, который можно использовать практически в любой отрасли науки и техники.

1.8. Основные методы решения краевых задач тепломассопереноса

Существуют различные методы решения задач тепломассопереноса, 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 последующий реализации в инженерных расчетах.

Все способы решений можно разделить на аналитические и численные [107-109] 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 используются ручной счет, расчеты на калькуляторах, а чаще всего компьютерные расчеты. Использование ЭВМ позволяет свести нелинейную задачу к линейной.

Для решения нелинейных краевых задач тепломассопереноса можно использовать метод «микропроцессов» [105, 109, 110], 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 конечное 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 просчитывается на ЭВМ [107, 109]. 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 разложения. 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 $Fo \ll 0,1$ [108]. 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.

1.9. Выводы по главе 1

Постановка цели и задач диссертационного исследования

Выполненный анализ научно-технической и патентной литературы показал следующее.

1. Нагельные соединения, как болтовые, так и с применением МЗП, получили к настоящему времени широкое применение при возведении деревянных строительных конструкций благодаря своей технологичности, простоте, прочности, надежности и долговечности. Отрицательной стороной нагельных соединений является то, что с течением времени происходит старение этих узлов. Это является следствием коррозии металлических элементов и разрушения древесины в силу широкого круга причин, в основе которых лежат сложные процессы тепломассо(влаго)переноса, протекающих под действием эксплуатационных факторов, при наличии постоянного напряженно-деформированного состояния материалов такого соединения.

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

3. Исследователями установлено, что механическая прочность и эксплуатационные характеристики нагельных соединений во многом определяются физико-механическими и теплофизическими свойствами древесины, которые в свою очередь [3, 6, 54, 57, 76, 111, 112] однозначно характеризуются двумя важнейшими факторами: температурой и влажностью как самого материала, так и среды эксплуатации. Следует отметить, что нагельные соединения нередко работают в наиболее суровых условиях по сравнению с другими элементами строительных конструкций. Это является причиной ускоренного старения этих узлов, завершающегося разрушением и заменой всей деревянной конструкции. Ярким примером этого является тот факт, что в течение всего срока эксплуатации каменных зданий со скатными крышами производится неоднократная замена деревянных элементов кровельной системы полностью или частично.

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

модели процессов тепловлагодпереноса в нагельных соединениях. Поэтому актуальной задачей в настоящее время является создание таких теоретических инструментов, что позволило бы квалифицированно решать вопросы изготовления и обеспечения в эксплуатации прочных, надежных и долговечных нагельных соединений.

5. В настоящее время существуют благоприятные предпосылки к созданию упомянутых выше математических моделей благодаря существованию теории взаимосвязанного тепломассобаропереноса, которая описывается системой из трех дифференциальных уравнений и которую можно взять в качестве основы теоретических разработок. Решение такой задачи может быть заметно упрощено вследствие ряда обстоятельств и допущений, в результате чего изучение процессов тепло-массо(лаго)переноса сводится к решению уже только двух дифференциальных уравнений, описывающие процессы тепло и влагопереноса в древесине нагельных соединений. Краевые условия решения этих уравнений определяются параметрами окружающей среды и характеристиками металлических нагельных соединений.

6. Наличие математической модели, указанной в предыдущем пункте, позволит выявить закономерности процессов тепловлагодпереноса в нагельных соединениях. Это позволит затем посредством теоретических и экспериментальных исследований установить влияние этих процессов на эксплуатационные показатели и характеристики нагельных соединений, что позволит разработать меры и рекомендации по обеспечению прочных, надежных и долговечных нагельных соединений в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

Представленные выводы позволили сформулировать цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Цель работы: создание и обеспечение в процессе эксплуатации прочных, надежных и долговечных нагельных соединений строительных деревянных конструкций на основе разработки и применения математических

моделей процессов тепловлагодпереноса в древесине таких соединений при различных эксплуатационных условиях.

Задачи диссертационной работы:

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

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

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

4. Разработка двухмерной математической модели взаимосвязанного тепловлагодпереноса в древесине нагельного соединений с МЗП.

5. Формирование инженерной методики расчета ресурса и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения для определения его эксплуатационных показателей.

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

7. Разработка и изготовление лабораторной экспериментальной установки для комплексного исследования циклических процессов тепломассопереноса в древесине нагельных соединений при их нарыженно-

деформированном состоянии и автоматизированной системы мониторинга климатических, температурно-влажностных и механических показателей эксплуатации нагельных соединений строительных конструкций из древесины.

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

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ НАДЕЖНЫХ И ДОЛГОВЕЧНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ДРЕВЕСИНЕ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Наличие общей методологии получения и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных деревянных строительных конструкций на основе изучения процессов тепломассопереноса в древесине нагельных соединений позволит квалифицированно, с использованием возможностей компьютерного моделирования, в короткие сроки разрабатывать деревянные строительные конструкции, удовлетворяющие заданным требованиям. Кроме этого, такая методология станет весьма эффективным инструментом поддержания в нормативном состоянии и продления ресурса как новых, так и уже существующих строительных конструкций из древесины.

2.1. Разработка и обоснование методологии создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных нагельных соединений

Как показано в разд. 1.9, важнейшей задачей настоящей работы является разработка общей методологии создания (изготовления) и обеспечения в процессе эксплуатации прочных, надежных и долговечных нагельных соединений строительных деревянных конструкций на основе математического моделирования процессов тепловлагодпереноса в древесине таких соединений. Причиной постановки такой задачи является тот факт, что, как показано в гл. 1, эксплуатационные показатели строительных конструкций из древесины определяются в основном прочностью, надежностью и ресурсом узловых соединительных конструкций, в качестве которых в настоящее время основное применение получили нагельные соединения различных типов. В гл. 1 также показано, что эксплуатация нагельных соединений сопровождается сложными процессами тепловлагодпереноса в древесине, которые сопровождаются

фазовыми переходами «лед-вода-пар» и протекают в суровых условиях эксплуатации, порой под воздействием циклических колебаний температурно-влажностных показателей окружающей среды в зависимости от времени суток и сезона. Огромный опыт эксплуатации деревянных строительных конструкций убедительно доказывает, что эти процессы неизбежно отрицательным образом сказываются на эксплуатационной надежности как нагельных соединений, так и всей конструкции в целом. Это означает, что процесс создания и эксплуатации должен сопровождаться внимательным изучением таких процессов и учетом их последствий. Исходя из изложенного, учитывая известные сведения по проектированию и расчету деревянных строительных конструкций, процедуру (процесс) возведения и эксплуатации таких сооружений можно представить с помощью блок-схемы, приведенной на рис. 2.1.

Как следует из рис. 2.1, первым этапом создания новой строительной конструкции из древесины является решение таких вопросов, как выбор архитектурных, планировочных, конструкторских и инженерных решений под новый или реконструируемый объект, с проведением необходимых обследований и изысканий [4, 5, 14, 31, 32, 112, 113]. Основой для решения этих вопросов является техническое задание на проектирование и другие исходные сведения. Причем на этом этапе возможно появление как одного конструктивного решения деревянной строительной конструкции, так и нескольких вариантов таких решений.

На следующем этапе выполняются расчет нагрузок и прочности конструкции, выбор строительных материалов и комплектующих в зависимости от класса условий эксплуатации и назначения объекта. Решение этих задач производится с помощью современных методов расчета нагрузок и прочности деревянных строительных конструкций, с использованием сведений о характеристиках и показателях строительных материалов [4, 5, 114], а также существующих каталогов комплектующих или еще какой-либо необходимой информации (см. рис. 2.1).

Результаты, полученные на предыдущих этапах, являются основой для выполнения следующего шага – выбора типа нагельных соединений деревянной строительной конструкции и других вариантов усиления деревянной конструкции металлическими изделиями [114, 115, 116]. Этот этап не менее важен, чем два предшествующих, т.к. именно здесь решается вопрос о получении надежных узловых элементов конструкции, определяющих ее прочность и долговечность. Естественно, и на этом этапе необходимы знание современных методов расчета нагрузок и прочности деревянных конструкций, а также информация о характеристиках строительных материалов (см. рис. 2.1).

Такие знания требуются также для решения задач следующего, четвертого, этапа (см. рис. 2.1): расчет характеристик напряженно-деформированного состояния элементов нагельного соединения для различных вариантов конструктивного выполнения строительной деревянной конструкции и условий ее эксплуатации в целях выявления характерных условий работы материалов этих соединений и продолжительности во времени при различной степени тяжести этих условий [111, 114-120].

Следующий, пятый по счету, этап не всегда присутствует в процессе создания новой (или эксплуатации существующей) строительной конструкции из древесины. Он предполагает определение характеристик циклически изменяющихся температурно-влажностных условий эксплуатации нагельных соединений в зависимости от времени суток и сезона (см. рис. 2.1). Предложение об обязательном наличии такого этапа является одной из особенностей настоящей работы. Причем для решения задач этого этапа необходима информация о результатах многолетних наблюдений усредненных и экстремальных температурно-влажностных показателей окружающей среды, в которой эксплуатируется строительная деревянная конструкция. Получить ее можно из архивных сведений государственных служб метеонаблюдения.

На шестом этапе решаются вопросы по выбору средств и мер защиты материалов нагельного соединения от коррозии металла и разрушения древесины в процессе эксплуатации. Вполне очевидно, что такие действия

являются традиционным и обязательным шагом на пути создания и обеспечения надежной строительной деревянной конструкции.

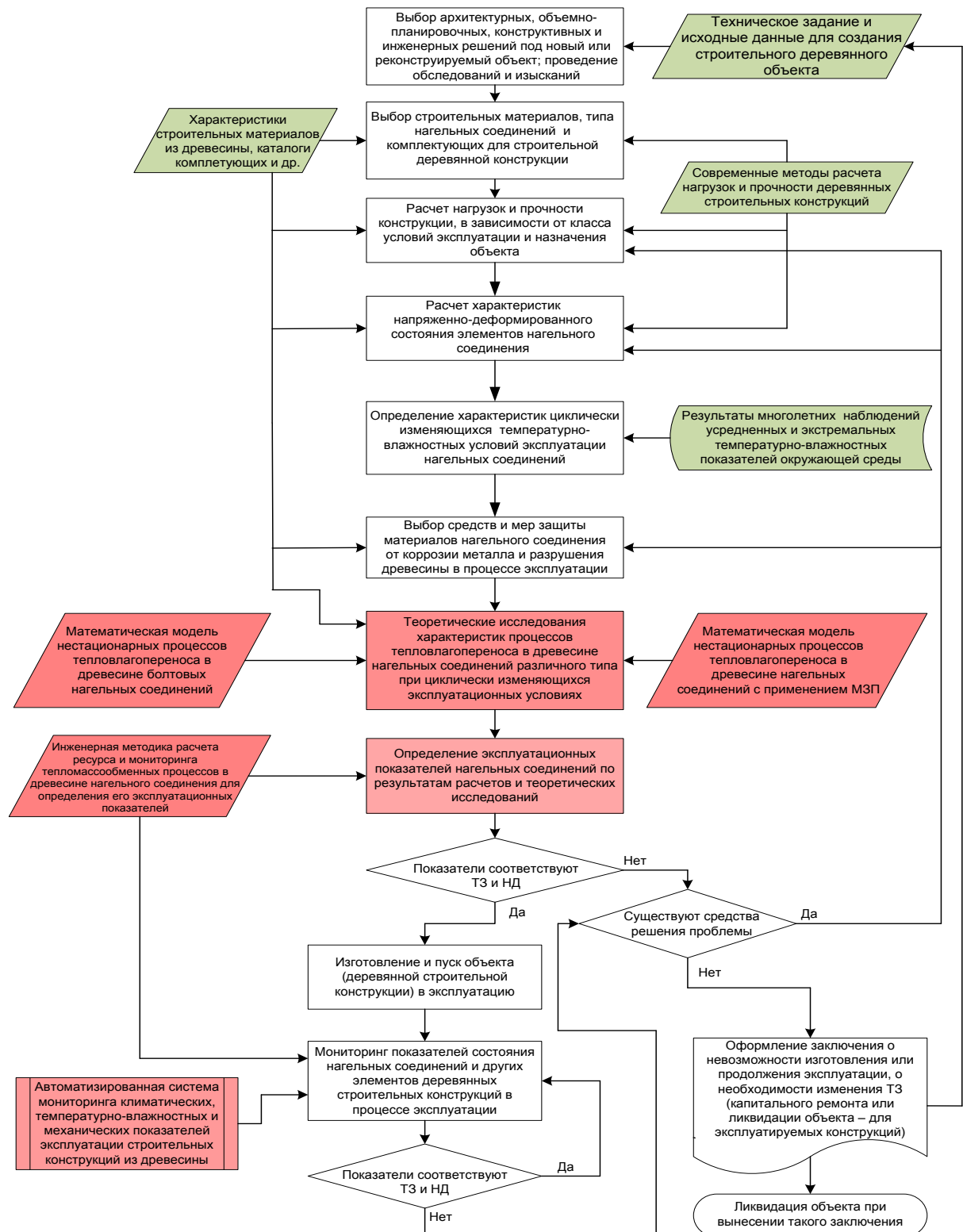


Рисунок 2.1. Блок-схема процесса создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных строительных конструкций из древесины на основе изучения процессов тепло-массообмена в нагельных соединениях и учета сведений о таких процессах в определении и обеспечении требуемых эксплуатационных показателей: ТЗ – техническое задание; НД – нормативный документ; условные обозначения: красный (серый) цвет – теоретические модели, методы и средства, которые необходимо разработать; зелёный (светло серый) – существующие; белый – процесс

Решение этих вопросов производится с учетом класса условий эксплуатации и назначения конструкции и с использованием литературных источников и нормативных документов [33, 61, 64, 85, 87, 93, 121].

Оригинальной составной частью рассматриваемой методологии (см. рис. 2.1) является этап (седьмой), который предполагает проведение теоретических исследований характеристик процессов тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений различного типа при циклически изменяющихся эксплуатационных условиях, характеристики которых были определены на предыдущих этапах. Благодаря таким исследованиям определяются характеристики нестационарных температурных полей и полей влагосодержания в древесине, а также закономерности их изменения при суточных и сезонных колебаниях условий эксплуатации. Для проведения подобных исследований необходим соответствующий инструментарий в виде математических моделей нестационарных процессов тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений различного типа (см. рис. 2.1). В настоящее время подобные математические модели отсутствуют, и недостаток знаний в сфере тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений нередко приводит к серьёзным ошибкам при проектировании и эксплуатации строительных конструкций из древесины (гл. 1).

Столь же оригинальным, как и предыдущий, является следующий этап (восьмой) – определение эксплуатационных показателей нагельных соединений по результатам расчетов и теоретических исследований. Действительно, просто знаний о нестационарных температурных полях и полях влагосодержания в древесине строительных конструкций недостаточно для решения практических вопросов. Необходимо на основании характеристик таких полей иметь возможность определять различные эксплуатационные показатели нагельных соединений, позволяющие оценивать работоспособность этих узлов, а следовательно, всей деревянной конструкции, с учетом характеристик напряженно-деформированного состояния. Этой цели будет служить

инженерная методика расчета и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения для определения его эксплуатационных показателей (см. рис. 2.1).

Как следует из рис. 2.1, после определения эксплуатационных показателей проверяется их соответствие требованиям ТЗ и НД. При наличии такого соответствия осуществляется переход к этапу – изготовление и пуск объекта (деревянной строительной конструкции) в эксплуатацию, который не нуждается в пояснениях. В противном случае осуществляется переход к этапу оценки возможности решения проблемы (см. рис. 2.1).

Для обеспечения безупречной работы деревянной строительной конструкции в процессе эксплуатации рассматриваемую методологию целесообразно дополнить еще одним элементом. Это контроль показателей состояния нагельных соединений и других элементов деревянных строительных конструкций в процессе эксплуатации (см. рис. 2.1) с использованием уже упомянутой выше инженерной методики и автоматизированной системы контроля (мониторинга) эксплуатационных параметров нагельных соединений (показана отдельным элементом). Разработка этого элемента также является одной из задач настоящей диссертационной работы. Надо сказать, что контроль за состоянием таких конструкций производился и до настоящего времени, однако он совершенно не учитывает процессов тепловлагопереноса и их влияния на эксплуатационные показатели деревянной конструкции. Это нередко приводит к ошибкам в оценке дальнейшей работоспособности строительных объектов из древесины.

На рис. 2.1 видно также, что если в ходе использования объекта обнаруживается несоответствие эксплуатационных показателей требованиям ТЗ и НД, то осуществляется переход к уже упомянутому этапу оценки возможности решения этой проблемы.

В том случае, когда обнаруживается возможность решения возникшей проблемы, осуществляется переход к соответствующим этапам (см. рис. 2.1). В противном случае делается вывод о невозможности создания или продолжения

эксплуатации строительной деревянной конструкции, что требует применения более серьезных мер: изменение ТЗ, выполнение капитального ремонта, реконструкции или, наконец, ликвидации объекта.

Анализ представленной методологии (рис. 2.1) позволяет сделать вывод, что для ее реализации требуется разработка элементов, обозначенных красной заливкой, что нашло отражение в постановке задач настоящего диссертационного исследования. Вполне очевидно, что в решении этих задач наиболее сложным случаем является разработка математических моделей тепловлагодиффузии в древесине болтовых соединений и соединений с МЗП (рис. 2.1).

Как было показано в гл. 1, научно-методологической основой решения этих задач являются современные физико-теоретические представления о процессах взаимосвязанного тепломассобародиффузии, которые подробно описаны в разд. 1.7 и которые количественно описываются системой уравнений (1.29).

Решение этой системы уравнений открывает широкие возможности для досконального исследования процессов тепловлагодиффузии в элементах нагельных соединений методами компьютерного моделирования и обеспечения надежной и долговечной работы таких узлов на практике.

Очевидно, что результаты решения системы уравнений (1.29) применительно к нагельным соединениям разного типа будут отличаться. Однако существует ряд общих вопросов, требующих предварительного рассмотрения.

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

На рис. 2.2 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 [38].

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 рис. 2.2.

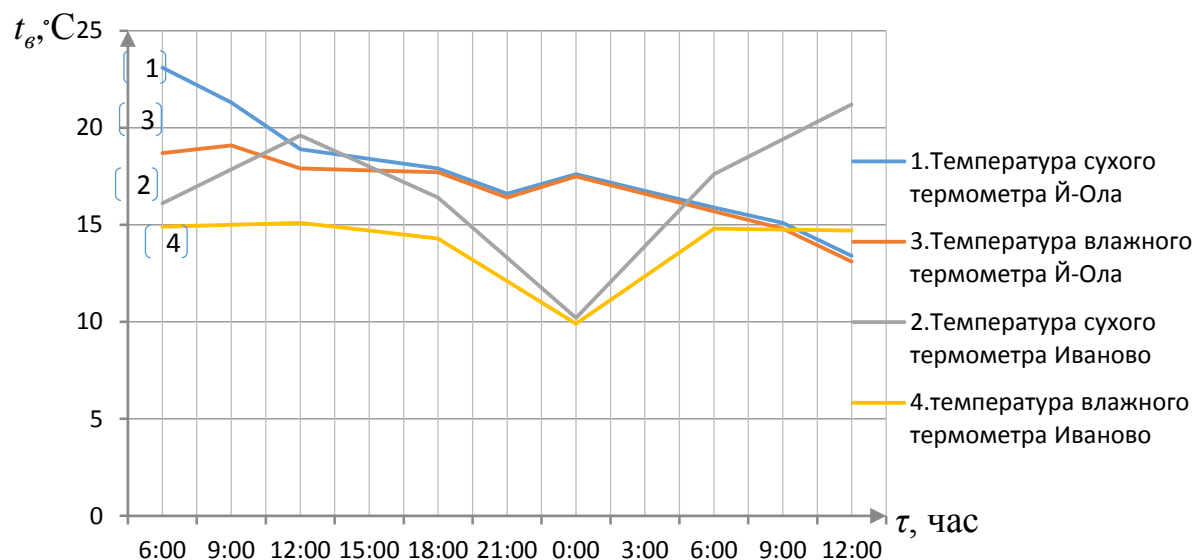


Рисунок 2.2. Температурный график с 6.00 17 июля по 12.00 18 июля 2012 года в городах Йошкар-Ола и Иваново (по данным Росметеостата)

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 во времени температуры сухого термометра и влажного термометра соответственно с формальной математической точки зрения определяется выражениями вида:

$$t_{c.m.}(\tau) = f_1(\tau); t_{вл.м.}(\tau) = f_2(\tau); \quad (2.1)$$

Известно [122], что любая графическая зависимость вида (1) может быть представлена гистограммой, изображенной на рис. 2.3.

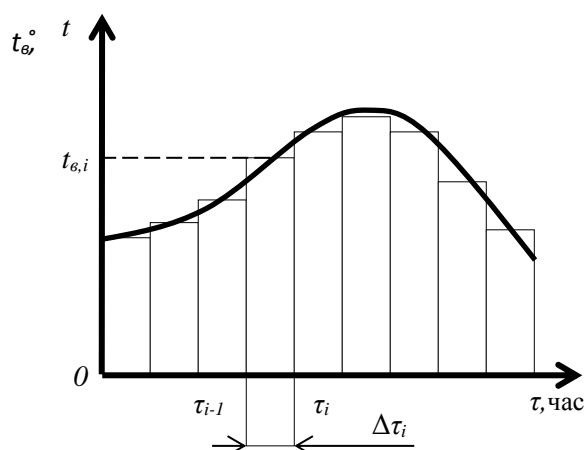


Рисунок 2.3. Схематичное представление кривой и гистограммы

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

$$\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}; \quad (2.2)$$

значения функций (а в данной случае – $t_{c.m.i}$ и $t_{в.л.m.i}$) могут считаться постоянными в пределах этого промежутка. На таком предположении основан метод «микропроцессов», изложенный, например, в [53, 105, 109, 110].

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

Как уже отмечено в гл. 1, конструкции и формы нагельных соединений весьма разнообразны [101]. Однако для понимания сущности общих вопросов построения математических моделей необходимо качественно рассмотреть физические процессы взаимодействия элементов нагельного соединения с окружающей средой (рис. 2.4) [38].

Можно предположить, что в какой-то момент времени, принятый за начало отсчета, температуры нагеля и дерева равны начальным значениям (кривая 1 на рис. 2.5).

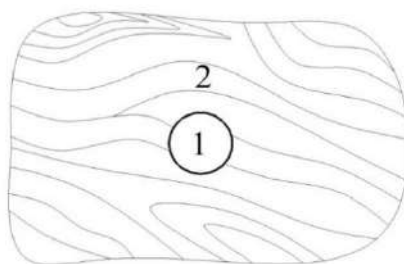


Рисунок 2.4. Иллюстрация модели нагельного соединения
1-нагель (болт); 2-древесина

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 элемент нагеля прогревается практически равномерно, а древесина – существенно медленнее. В этом случае динамика полей температур в рассматриваемой системе может характеризоваться линиями 2, 3, 4 на рис. 2.5 [38].

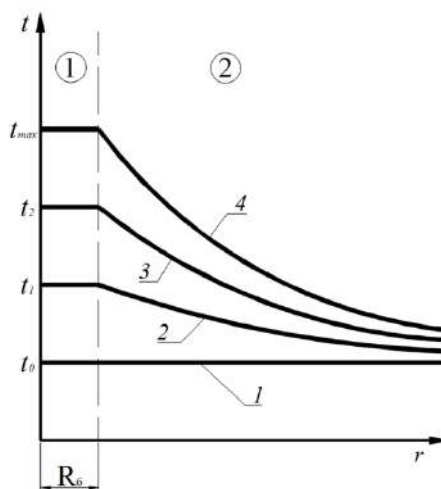


Рисунок 2.5. График изменения температур в толще древесины (2) при росте температуры металла (1), R_6 – радиус болта ($t_{max} > t_2 > t_1 > t_0$; $\tau_4 > \tau_3 > \tau_2 > \tau_0$)

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

Температура древесины, вследствие большей тепловой инерции, будет изменяться менее интенсивно, и можно предположить, что динамика полей

температур металлических элементов в такой системе станет характеризоваться кривыми на рис. 2.6 [38].

При этом следует также предположить, как показано на рис. 2.6, характерную особенность периода охлаждения: в случае быстрого охлаждения металла (рис. 2.6,б) график распределения температуры в древесине будет иметь экстремум (максимум), перемещающийся с течением времени во внутренние слои. В противоположном случае (рис. 2.6,а) такие зависимости качественно будут иметь вид, похожий на рис. 2.5.

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

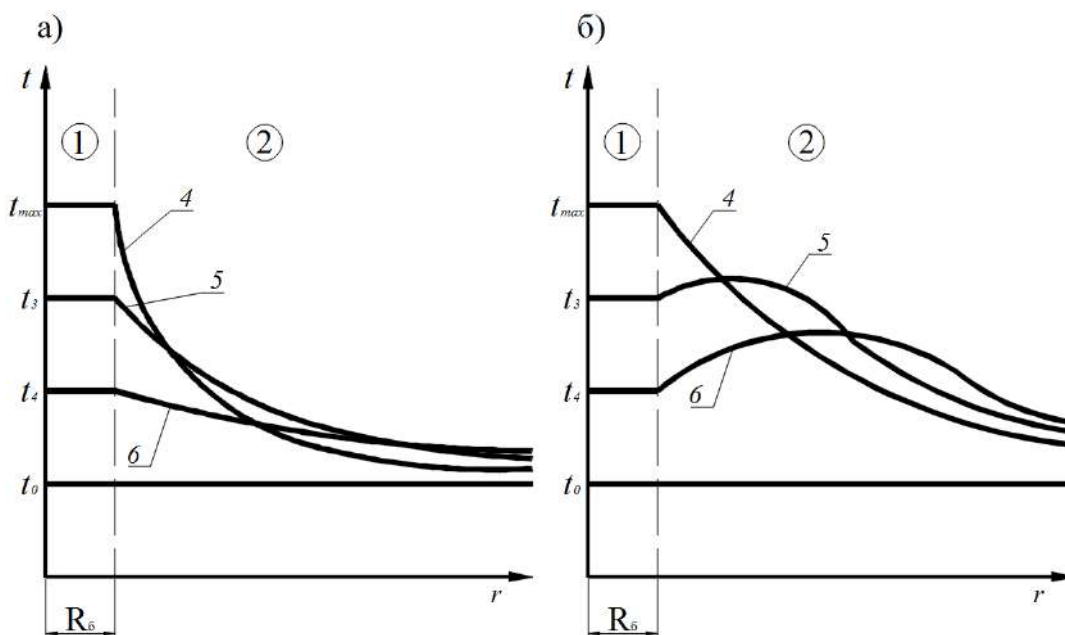


Рисунок 2.6. Графики изменения температуры в древесине (2) на стадии малоинтенсивного (а) и высокоинтенсивного (б) охлаждения металла ($\tau_5 > \tau_6$)

Рис. 2.7 представляет собой упрощенную модель диаграммы состояния влажного воздуха, или $I-d$ диаграммы [123].

Процесс охлаждения воздуха от температуры t_A до температуры t_e происходит по линии постоянного влагосодержания АВ, но при изменяющихся значениях и энтальпии и относительной влажности воздуха. В точке В пересекаются линия постоянной температуры t_e и линия постоянной относительной влажности $\varphi = 100\%$. Как известно [106, 123], 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.

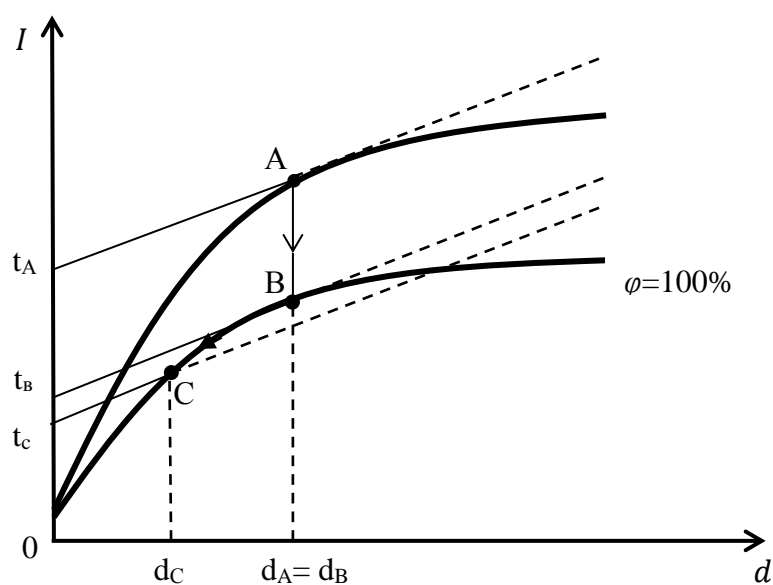


Рисунок 2.7. Иллюстрация к процессу охлаждения воздуха на $I-d$ диаграмме (I – энтальпия воздуха, Дж/(кг·К); d – влагосодержание воздуха, кг влаги / кг воздуха)

Кроме этого, строго говоря, и древесина никогда не бывает абсолютно сухой. В ней всегда имеется некое содержание влаги, равновесное с окружающей средой.

Однако появление избыточной влаги приводит к процессу ее диффузии внутрь близлежащих к болту слоев древесины. Следующие дни приведут к цикличности описанных процессов теплопереноса. Это означает, что в древесине будут постоянно протекать нестационарные процессы тепловлагодиффузии.

Как показано в гл. 1, согласно теории теплопереноса [53, 106], эти процессы нестационарного переноса теплоты и влаги применительно к

строительным материалам и конструкциям можно описать системой дифференциальных уравнений (1.29).

При этом следует учитывать также природу и анизотропность свойств материала древесины [3]. Известно, например, что соотношение коэффициентов влагопроводности для сосны в радиальном и тангенциальном направлениях по стволу определяется как

$$\frac{k_{rad}}{k_{танг}} = \frac{1}{5}, \quad (2.3)$$

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

$$\frac{k_{rad}}{k_{танг}} = \frac{1}{(12 \div 18)}. \quad (2.4)$$

На основании существующих сведений о значимости параметров, входящих в состав системы этих уравнений (1.29), ее решение может быть заметно упрощено применительно к процессам тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений [53, 105]. Действительно, первое уравнение (дифференциальное уравнение теплопроводности) в системе уравнений (1.29) показывает, что поле температур в древесине определяется температуропроводностью материала конструкции, а также изменением во времени содержания и внутренним испарением влаги [105]. Второе уравнение (дифференциальное уравнение влагопроводности) отражает тот факт, что движение влаги определяется влагопроводностью, термодиффузией и баропереносом [21]. Для случая малоинтенсивных процессов с температурами до 100 °С, а к таковым относятся и процессы взаимодействия деревянных сооружений (и элементов из них) с окружающей средой, эффектами внутреннего испарения влаги, теплодиффузии и бародиффузии можно пренебречь [53, 124]. И тогда система уравнений (1.29) взаимосвязанного тепломассопереноса трансформируется в систему двух уравнений невзаимосвязанного переноса теплоты и массы вещества (влаги) [53]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) + \varepsilon \frac{r^*}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) + \operatorname{div}(k \delta_T \operatorname{grad}(t)) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Уравнения (2.5) являются нелинейными и в общем случае не могут быть решены современными аналитическими методами. А для их решения численными методами необходимы эмпирические зависимости, связывающие все параметры переноса с температурой и влажностью, получить которые крайне затруднительно.

В этих условиях наиболее перспективным способом решения уравнений (2.5) оказывается сочетание аналитических и численных методов решения и анализа [53, 124].

Одним из таких методов является упомянутый выше метод «микропроцессов» [53, 105, 109, 110], положительно зарекомендовавший себя при разработке математических моделей и инженерных методов расчета для сушки, обжига и тепловлажностной обработки строительных материалов [124].

Суть этого метода применительно к рассматриваемой системе «древесина-металлический нагель» состоит в том, что время всего процесса взаимодействия конструкции с окружающей средой представляется непрерывной цепью последовательных стадий процесса («микропроцессов»), на каждой из которых температурно-влажностные параметры среды считаются постоянными, но скачкообразно меняющимися при переходе от одного «микропроцесса» к другому.

При этом начальными условиями для расчета тепло- и влагопереноса на последующем этапе («микропроцессе») являются результаты расчета на предыдущем этапе. Такой подход позволяет упростить решение системы уравнений (2.5).

Немаловажным является корректное задание начальных и граничных условий, поскольку именно они определяют особенности взаимодействия

конструкции с окружающей средой и фактически определяют конечный результат. Начальные условия в общем виде можно представить с помощью следующих выражений [53, 105, 106, 124-126]:

$$t(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=0} = t_0(x, y, z), \quad (2.6)$$

$$u(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=0} = u_0(x, y, z), \quad (2.7)$$

характеризующих распределение значений температуры и влагосодержания в древесине, где $t_0(x,y,z)$ и $u_0(x,y,z)$ – изменение в трехмерном пространстве объема материала (древесины) температуры и влагосодержания соответственно в начальный момент времени $\tau = 0$.

В качестве обобщенных граничных условий можем записать следующие соотношения [101-104, 106, 123, 125]:

$$\alpha [t_c(\tau) - t(x, y, z, \tau)] = \lambda \nabla t(x, y, z, \tau) + q_m(\tau) r^* \quad (2.8)$$

$$q_m(\tau) = \beta [u_{nc}(\tau) - u_c(\varepsilon)] p_0 = -k p_0 [\nabla u(x, y, z, \tau)] \quad (2.9)$$

Здесь α , β – соответственно коэффициенты тепло- и влагообмена между конструкцией и окружающей средой; $q_m(\tau)$ – плотность потока влаги на границе раздела сред.

Граничное условие (2.8) показывает, что в общем случае энергия теплового потока от воздушной среды или металла нагеля затрачивается на нагрев близлежащих к нагелю слоев древесины (первое слагаемое правой части) и испарение влаги (второе слагаемое правой части).

Граничное условие (2.9) отражает тот факт, что поток массы испаряемой влаги (слагаемое $q_m(\tau)$), выражаемый как массоотдача от границы деревянного изделия в воздушную среду, поступает из внутренних слоев древесины к границе раздела «газ-твердое тело» посредством массопроводности (первое слагаемое правой части) и в результате действия механизма термодиффузии (второе слагаемое правой части) [101-104].

Таким образом, система уравнений (2.5) с начальными (2.6), (2.7) и граничными (2.8), (2.9) условиями составляет основу для теоретического изучения процессов нестационарного тепловлагопереноса в древесине

нагельных соединений при циклически изменяющихся температурно-влажностных условиях окружающей среды [53, 127, 128].

2.2. Постановка и решение задачи нестационарного теплопереноса в системе «цилиндрический нагель – древесина» при произвольном законе изменения температуры среды эксплуатации

В болтовом нагельном соединении основным металлическим элементом является болт, т.е. тело цилиндрической формы. 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 решение системы уравнений (2.5), как правило, получается в форме Бесселевых функций. Они обладают специфическими особенностями вычислений и порой создают серьезные трудности при решении практических вопросов.

Вместе с тем известно, что при определенных соотношениях геометрических размеров задача теплопереноса в цилиндрической системе координат может быть с успехом заменена плоской (одномерной) задачей. Например, в соответствии с рис. 2.8 [38] при соотношении $R_6/R_1 < 0,5$ краевая задача теплопроводности в древесине может быть рассмотрена в системе неограниченных пластин, с размерами по толщине:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= R_1 - R_6, \\ \delta_2 &= R_2 - R_1, \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_i &= R_i - R_{i-1}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Как будет показано далее, это существенно упрощает и математическую постановку задачи, и поиск ее аналитического решения, поскольку своеобразными «типовыми» становятся краевые условия, а точность

результатов всей расчетной методики определяется только соотношением размеров пластин и шагов расчета по времени.

И, наконец, такой подход позволяет использовать в расчетах не только осредненное значение коэффициентов теплопроводности и влагопроводности, но и их зависимость от температур и влагосодержания отдельных слоев.

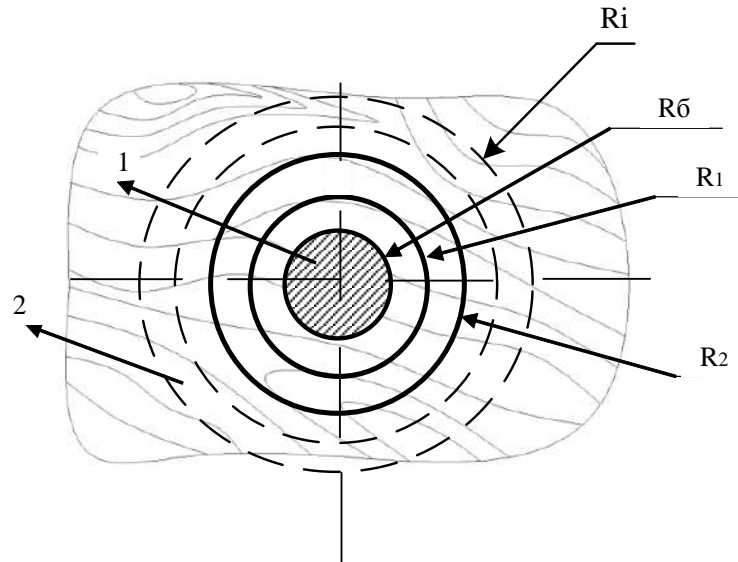


Рисунок 2.8. Моделирование древесины системой колец (неограниченных пластин)
 $\dots > R_i > \dots > R_2 > R_1 > R_б$: 1 – нагель (болт); 2 – древесина

Краевая задача теплопереноса в древесине для первого, прилегающего к болту, «кольца» (рис. 2.8), т.е. первое уравнение системы (2.5) в цилиндрической системе координат, запишется следующим образом (2.11) [101-104, 125, 127]:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad \tau > 0; \quad R_б \leq r \leq R_1. \quad (2.11)$$

$$t(r, \tau)|_{\tau=0} = t_0(r). \quad (2.12)$$

$$t(r, \tau)|_{r=R_б} = t_б(\tau). \quad (2.13)$$

$$\left. \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R_1} = 0. \quad (2.14)$$

Выражение (2.12) является начальным условием задачи и характеризует поле температур от поверхности нагеля (болта) во внутренние слои древесины по координате $r \geq R_б$.

Запись (2.13) является граничным условием I рода и отражает тот факт, что в месте контакта «металл-древесина» предполагаются плотное прилегание и равенство температур древесины и металла. Выражение (2.14) является граничным условием II рода и показывает, что на второй границе выделенного «кольца» осуществляется условие тепловой изоляции до некоторого момента времени. Ниже будут показаны пространственно-временные границы применения этого условия.

Как уже отмечалось в [101], в общем случае краевая задача (2.11) - (2.14) является нелинейной, в силу того, что теплофизические свойства древесины существенно зависят от ее влажности и температуры. В общем случае задать явный вид функции $t_{\delta}(\tau)$ в граничном условии (2.13) не представляется возможным, поскольку температура металла существенно зависит от параметров воздуха (уравнение (2.1), рис. 2.5 и 2.6), которые непредсказуемым образом могут изменяться во времени суток. Характер этой функции будет определяться применительно к конкретным погодным условиям на основании результатов метеонаблюдений.

Итак, согласно методу «микропроцессов» общее время процесса представляется непрерывной цепью n последовательных «микропроцессов» (см. рис. 2.3) [105, 109, 110]:

$$\tau_{проц.} = \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i. \quad (2.15)$$

В пределах каждого «микропроцесса» теплофизические параметры взаимодействующих сред, т.е. отдельных слоев (см. рис. 2.8), можно считать постоянными, но скачкообразно изменяющимися при переходе от предыдущего «микропроцесса» к последующему [110, 127, 128]. В этих условиях конечное распределение температур, полученное на предыдущем шаге расчета, будет выбрано в качестве начального условия для расчетов на последующем этапе.

Анализ расчетной схемы на рис. 2.8 с учетом соотношений (2.11) - (2.14) позволил сделать вывод, что для первого слоя за ноль координаты

целесообразно принять значение R_6 (поверхность болта). При этом изменение координаты будет происходить в пределах $0 \leq r \leq \delta_l$. И тогда для первого этапа расчетов и первого «кольца» древесины краевую задачу теплопроводности (2.11) - (2.14) можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial t_1(r, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad 0 < \tau \leq \Delta \tau_1; \quad 0 \leq r \leq \delta_1. \quad (2.16)$$

$$t_1(r, \tau)|_{\tau=0} = t_{1,0}(r). \quad (2.17)$$

$$t_1(r, \tau)|_{r=R_6} = t_{\delta,1}. \quad (2.18)$$

$$t_1(r, \tau)|_{r=R_1} = t_{R_1}. \quad (2.19)$$

Для упрощения анализа целесообразно ввести в рассмотрение безразмерные переменные вида

$$T_1(\bar{r}, Fo_1) = \frac{t_1(r, \tau) - t_{R,1}}{t_{\delta,1}}; \quad \bar{r} = \frac{r}{\delta_1}; \quad Fo_1 = \frac{a_1 \tau}{\delta_1^2}. \quad (2.20)$$

В итоге задача (2.16) - (2.19) представится следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(\bar{r}, Fo_1)}{\partial Fo_1} = \frac{\partial^2 T_1(\bar{r}, Fo_1)}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_1 > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1. \quad (2.21)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo_1)|_{Fo_1=0} = T_{1,0}(\bar{r}). \quad (2.22)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo_1)|_{\bar{r}=0} = T_{\delta,1}. \quad (2.23)$$

$$T_1(\bar{r}, Fo_1)|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (2.24)$$

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

При этом физически выражение (2.23) будет означать, что в любой момент времени на левой границе выделенного «кольца» температура равна температуре болта, а на правой границе до определенного момента времени температура сохраняет начальное значение.

Решение краевой задачи (2.21)-(2.24) производится методом интегрального преобразования Лапласа [122, 129]. Этот математический

инструмент, как известно, очень удобен и широко применяется для решения линейных дифференциальных уравнений. Смысл его заключается в том, что искомая функция некоторого аргумента $f(t)$ (например, времени t), фигурирующая в составе дифференциального уравнения и получившая название – *оригинал*, с помощью прямого преобразования Лапласа превращается в функцию $F(s)$ комплексного переменного $s = \sigma + i\omega$, получившую название – *изображение*. В результате такой процедуры решаемое дифференциальное уравнение записывается в виде алгебраического выражения, а процедура решения превращается в работу с алгебраическими формулами, что намного проще, чем работа с оригиналами. После нахождения искомой функции в области изображений она переводится в область оригиналов (т.е. действительных величин) посредством обратного преобразования Лапласа. В настоящее время существует большое количество методических разработок, позволяющих быстро выполнять работу с выражениями в области изображений, а также прямое и обратное преобразование Лапласа [129].

В области изображений по Лапласу решение уравнения (2.21) с учетом начального условия (2.22) будет иметь вид [129]:

$$T_1(\bar{r}, s) = A \cdot ch(\sqrt{s\bar{r}}) + B \cdot sh(\sqrt{s\bar{r}}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} T_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{r} - \xi) d\xi, \quad (2.25)$$

здесь: ξ – безразмерная координата $0 \dots \bar{r}$.

Граничные условия (2.23) и (2.24) в области изображений по Лапласу примут следующий вид:

$$T_1(\bar{r}, s) \Big|_{\bar{r}=0} = \frac{T_{0,1}}{s}, \quad (2.26)$$

$$T_1(\bar{r}, s) \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (2.27)$$

При подстановке значения $\bar{r}=0$ в решение (2.25) с учетом условия (2.26) получается следующее выражение:

$$\frac{T_{R_1}}{s} = A \cdot \underbrace{ch(0)}_1 + B \cdot \underbrace{sh(0)}_0. \quad (2.28)$$

Отсюда константа A определяется следующим образом:

$$A = \frac{T_{R_1}}{s}. \quad (2.29)$$

С учетом условия (2.27) выражение (2.25) приобретает вид

$$0 = \frac{T_{R_1}}{s} \cdot ch\sqrt{s} + B \cdot sh\sqrt{s} - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi. \quad (2.30)$$

Отсюда следует:

$$B = -\frac{T_{R_1}}{s} \cdot \frac{ch\sqrt{s}}{sh\sqrt{s}} + \frac{1}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi. \quad (2.31)$$

После подстановки (2.29) и (2.31) в решение (2.25) это соотношение приобретает вид

$$T_1(\bar{r}, s) = \frac{T_{R_1}}{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) - \frac{T_{R_1}}{s} \cdot \frac{ch\sqrt{s}}{sh\sqrt{s}} \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r}) + \frac{sh(\sqrt{s}\bar{r})}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \cdot \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \times \\ \times sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} T_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{r}-\xi) d\xi. \quad (2.32)$$

В полученном выражении функция $T_1(\bar{r}, s)$ является так называемым отображением функции $T_1(\bar{r}, F_{O,i})$ в области конформных изображений [129].

Первые два слагаемых правой части (2.32) дают

$$[1] + [2] = \frac{T_{R_1}}{s \cdot sh\sqrt{s}} \left[sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) - ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r}) \right]. \quad (2.33)$$

При разложении в ряд Тейлора по степеням s числитель [ч] и знаменатель [з] (2.33) можно определить с использованием выражений [122,130]:

$$[ч] = T_{R_1} \left\{ \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{(\sqrt{s}\bar{r})^2}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \dots \right] \left[(\sqrt{s}\bar{r}) + \frac{(\sqrt{s}\bar{r})^3}{3!} + \dots \right] \right\} = \quad (2.34)$$

$$T_{R_1} \sqrt{s} \left\{ \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\bar{r}^2}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \left[\bar{r} + \frac{s\bar{r}^3}{3!} + \dots \right] \right\}.$$

$$[з] = s \cdot \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] = s\sqrt{s} \cdot \left[1 + \frac{s^3}{3!} + \dots \right]. \quad (2.35)$$

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

$$\frac{1}{\sqrt{s}}[u] = T_{R_1} \left\{ \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \left[r + \frac{sr^{-3}}{3!} + \dots \right] \right\}. \quad (2.36)$$

$$\frac{1}{\sqrt{s}}[z] = s \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right]. \quad (2.37)$$

При $s=0$ выражение (2.36) приобретает вид

$$\frac{1}{\sqrt{s}}[u] \Big|_{s=0} = (1-\bar{r})T_{R_1}. \quad (2.38)$$

В результате дифференцирования (2.37) по s получается

$$\frac{d}{ds} \left\{ \frac{1}{\sqrt{s}}[z] \right\} = s' \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] + s \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right]'. \quad (2.39)$$

И при $s=0$ имеет такой вид:

$$\frac{d}{ds} \left\{ \frac{1}{\sqrt{s}}[z] \right\} \Big|_{s=0} = 1. \quad (2.40)$$

Значение нулевого корня при этом будет (в соответствии со второй теоремой разложения) [129]:

$$\frac{\phi(0)}{\psi'(0)} = \frac{(1-\bar{r})T_{R_1}}{1} = (1-\bar{r})T_{R_1}. \quad (2.41)$$

Для определения множества корней используется выражение [129]

$$[I] = T_{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi(s)}{\psi(s)} \cdot \exp(s_n F O_1) = T_{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[sh\sqrt{s_n} \cdot ch(\sqrt{s_n} r) - ch\sqrt{s_n} \cdot sh(\sqrt{s_n} r)]}{(s \cdot sh\sqrt{s})'} \cdot \exp(s_n F O_1). \quad (2.42)$$

В результате дифференцирования знаменателя получается формула

$$(s \cdot sh\sqrt{s})' = s' \cdot sh\sqrt{s} + s \cdot (sh\sqrt{s})' = sh\sqrt{s} + s \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot ch\sqrt{s}. \quad (2.43)$$

Характеристическое уравнение для поиска множества корней s_n будет иметь следующий вид [129]:

$$sh\sqrt{s_n} = 0. \quad (2.44)$$

При переходе в (2.42) от гиперболических функций к тригонометрическим это выражение имеет вид

$$[I] = 2T_{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[\frac{1}{i} \cdot \sin(i\sqrt{s_n}) \cdot \cos(i\sqrt{s_n} r) - \cos(i\sqrt{s_n}) \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s_n} r) \right]}{\sqrt{s} \cdot \cos(i\sqrt{s_n})} \cdot \exp(i^2 s_n F o_1). \quad (2.45)$$

Если вынести за скобку в числителе $\frac{1}{i}$ и поместить в знаменатель, то выражение (2.45) может быть записано следующим образом:

$$[I] = 2T_{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n \cdot \cos \mu_n} \left[\sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n r) - \cos \mu_n \cdot \sin(\mu_n r) \right] \exp(-\mu_n^2 F o_1). \quad (2.46)$$

Из характеристического уравнения (2.44) также следует:

$$\sin(i\sqrt{s_n}) = \sin \mu_n = 0, \text{ а отсюда: } \mu_n = \pi n. \quad (2.47)$$

И для $\cos \mu_n$ справедливо выражение

$$\cos \mu_n = (-1)^n. \quad (2.48)$$

Используя обратное преобразование Лапласа, для [I] в области оригиналов получено выражение

$$[I] = -2T_{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \cdot \sin(\mu_n r) \cdot \exp(-\mu_n^2 F o_1) \quad (2.49)$$

И тогда после аналогичного преобразования в оригиналах для первого и второго слагаемых (2.32) можно записать:

$$\begin{aligned} L^{-1} \{[I] + [II]\} &= T_{R_1} (1 - \bar{r}) - 2T_{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \cdot \sin(\mu_n r) \cdot \exp\left(-\frac{\mu_n^2 F o_1}{\pi n}\right) = \\ &= T_{R_1} \left[(1 - \bar{r}) - 2 \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n r) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 F o_1) \right]. \end{aligned} \quad (2.50)$$

Последнее слагаемое в (2.32) обратится в ноль в силу умножения числителя и знаменателя на $sh\sqrt{s}$.

Третье слагаемое выражения (2.32) после преобразования подынтегральной функции примет вид

$$sh\sqrt{s} (1 - \xi) = sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\xi) - ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi) = -ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi). \quad (2.51)$$

Следовательно, для [3] можно записать:

$$\begin{aligned}
 [3] &= \frac{sh(\sqrt{s}r)}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \int_0^1 T_{1,0}(\xi) [-ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi)] d\xi = \\
 &= - \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \left[\frac{sh(\sqrt{s}r) \cdot ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi)}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \right] \cdot d\xi.
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

Вновь числитель и знаменатель представляются полиномами:

$$\begin{aligned}
 \phi(s) &= \left[(\sqrt{s}r) + \frac{(\sqrt{s}r)^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[(\sqrt{s}\xi) + \frac{(\sqrt{s}\xi)^3}{3!} + \dots \right] = \\
 &= s \left[\bar{r} + \frac{s\bar{r}^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot \left[\xi + \frac{s\xi^3}{3!} + \dots \right].
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

$$\psi(s) = \sqrt{s} \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] = s \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right]. \tag{2.54}$$

Отсюда

$$\psi'(s) = s' \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] + s \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right]'. \tag{2.55}$$

и $\psi'(s)|_{s=0} = 1$

Однако (2.54) обращается в ноль при $s=0$. Следовательно, нулевой корень отсутствует.

В результате дифференцирования знаменателя в (2.52)

$$\psi'(s) = (\sqrt{s}) \cdot sh\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot (sh\sqrt{s})' = \sqrt{s} \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} ch\sqrt{s} = \frac{1}{2} ch\sqrt{s}. \tag{2.56}$$

Для квадратной скобки (2.52), переходя к тригонометрическим функциям:

$$[\approx] = \frac{\frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}r) \cdot \cos(i\sqrt{s}) \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}\xi)}{\frac{1}{2} \cos(i\sqrt{s})} = - \frac{2 \sin(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos \mu_n \cdot \sin(\mu_n \xi)}{\cos \mu_n}. \tag{2.57}$$

Окончательно для [3] в оригиналах:

$$[3] = +2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\mu_n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\mu_n \xi) d\xi \cdot \exp(-\mu_n^2 F o_1) = \tag{2.58}$$

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

Итак, полное решение будет определяться суммой выражений (2.50) и (2.58):

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

$$T_1(\bar{r}, Fo_1) = T_{R_1} \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1) \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1). \quad (2.59)$$

Посредством дифференцирования выражения (2.59) можно получить формулу для определения градиента температуры в пределах первого слоя:

$$\frac{dT_1(\bar{r}, Fo_1)}{d\bar{r}} = -T_{R,1} - 2T_{R,1} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1) + 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \cos(\pi n \bar{r}) \int_0^1 T_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1). \quad (2.60)$$

Для продолжения вычислений в пределах второго слоя $R_1 \div R_2$ (см. рис. 2.8) необходимо знать величину $Ki = Ki_1^*$, а для её определения – значение плотности теплового потока q_1 на границе первого и второго слоев. Используя выражение (2.60), не трудно получить формулу для определения искомых величин:

$$Ki_1^* = - \left. \frac{dT_1(\bar{r}, Fo_1^*)}{d\bar{r}} \right|_{\bar{r}=1} = T_{R,1} + 2T_{R,1} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{r}) \Big|_{\bar{r}=1} \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1^*) - 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \cos(\pi n \bar{r}) \Big|_{\bar{r}=1} \int_0^1 T_0(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1^*). \quad (2.61)$$

Учитывая очевидное свойство тригонометрических функций [122]:

$$\cos(\pi n) = (-1)^n. \quad (2.62)$$

После несложных преобразований получаем:

$$Ki_1^* = - \left. \frac{dT_1(\bar{r}, Fo_1^*)}{d\bar{r}} \right|_{\bar{r}=1} = T_{R,1} + \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_1^*) \cdot \left[T_{R,1} - \pi n \int_0^1 T_0(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi \right] \right\} \quad (2.63)$$

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

При этом, в соответствии с физическим смыслом критерия Кирпичева [53, 120]:

$$Ki_1 = \frac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1 \cdot t_{\sigma,1}}. \quad (2.64)$$

Выражения (2.59), (2.61) и (2.63) являются решением задачи по определению изменения температуры, градиента температуры и плотности теплового потока в пределах первого слоя. В начале процесса вычислений расчеты по нему необходимо проводить до момента, пока на границе R_1 не возникнет градиент температуры. Это соответствует моменту времени $\tau = \Delta\tau_1$, что означает завершение первого «микрпроцесса». После этого в рассмотрение включается второй слой с размерами R_1/R_2 и изменением пространственной координаты от R_1 до R_2 . Для этого слоя по аналогии с первым слоем за ноль координаты необходимо принять значение R_1 , что соответствует изменению пространственной координаты $0 \leq r \leq \delta_2$. Граничные условия для координаты R_2 будут аналогичны условию (2.24). Задача для второго слоя будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T_2(\bar{r}, Fo_2)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_2(\bar{r}, Fo_2)}{\partial \bar{r}^2} ; Fo_2 > 0 ; 0 < \tau \leq \Delta\tau_2 ; \bar{r} = \frac{r}{\delta_2} ; 0 \leq \bar{r} \leq 1 \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned}
T_2(\bar{r}, s) &= Ki_1 \frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r})}{s\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} - Ki_1 \frac{sh(\sqrt{s}\bar{r})}{s\sqrt{s}} + \frac{ch(\sqrt{s}\bar{r})}{ch\sqrt{s}} \times \\
&\times \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \left[sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\xi) - ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi) \right] d\xi = \\
&= Ki_1 \frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) - ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r})}{s\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} + \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \left[\frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\bar{r}) \cdot ch(\sqrt{s}\xi)}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \right] d\xi.
\end{aligned} \tag{2.66}$$

$$T_2(\bar{r}, Fo_2) \Big|_{Fo_2=0} = T_{2,0}(\bar{r}); \tag{2.67}$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial t_2(\bar{r}, \tau)}{\partial r} \Big|_{\bar{r}=0} = q_1. \tag{2.68}$$

$$T_2(\bar{r}, Fo_2) \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \tag{2.69}$$

Уравнение (2.68) записано в размерном виде. Для того чтобы записать его в безразмерной форме, необходимо ввести обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \bar{r} = 0, \text{ при } r = R_1 \\ \bar{r} = 1, \text{ при } r = R_2 \end{aligned} \right\} \bar{r} = \frac{r}{\delta_2}. \tag{2.70}$$

$$T_2(\bar{r}, Fo_2) = \frac{t_2(r, \tau) - t_{R_2}}{t_{R_2}}; Fo_2 = \frac{a_2 \tau}{\delta_2^2}. \tag{2.71}$$

С учетом этих обозначений выражение (2.68) можно записать в следующем виде:

$$-\frac{\partial}{\partial \left(\frac{r}{\delta_2} \right)} \left[T_2(\bar{r}, Fo_2) \right] = \frac{q_1 \delta_2}{\lambda_2 \cdot t_{R_2}}. \tag{2.72}$$

Отсюда

$$\frac{\partial T_2(\bar{r}, Fo_2)}{\partial \bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = -Ki_1. \tag{2.73}$$

Здесь величина Ki может быть названа модифицированным критерием Кирпичева [53, 120].

В области изображений по Лапласу выражение (2.73) запишется [129]

$$\left. \frac{dT(\bar{r}, s)}{d\bar{r}} \right|_{\bar{r}=0} = -\frac{Ki_1}{s}. \quad (2.74)$$

Используя (2.25) применительно ко второму слою, определяется производная при $\bar{r}=0$:

$$\left. \frac{d}{d\bar{r}} [T_2(\bar{r}, s)] \right|_{\bar{r}=0} = A \cdot \sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s\bar{r}}) \Big|_{\bar{r}=0} + B \cdot \sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s\bar{r}}) \Big|_{\bar{r}=0}. \quad (2.75)$$

Отсюда

$$-\frac{Ki_1}{s \cdot \sqrt{s}} = A \cdot sh(0) + B \cdot ch(0). \quad (2.76)$$

Это условие выполняется только при

$$B = -\frac{Ki_1}{s\sqrt{s}}. \quad (2.77)$$

С использованием условия (2.68) можно записать:

$$0 = A \cdot ch\sqrt{s} + \left(-\frac{Ki_1}{s\sqrt{s}} \right) sh\sqrt{s} - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi. \quad (2.78)$$

Отсюда получается выражение для определения A:

$$A = \frac{1}{ch\sqrt{s}} \left\{ \frac{Ki_1}{s\sqrt{s}} sh\sqrt{s} + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi \right\}. \quad (2.79)$$

И тогда общее решение в изображениях преобразования Лапласа:

$$T_2(\bar{r}, s) = \frac{ch(\sqrt{s\bar{r}})}{ch\sqrt{s}} \left\{ \frac{Ki_1}{s\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi \right\} - \left(\frac{Ki_1}{s\sqrt{s}} \right) \cdot sh(\sqrt{s\bar{r}}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} T_{2,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{r}-\xi) d\xi. \quad (2.80)$$

Для данного случая характеристическое уравнение примет вид [129]:

$$\cos \mu_n = 0 \rightarrow \mu_n = \frac{\pi}{2}(2n-1) \quad (2.81)$$

Следует отметить, что последнее слагаемое в (2.80) не учитывается, т.к. при умножении на $ch\sqrt{s}$ числителя и знаменателя оно обращается в ноль.

В результате преобразования (2.80), раскрывая скобки и группируя подобные члены, получено:

$$\begin{aligned}
T_2(\bar{r}, s) &= Ki_1 \frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}r)}{s\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} - Ki_1 \frac{sh(\sqrt{s}r)}{s\sqrt{s}} + \frac{ch(\sqrt{s}r)}{ch\sqrt{s}} \times \\
&\times \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) [sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\xi) - ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}\xi)] d\xi = \\
&= Ki_1 \frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}r) - ch\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s}r)}{s\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} + \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \left[\frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}r) \cdot ch(\sqrt{s}\xi)}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \right] d\xi.
\end{aligned} \tag{2.82}$$

Числитель и знаменатель первого слагаемого можно обозначить соответственно $\phi_1(s)$ и $\psi_1(s)$. Тогда, в соответствии с формулами преобразования гиперболических функций, можно записать

$$\phi_1(s) = sh\sqrt{s}(1-\bar{r}). \tag{2.83}$$

В результате дифференцирования знаменателя по s получено:

$$\begin{aligned}
\psi_1'(s) &= s' \cdot \sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s} + s(\sqrt{s})' \cdot ch\sqrt{s} + s\sqrt{s}(ch\sqrt{s})' = \\
&= \sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s} + s \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot ch\sqrt{s} + s\sqrt{s} \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} sh\sqrt{s} = \\
&= \frac{1}{2\sqrt{s}} [(2s+s)ch\sqrt{s} + s\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}].
\end{aligned} \tag{2.84}$$

Отсюда

$$\frac{\phi_1(s)}{\psi_1'(s)} = \frac{2\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}(1-\bar{r})}{3s \cdot ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s} \cdot s}. \tag{2.85}$$

При переходе от гиперболических функций к тригонометрическим выражение (2.85) приобретает следующий вид:

$$\frac{\phi_1(i\sqrt{s})}{\psi_1'(i\sqrt{s})} = \frac{2\sqrt{s} \left\{ \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \cdot \cos(i\sqrt{s}r) - \cos(i\sqrt{s}) \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}r) \right\}}{3s \cdot \cos(i\sqrt{s}) + s \cdot \sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \cdot \sin(i\sqrt{s})}. \tag{2.86}$$

Поскольку характеристическое уравнение обращает в ноль слагаемые s $\cos(i\sqrt{s})$, можно записать:

$$\frac{\phi_1(i\sqrt{s})}{\psi_1'(i\sqrt{s})} = \frac{2\sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \cdot \cos(i\sqrt{s}r)}{s \cdot \sqrt{s} \cdot \sin(i\sqrt{s}) \cdot \frac{1}{i}} = \frac{2 \cos(i\sqrt{s}r)}{s}. \tag{2.87}$$

При умножении на i^2 и переходе в область оригиналов

$$L^{-1} \left[\frac{i^2 \phi_1(i\sqrt{s_n})}{i^2 \psi_1'(i\sqrt{s_n})} \right] = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{0,2}). \quad (2.88)$$

Или, учитывая (2.76), следует записать:

$$L^{-1} \left[\frac{\phi_1(\mu_n)}{\psi_1'(\mu_n)} \right] = -\frac{8Ki_1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{r} \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 F_{0,2} \right]. \quad (2.89)$$

Далее можно приступить к поиску нулевого корня. Обращаясь к выражению (2.82), и прежде всего, к первому слагаемому правой части:

$$\phi(s) = sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{sr}) - ch\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{sr}. \quad (2.90)$$

Затем выполняется разложение по степеням \sqrt{s} :

$$\begin{aligned} \phi(s) &= \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{(\sqrt{sr})^2}{2!} + \dots \right] - \\ &- \left[1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[\sqrt{sr} + \frac{(\sqrt{sr})^3}{3!} + \dots \right] = \\ &= \sqrt{s} \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot (\sqrt{s}) \cdot \left[\bar{r} + \frac{sr^{-3}}{3!} + \dots \right]. \end{aligned} \quad (2.91)$$

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

$$\frac{\phi(s)}{\sqrt{s}} = \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] - \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot \left[\bar{r} + \frac{sr^{-3}}{3!} + \dots \right]. \quad (2.92)$$

И тогда

$$\left[\frac{\phi(s)}{\sqrt{s}} \right]_{s=0} = 1 \cdot 1 - 1 \cdot \bar{r} = (1 - \bar{r}). \quad (2.93)$$

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

$$\frac{\psi(s)}{\sqrt{s}} = s \cdot ch\sqrt{s} = s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]. \quad (2.94)$$

После дифференцирования по s

$$\left. \frac{d}{ds} \left[\frac{\psi(s)}{\sqrt{s}} \right] \right|_{s=0} = s' \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] + s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] = 1. \quad (2.95)$$

Итак, нулевое слагаемое будет иметь следующий вид:

$$L^{-1} \left[\frac{\phi(0)}{\psi'(0)} \right] = Ki_1(1-\bar{r}). \quad (2.96)$$

Далее рассматривается второе слагаемое (2.82) на предмет нулевого корня и соответственно для числителя и знаменателя:

$$\phi_2(s) = \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\xi^2}{2!} \right] = \quad (2.97)$$

$$= \sqrt{s} \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\xi^2}{2!} + \dots \right].$$

$$\psi_2(s) = \sqrt{s} \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]. \quad (2.98)$$

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

$$\left. \frac{\phi_2(s)}{\sqrt{s}} \right|_{s=0} = \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{sr^{-2}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\xi^2}{2!} + \dots \right]_{s=0} = 1, \quad (2.99)$$

$$\left. \frac{d}{ds} \left[\frac{\psi'(s)}{\sqrt{s}} \right] \right|_{s=0} = \left[1 + \frac{s}{2!} + \frac{s^2}{4!} + \dots \right]'_{s=0} = \left[\frac{1}{2} + \frac{s}{2!} + \frac{3s^2}{4!} + \dots \right]_{s=0} = \frac{1}{2}. \quad (2.100)$$

Следовательно, для нулевого корня квадратной скобки второго слагаемого (2.82) можно записать

$$[\approx]_{s=0} = 1 : \frac{1}{2} = 2. \quad (2.101)$$

Здесь знаком $[\approx]$ обозначена дробь последнего слагаемого. В результате подстановки получается следующее выражение:

$$L^{-1} \left[\int_0^1 T_{2,0}(\xi) [\approx] d\xi \right]_{s=0} = 2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi. \quad (2.102)$$

В результате преобразования числителя и знаменателя в последнем слагаемом (2.82) по правилам перехода гиперболических функций в тригонометрические получается следующее:

$$\phi_2(s) = \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \cdot \cos(i\sqrt{s}r) \cdot \cos(i\sqrt{s}\xi). \quad (2.103)$$

Отсюда следует:

$$\phi_2(\mu_n) = \frac{1}{i} \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi). \quad (2.104)$$

Производная знаменателя

$$\begin{aligned} \psi_2'(s) &= (\sqrt{s})' \cdot ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot (ch\sqrt{s})' = \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} = \\ &= \frac{1}{2\sqrt{s}} (ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}). \end{aligned} \quad (2.105)$$

Далее, вновь переходя от гиперболических функций к тригонометрическим:

$$\psi'(s_n) = \frac{1}{2\sqrt{s}} \left[\cos(i\sqrt{s}) + \sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \right]. \quad (2.106)$$

Затем определяется соотношение записей (2.104) и (2.106):

$$\begin{aligned} \frac{\phi_2(\mu_n)}{\psi_2'(\mu_n)} &= \frac{\frac{1}{i} \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)}{\frac{1}{2\sqrt{s}} \left[\cos(i\sqrt{s_n}) + \sqrt{s} \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s_n}) \right]} = \\ &= \frac{2\sqrt{s_n} \cdot \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)}{i \left[\cos \mu_n + \sqrt{s_n} \cdot \frac{1}{i} \sin \mu_n \right]}. \end{aligned} \quad (2.107)$$

Числитель и знаменатель умножаются на i :

$$\frac{i\phi_2(\mu_n)}{i\psi_2'(\mu_n)} = \frac{2(i\sqrt{s_n}) \cdot \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)}{i^2 \left[\cos \mu_n + \sqrt{s_n} \frac{1}{i} \sin \mu_n \right]} = \quad (2.108)$$

$$= \frac{2\mu_n \cdot \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)}{\mu_n \cdot \sin \mu_n - \cos \mu_n} = 2 \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi), \quad (2.109)$$

т.к. в силу характеристического уравнения (2.81) $\cos \mu_n = 0$

Итак, можно записать окончательное решение краевой задачи (2.66), (2.67), (2.69) и (2.73) в области оригиналов с учетом выражений (2.89), (2.96), (2.104) и (2.109):

$$T(\bar{r}, Fo_2) = Ki(1-\bar{r}) + 2Ki_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin[\mu_n(1-\bar{r}) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo_2)]}{3\mu_n^2 \cdot \cos \mu_n + \mu_n \sin \mu_n} + \quad (2.110)$$

$$+ 2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cdot [\cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \cos(\mu_n \xi)] d\xi \cdot \exp(\mu_n^2 Fo_2).$$

Полученные выражения можно еще более упростить. Во-первых, учитывая характеристическое уравнение, первое слагаемое в знаменателе (2.110) обращается в ноль, а во-вторых:

$$\sin[\mu_n(1-\bar{r})] = \sin \mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{r}) - \cos \mu_n \cdot \sin(\mu_n \bar{r}). \quad (2.111)$$

И вследствие этого:

$$T_2(\bar{r}, Fo_2) = Ki_1(1-\bar{r}) - \frac{8Ki_1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{r}\right] \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo_2\right] + \quad (2.112)$$

$$+ 2 \int_0^1 T_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\mu_n \bar{r}) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo_2) \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi$$

Или, в более удобной записи:

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

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

$$\times \int_0^1 T_{2,0}(\xi) \cos\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\xi\right] d\xi. \quad (2.113)$$

Итак, основные расчетные уравнения – это (2.60) и (2.113). Как и в случае первого слоя вычисления проводятся с использованием указанных соотношений до тех пор, пока не возникнет градиент температуры на границе R_2 . Это уже соответствует моменту времени $\tau = \Delta\tau_2$, что означает завершение второго «микропроцесса», а общая продолжительность процесса теплопередачи составит $\tau_{общ} = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$.

Ниже приводится графическая иллюстрация некоторых результатов расчетов по полученным решениям [101-104, 120, 125].

На рис. 2.9 приведены данные расчетов по выражению (2.60) 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 значении $Fo_1=0,001$ профиль температур распространяется не по всей координате \bar{r} , а только на расстоянии, равном $\bar{r} = 0,15$, а при $Fo_1=0,1$ уже до координаты $\bar{r} = 1,0$.

Кривые на рис. 2.10 иллюстрируют динамику полей температур в древесине во втором «мысленно» выделенном слое (см. рис. 2.8), когда температурный профиль сформируется на весь первый слой и на расстоянии 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 Ki_1 . Расчеты выполнены по формуле (2.113).

Можно отметить неочевидный факт, что в координате $\bar{r} = 0$ угол наклона касательных к кривым имеет одинаковые значения, что соответствует одинаковым значениям критерия Кирпичева, а именно $Ki_1=0,1$.

Следует отметить также и то, что в условиях анализируемого примера при значении теплового числа Фурье, равного $Fo_2=0,001$, тепловой фронт продвинулся на расстояние $\bar{r} = 0,1$ по безразмерной координате, а при $Fo_2=0,1$ (кривая 4) температурная граница достигла значения $\bar{r} = 1,0$ (т.е. физической координаты R_2 , см. рис. 2.8)

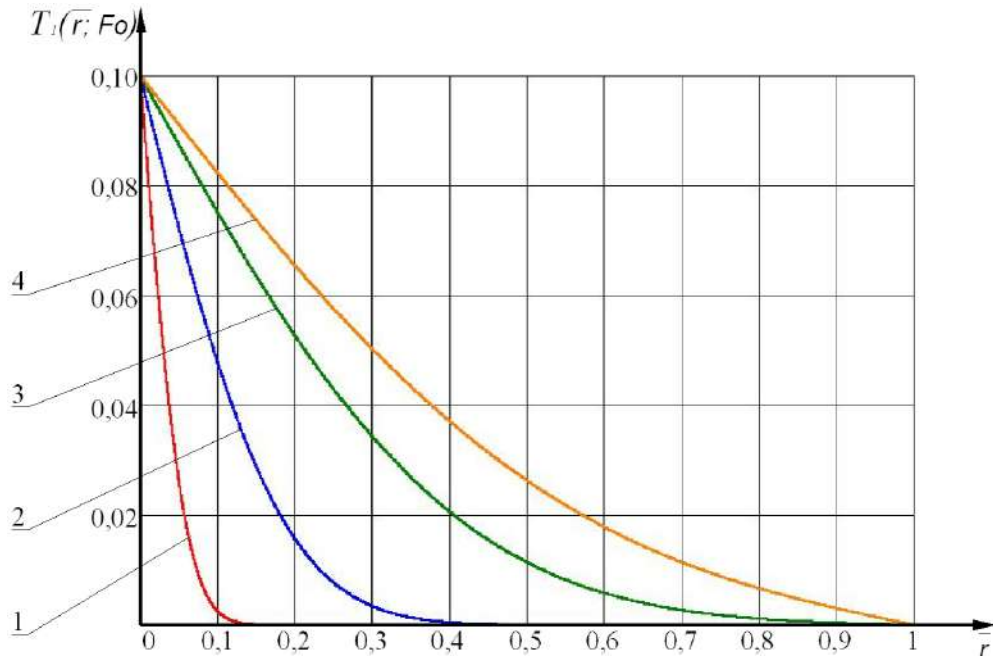


Рисунок 2.9. Иллюстрация расчетов по уравнению (2.60).
Значения числа Фурье Fo_1 : 1) 0,001; 2) 0,01; 3) 0,05; 4) 0,1

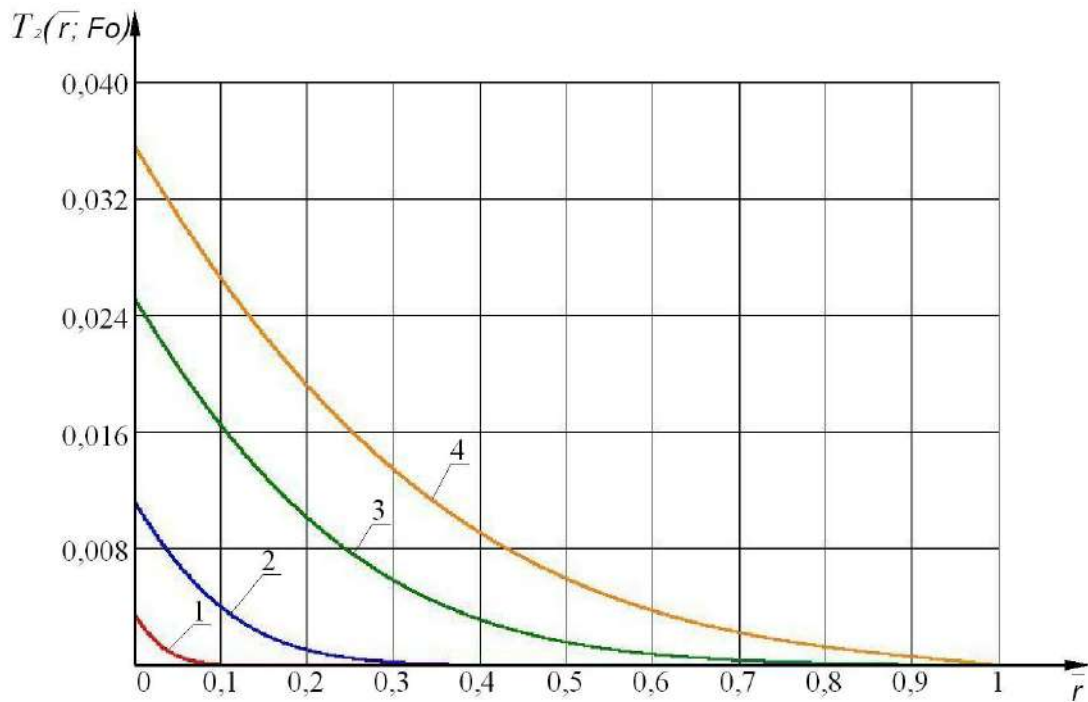


Рисунок 2.10. Профили температур для второго кольца при $K_{i,1}=0,1$.
Значения числа Фурье Fo_2 : 0,001; 2) 0,01; 3) 0,05; 4) 0,1. Расчеты выполнены с помощью формулы (113)

Еще один пример численного расчета, на этот раз в физически размерных величинах, приведен на рис. 2.11.

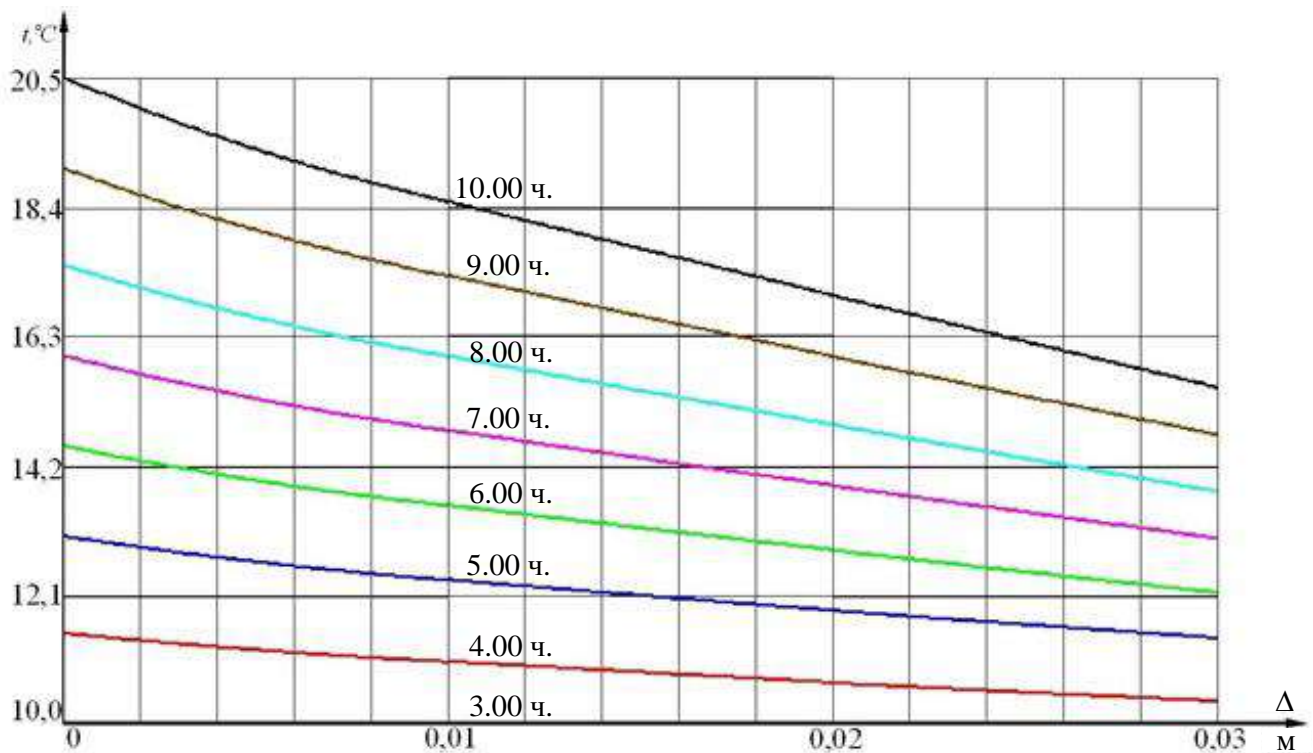


Рисунок 2.11. Результаты расчетов теплопереноса в древесине болтового нагельного соединения в физических переменных во временном интервале с 03.00 до 10.00 ч. (июль 2012 года, Йошкар-Ола): Δ – расстояние от поверхности болта (R_6 – рис. 2.8); $R_6 = 0,008$ м (болт M16); $R_1 = 0,023$ м; $R_2 = 0,038$ м

Эти зависимости (рис. 2.11) получены посредством синтеза и преобразования результатов вида, представленного на рис. 2.9 и рис. 2.10. Расчеты выполнялись для древесины нагельного соединения, выполненного из сосны со следующими теплофизическими характеристиками [131]: плотность $\rho = 550$ кг/м³; теплоемкость $c = 2510$ Дж/(кг·К); теплопроводность $\lambda = 0,17$ Вт/(м·К); при этом температура металла (принята равной температуре окружающей среды) увеличивалась практически по линейному закону со скоростью 1,5 К/ч.

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод, что очевидна качественная адекватность разработанной математической модели тепловых процессов и алгоритма реализации модели реальным физическим явлениям.

Если продолжить выкладки по аналогии с первым и вторым слоем, можно получить расчетные соотношения для третьего и последующих слоев и выполнить последующие вычисления. Полное количество слоев в расчетной

схеме (см. рис. 2.8) и их толщина определяются исходя из особенностей конкретной практической задачи.

2.3. Постановка и решение задачи нестационарного влагопереноса, осложненного капиллярной конденсацией и испарением влаги

Как отмечено в гл. 1 и разд. 2.1, процессы массо(влаго)переноса в древесине нагельных соединений в процессе их эксплуатации нередко имеют большее практическое значение, чем процессы теплопереноса. Например, избыточная влага может явиться причиной биологического разрушения этого материала. По этой причине актуальной задачей является также разработка математической модели процесса влагопереноса в болтовых нагельных соединениях, применение которой позволит обеспечить необходимую надежность и долговечность этих элементов строительных конструкций из древесины.

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 рис. 2.7, как отмечалось, показан процесс охлаждения воздуха на $I-d$ диаграмме Л.К Рамзина [132]. Выше (см. рис. 2.2) были также рассмотрены конкретные зависимости изменения параметров воздушной среды в городах Йошкар-Ола и Иваново во временном интервале с 6.00 17 июля по 12.00 18 июля 2012 года. На основании зависимостей, показанных на рис. 2.2 и рис. 2.7, на рис. 2.12 представлен ход процесса остывания воздуха в г. Йошкар-Оле с 20.00 17 июля до 8.00 18 июля.

В момент времени $\tau_0 = 18.00$ температура воздуха достигла температуры «точки росы» (t_e на рис. 2.7), охлаждение воздуха продолжалось в течение 18-

ти часов (t_c на рис. 2.7), за это время из воздуха сконденсировалось удельное количество влаги, равное [133]

$$\Delta m_{\text{вл.уд.}} = d_B - d_C. \quad (2.114)$$

Отметим еще раз, что, строго говоря, в силу своей физической природы древесина никогда не бывает абсолютно сухой [1, 3, 33, 35, 134]. 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.

С позиций теории тепломассопереноса [21, 33, 43, 49, 106, 135, 136] древесина является типичным коллоидным капиллярно-пористым телом, содержащим влагу макро- и микрокапилляров, а также осмотическую влагу, входящую в ее биологические клетки [49, 136]. 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 Щукарева [133]:

$$\frac{dm_{\text{вл}}}{Fd\tau} = (\pm)\beta[P_H - P_B]. \quad (2.115)$$

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.

Если рассматривать процесс относительно твердого тела, то знак (-) будет соответствовать стадии испарения влаги, а знак (+) – конденсации.

Давление водяного пара связано с влагосодержанием (d) и относительной влажностью воздуха (φ) и определяется выражением вида [3]

$$P_B = \phi \cdot P_H = \frac{d \cdot P_A \cdot M_{cs}}{M_{bn} + d \cdot M_{cs}}, \quad (2.116)$$

где P_A – парциальное давление водяного пара, соответствующее t_A (рис. 2.12); M_{bn} и M_{cs} – молекулярная масса водяного пара и сухого воздуха, соответственно.

И для давления насыщения ($\phi=100\%$) можем использовать выражение [133]:

$$P_H = 617,74 \exp\left(\frac{17,25t_{BM}}{238 + t_{BM}}\right). \quad (2.117)$$

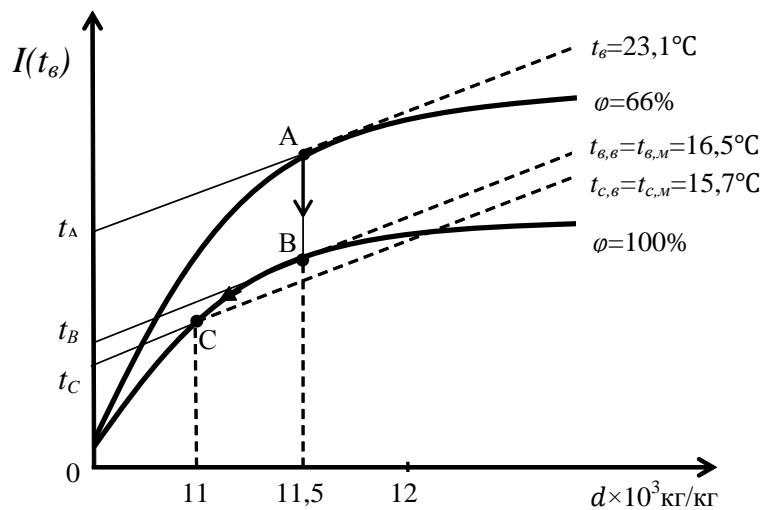


Рисунок 2.12. Иллюстрация процесса охлаждения воздуха на $I-d$ диаграмме: I – энтальпия воздуха, Дж/(кг·К); d – влагосодержание воздуха, кг влаги / кг воздуха

Следовательно, при остывании воздуха от температуры t_e до температуры t_c (рис. 2.12) давление насыщенного водяного пара уменьшится от P_{HB} до P_{HC} , а количество выпавшей капельной влаги определится посредством интегрирования уравнения (2.115) как

$$\Delta m_{вл} = \beta F (P_{HB} - P_{HC}) \Delta \tau_{1-2}. \quad (2.118)$$

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

Известное из теории сушки [43] 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 [49]), и называется свободной влагой. В научных разработках по древесиноведению [1, 3, 49] существует также понятие об эксплуатационной (равновесной) влажности материала. Следует отметить, что по данным разных авторов [1, 3, 49, 53, 106] 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 :

$$W = \frac{m_{\text{ВЛ}}}{m_{\text{ВЛ}} + m_{\text{СУХ}}} 100\%. \quad (2.119)$$

Здесь $m_{\text{ВЛ}}$ – масса влаги в единице объема влажного тела, кг; $m_{\text{СУХ}}$ – масса сухого скелета в этом объеме, кг.

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

$$W_{\text{ОТН}} = \frac{m_{\text{ВЛ}}}{m_{\text{СУХ}}}. \quad (2.120)$$

Соответственно для равновесной ($m_{\text{ВЛ.Р}}$) и максимальной гигроскопической влажности ($m_{\text{ВЛ.МГ}}$) следует записать

$$W_{\text{ОТН}} = \frac{m_{\text{ВЛ.Р}}}{m_{\text{СУХ}}}, \quad W_{\text{ОТН.МГ}} = \frac{m_{\text{ВЛ.МГ}}}{m_{\text{СУХ}}}. \quad (2.121)$$

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:

$$W_{\text{ОТН}} = \frac{m_{\text{ВЛ.МГ}}}{m_{\text{СУХ}}} = \frac{m_{\text{ВЛ}} + m_{\text{ВЛ.Р}}}{m_{\text{СУХ}}} = W_{\text{ОТН}} + W_{\text{ОТН.Р}} = W_{\text{ОТН}} + \frac{m_{\text{ВЛ}}^*}{\rho_{\text{СУХ}} F \delta_{\text{МГ}}}. \quad (2.122)$$

Здесь $m_{вл}^* = m_{вл.р} / m_{сух}$ – относительное значение количества влаги, необходимого до достижения максимального гигроскопического влагосодержания.

Из сопоставления выражений (2.118) и (2.122) можно получить формулу для определения толщины слоя древесины, увлажненного до максимального гигроскопического влагосодержания:

$$\delta_{МГ} = \frac{\beta [P_{НВ} - P_{НС}] \Delta \tau_{1-2}}{\rho_{СВХ} (W_{ОТН.МГ} - W_{ОТН.Р})}. \quad (2.123)$$

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 $W_{ОТН.МГ}$. Ниже приводятся расчетные результаты, характеризующие динамику влагопереноса в древесине для каждого из этих случаев.

В соответствии с принятым в предыдущих разделах [101, 102] методом «микропроцессов» для математического моделирования тепломассопереноса в древесине нагельного соединения в форме болтовой стяжки, как и ранее, выделим вокруг болта кольцевую зону (см. рис. 2.8) размером $\delta_I = R_I - R_\delta < 0,5R_\delta$, для которой кольцевое сечение может считаться неограниченной пластиной. И в этих условиях краевая задача влагопроводности для выделенной зоны, по аналогии с задачей теплопроводности (разд. 2.2) [101], может быть сформулирована следующим образом*:

$$\frac{\partial W_1(r, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \frac{\partial^2 W_1(r, \tau)}{\partial r^2}, \quad \tau > 0; \quad 0 \leq r \leq \delta_1, \quad (2.124)$$

$$W_1(r, \tau) \Big|_{\tau=0} = W_{1.0}, \quad (2.125)$$

$$W_1(r, \tau) \Big|_{r=R_\delta} = W_H, \quad (2.126)$$

$$W_1(r, \tau) \Big|_{r=R_I} = W_P. \quad (2.127)$$

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

Здесь k_1 – коэффициент влагопроводности в выделенной зоне, м²/с; (своеобразный коэффициент диффузии влаги в твердой фазе); W_n – относительная влажность слоя древесины, прилегающего к нагелю, кг влаги/кг сухого; W_p – относительная равновесная влажность древесины, кг влаги/кг сухого, $W_1(r, \tau)$ – абсолютное значение влажности в пределах первого слоя (см. рис. 2.8), являющееся функцией радиуса r и времени τ .

Как и при рассмотрении температурного поля, необходимо использовать безразмерные параметры:

$$U_1(\bar{r}, Fo_m) = \frac{W_1(r, \tau) - W_p}{W_p}; \bar{r} = \frac{r}{R_1 - R_0}; Fo_m = \frac{k_1 \tau}{(R_1 - R_0)^2}; \quad (2.128)$$

В итоге краевая задача (2.124) - (2.127) для первого слоя древесины (см. рис. 2.8) запишется так:

$$\frac{\partial U_1(\bar{r}, Fo_{m,1})}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U_1(\bar{r}, Fo_{m,1})}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_{m,1} > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1. \quad (2.129)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_{m,1}) \Big|_{Fo_{m,1}=0} = U_{1,0}(\bar{r}). \quad (2.130)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_{m,1}) \Big|_{\bar{r}=0} = U_H. \quad (2.131)$$

$$U_1(\bar{r}, Fo_{m,1}) \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (2.132)$$

После перевода в область изображений уравнения (2.129), а также начального (2.130) и граничных условий (2.131) и (2.132) краевая задача в области изображений по Лапласу примет следующий вид:

$$U_1(\bar{r}, s) = A \cdot ch(\sqrt{s} \bar{r}) + B \cdot sh(\sqrt{s} \bar{r}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} U_{1,0}(\xi) \cdot sh \sqrt{s}(\bar{r} - \xi) d\xi. \quad (2.133)$$

$$L[U_{1,0}(\bar{r}, Fo_{m,1})] \Big|_{Fo_{m,1}=0} = U_{1,0}(\xi). \quad (2.134)$$

$$L[U_1(\bar{r}, Fo_{m,1})] \Big|_{\bar{r}=0} = \frac{U_H}{s}. \quad (2.135)$$

$$L[U_1(\bar{r}, Fo_{m,1})] \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (2.136)$$

И вновь, по аналогии с предыдущим разделом, решение краевой задачи (2.133)÷(2.136) необходимо искать методом интегральных преобразований

Лапласа [43, 53, 129]. И тогда, опуская несложные преобразования по определению коэффициентов A и B , в области изображений можно записать:

$$U_1(\bar{r}, s) = \frac{U_H}{S} ch(\sqrt{s}\bar{r}) - \frac{U_H}{S} \cdot \frac{ch\sqrt{s}}{sh\sqrt{s}} \cdot sh(\sqrt{s}\bar{r}) + \frac{sh(\sqrt{s}\bar{r})}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \cdot \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} U_{1,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{r}-\xi) d\xi. \quad (2.137)$$

Запись выражения (2.137) аналогична (2.32), следовательно, возвращение в область оригиналов приводит к записи, аналогичной (2.60):

$$U_1(\bar{r}, Fo_m) = U_H \left[(1-\bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m). \quad (2.138)$$

В момент времени, характеризуемый значением массообменного числа Фурье, при котором кривая влагосодержаний достигнет границы выделенного слоя («кольца» – см. рис. 2.8) радиусом R_I , к рассмотрению подключается второй слой, для которого краевая задача массопроводности сформулируется следующим образом:

$$\frac{\partial U_2(\bar{r}, Fo_{m,2})}{\partial Fo_{m,1}} = \frac{\partial^2 U_2(\bar{r}, Fo_{m,2})}{\partial \bar{r}^2}; \quad Fo_{m,2} > 0; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad \bar{r} = \frac{r}{\delta_2}; \quad (2.139)$$

$$U_2(\bar{r}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = U_{2,0}(\bar{r}); \quad (2.140)$$

$$\frac{\partial^2 U_2(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = -Ki_{m,1}; \quad (2.141)$$

$$U_2(\bar{r}, Fo_m) \Big|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (2.142)$$

Эта краевая задача по своей математической формулировке идентична задаче (2.66)–(2.69). Поэтому и решение данной краевой задачи в области изображений будет идентично (2.80):

$$\begin{aligned}
U_2(\bar{r}, s) = & \cdot \frac{ch(\sqrt{s}\bar{r})}{ch\sqrt{s}} \left\{ \frac{Ki_{m,1}}{s\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 U_{2,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(1-\xi) d\xi \right\} - \\
& - \frac{Ki_{m,1}}{s\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} U_{2,0}(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{r}-\xi) d\xi
\end{aligned} \tag{2.143}$$

Соответственно, после несложных, но громоздких преобразований, аналогичных выкладкам, изложенным в предыдущем параграфе, которые можно опустить, в области оригиналов следует записать:

$$\begin{aligned}
U_2(\bar{r}, Fo_{m,2}) = & Ki_{m,1} \left\{ (1-\bar{r}) - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\bar{r}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2m-1)^2 Fo_{m,2}\right] \right\} + \\
& + 2 \int_0^1 U_{2,0}(\xi) d\xi + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\bar{r}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2m-1)^2 Fo_{m,2}\right] \times \\
& \times \int_0^1 U_{2,0}(\xi) \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\xi\right] d\xi.
\end{aligned} \tag{2.144}$$

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 (2.129)÷(2.132) распространяется на две первые зоны, а задача (2.139)÷(2.142) переходит на третье «кольцо» (зону). В дальнейшем ситуация повторяется с вовлечением в расчет очередного «кольца».

Данный подход дает возможность проследивать динамику полей влагосодержаний в увлажненной древесине нагельного соединения при воздушно-капельной конденсации влаги.

Ниже приведены результаты расчетов по выражениям (2.138) и (2.144), представляющих соответствующие решения 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 –

$W_{\text{отн.мг.}}$

Результаты расчетов по первому механизму представлены на рис. 2.13, а по второму – на рис. 2.14 [101-104, 120, 125]. При этом для большей наглядности увеличенный фрагмент рисунка представлен в верхнем углу на рис. 2.13 для малых Fo_m .

Следует отметить интересный факт: при одинаковых значениях Fo_m точки пересечения с осью абсцисс имеют одинаковые координаты вне зависимости от значений безразмерного влагосодержания в точке контакта поверхности нагеля с древесиной.

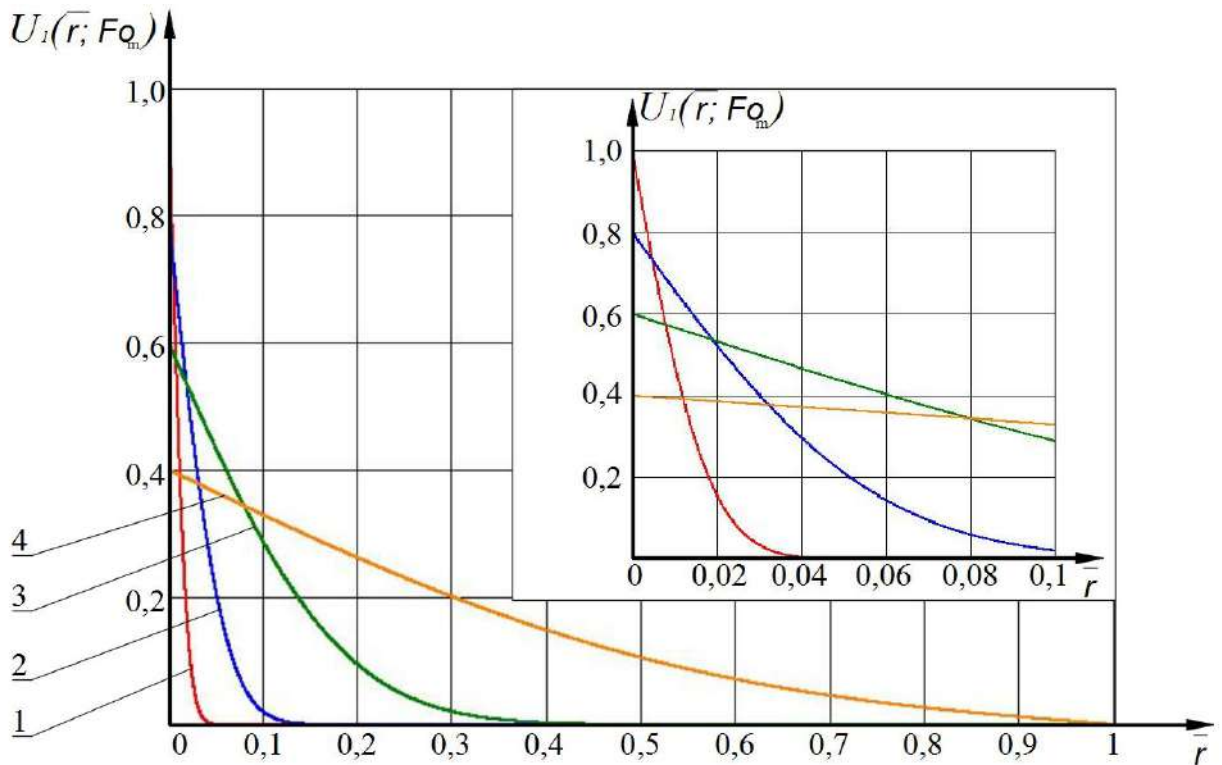


Рисунок 2.13. Динамика полей безразмерных влагосодержаний в древесине при $W_n \leq W_{m2}$. $Fo_m =$ 1) 0,0001; 2) 0,001; 3) 0,01; 4) 0,1

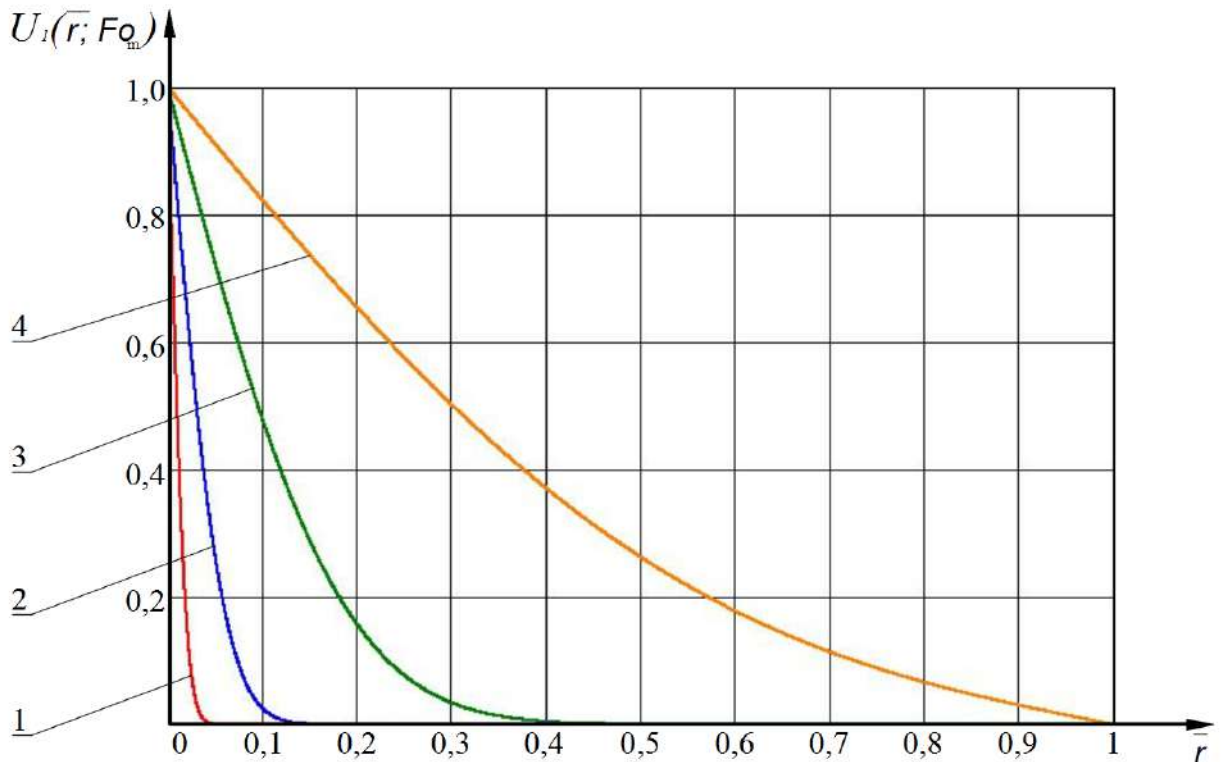


Рисунок 2.14. Динамика полей безразмерных влагосодержаний при $W_n > W_{мг}$.
 $Fo_m = 1) 0,0001; 2) 0,001; 3) 0,01; 4) 0,1$

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

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

2.4. Численная реализация и исследование математической модели взаимосвязанных процессов конденсации, испарения и массопереноса влаги и теплопереноса

В рассмотренных выше разделах диссертации по моделированию тепломассообменных процессов в болтовых 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. В настоящем разделе на базе полученных решений приводится конкретный пример применения разработанных расчетных методик и определены пути практической реализации полученных результатов.

Как уже отмечалось ранее, кинетика конденсации (испарения) влаги определяется соотношением (2.115), а количество влаги, сконденсированной в нагеле за время $\Delta\tau_{1-2}$, определяется выражением (2.118).

При этом для вычисления величины толщины слоя древесины, увлажненного до максимально гигроскопического влагосодержания, было записано выражение (2.123).

Сконденсированная в месте контакта нагеля и древесины влага начинает диффундировать в близлежащие слои древесины. Этот процесс моделируется краевой задачей массопроводности, изложенной выше. Если воспроизвести решение данной задачи в безразмерных переменных, то оно будет описываться следующим выражением, характеризующим динамику профилей влагосодержаний в слоях древесины (2.138) [101-104]:

$$U_1(\bar{r}, Fo_m) = U_H \left[(1 - \bar{r}) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{r}) \cdot \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m). \quad (2.145)$$

Здесь $\bar{r} = \frac{r}{\delta_1}$ – безразмерная координата, отмеряемая от поверхности болта вглубь древесины (см. рис. 2.8); Fo_m , $U(\bar{r}, Fo_m)$ – безразмерные комплексы, определяемые следующими выражениями:

$$Fo_m = k \cdot \tau / (R_1 - R_\sigma)^2; \quad (2.146)$$

$$U(\bar{r}, Fo_m) = [W(r, \tau) - W_p] / W_p. \quad (2.147)$$

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

$$\frac{dm_{BL}(\tau)}{Fd\tau} = k\rho_0 \left. \frac{\partial W_1(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R_6} \quad (2.148)$$

В безразмерном виде это уравнение запишется следующим образом:

$$\frac{dM_{BL}(Fo_m)}{dFo_m} = \left. \frac{\partial U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=0} \quad (2.149)$$

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

$$M_{BL}(Fo_m) = \frac{m_{BL}(\tau)}{F(R_1 - R_6)\rho_0 W_p} \quad (2.150)$$

Для определения явного вида функции $M_{BL}(Fo_m)$ необходимо продифференцировать (2.140) по \bar{r} и найти значение производной при $\bar{r}=0$:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=0} &= -U_H \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + \\ &+ 2\pi \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot \cos(\pi m \bar{r}) \cdot \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m). \end{aligned} \quad (2.151)$$

Подстановка полученного выражения в (2.148) приводит к следующей записи:

$$\begin{aligned} \frac{dM_{BL}(Fo_m)}{dFo_m} &= -U_H \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \right] + \\ &+ 2\pi \sum_{m=1}^{\infty} m \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m). \end{aligned} \quad (2.152)$$

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

$$\begin{aligned} M_{BL}(Fo_m) &= M_{BL}(0) - U_H \left\{ Fo_m + \frac{2}{\pi^2} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} [1 - \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m)] \right\} + \\ &+ \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} [1 - \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m)] \cdot \int_0^1 U_{1,0}(\xi) \cdot \sin(\pi m \xi) d\xi. \end{aligned} \quad (2.153)$$

При этом учтено, что

$$\int_0^{Fo_m} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) = -\frac{1}{\pi^2 m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \Big|_{\bar{r}=0} = \frac{1}{\pi^2 m^2} [1 - \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m)].$$

На рис. 2.15 представлены результаты расчетов по выражению (2.151) [101-104,120,125]. Интересно отметить влияние начального распределения влагосодержаний в древесине на кинетику удаления свободной влаги. Расчеты выполнены для трех возможных случаев:

$$\left. \begin{aligned} U_0(\xi) &= 1 \\ U_0(\xi) &= 1 - \xi \\ U_0(\xi) &= 1 - \xi^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.154)$$

Рис. 2.15 демонстрирует изменение на поверхности древесины нагельного соединения градиента свободной (избыточной) влаги по отношению к максимальной гигроскопической во времени. Наибольшая интенсивность процесса при любом начальном распределении влагосодержаний в древесине происходит при числах $Fo_m < 0,2$.

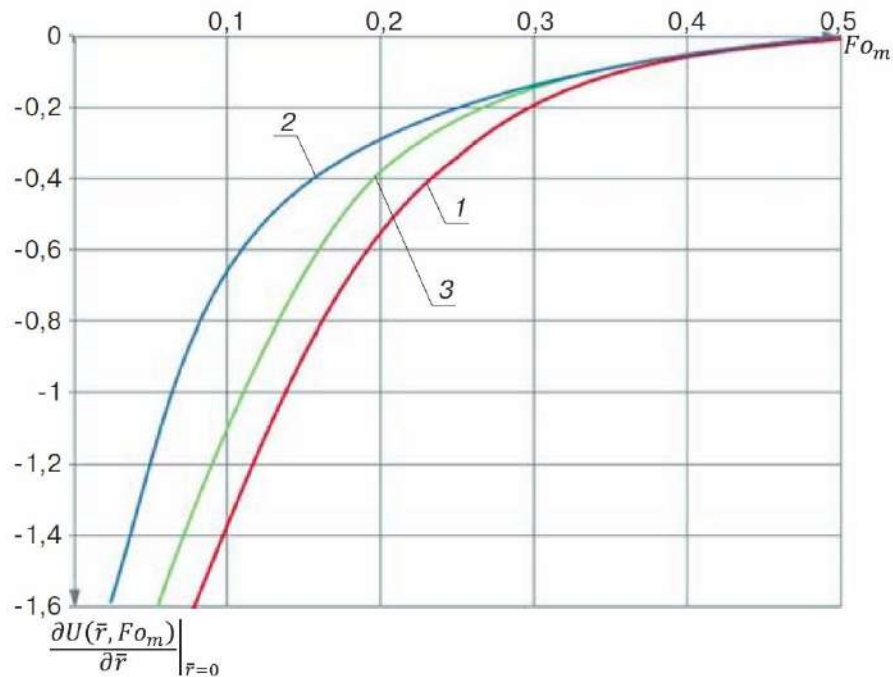


Рисунок 2.15. Изменение безразмерного градиента влагосодержаний в нагеле в зависимости от массообменного критерия Фурье при $U_0(\xi)$: 1) 1; 2) $1 - \xi$; 3) $1 - \xi^2$

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

водяного пара. С этого момента начинается процесс испарения свободной влаги

Кинетика испарения влаги определяется уравнением (2.115), которое в безразмерном виде может быть записано следующим образом:

$$\frac{dM_{BL}(Fo_m)}{dFo_m} = -Sh \cdot K_M K_W \frac{\Delta P(Fo_m)}{T(Fo_m)}. \quad (2.155)$$

Здесь $Sh = \beta \cdot (R_1 - R_0) / k$ – безразмерный комплекс, аналог критерия Шервуда [133], характеризующий соотношение потоков влаги, испаряемой из нагеля, к потоку влаги, проводимой внутри древесины посредством влагопроводности; K_M, K_W – размерные коэффициенты:

$$K_M = \frac{M_{BL}}{R_r} = \frac{18}{8314} = 2,165 \cdot 10^{-3}, (\text{кг} \cdot \text{К}) / \text{Дж}, \quad (2.156)$$

$$K_W = \frac{F(R_1 - R_0)}{m_{BL,0}}, \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (2.157)$$

Интегрирование (2.150) приводит к следующему выражению для описания кинетики удаления избыточной влаги из нагельного соединения:

$$M_{BL}(Fo_m) = M_{BL,0} - Sh \cdot K_M K_W \cdot \int_0^{Fo_m} \frac{\Delta P(Fo_m)}{T(Fo_m)} dFo_m. \quad (2.158)$$

И в заключение следует привести конкретный пример расчета, иллюстрирующий возможности разработанного математического описания процессов тепломассопереноса и предлагаемой методики расчета.

Необходимо вновь обратиться к рис. 2.2, 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 °С до 13 °С сопровождалось выпадением влаги и ее конденсацией на поверхности нагеля.

Соответствующие этим температурам значения парциальных давлений насыщенного водяного пара определяются по формуле [133]

$$P_H = 617,74 \exp\left(\frac{17,25t_{BM}}{238 + t_{BM}}\right). \quad (2.159)$$

Отсюда

$$P_{HB}(16,5) = 1890 \text{ [Па]}; P_{HB}(13) = 1509 \text{ [Па]}. \quad (2.160)$$

Следует предположить в первом приближении, что для коэффициента массоотдачи в газовой фазе в условиях естественной конвекции может быть принято условие [137]

$$Sh = 2 \rightarrow \beta^* = \frac{2D}{R_1 - R_0}. \quad (2.161)$$

Здесь $D = 2 \cdot 10^{-5}$ – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе, м²/с;
 $R_1 - R_0 = 10 \cdot 10^{-3}$ – характерный размер, м.

Перевод к единицам измерений формулы (2.155) осуществляется следующим образом:

$$\beta = \beta^* \cdot \frac{M_{в.п.}}{RT}. \quad (2.162)$$

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

$$\beta = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{18}{8314 \cdot 283} = 3,06 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{кг}}{(\text{м}^2 \text{Па} \cdot \text{с})} \right]. \quad (2.163)$$

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

$$\frac{m_{вл}}{F} = \beta [P_{HB} - P_{HC}] \cdot \Delta \tau_{1-2} = 3,06 \cdot 10^{-8} [1890 - 1509] \cdot 15 \cdot 3600 = 0,63 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right] \quad (2.164)$$

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:

$$m_{BL} = 0,63 \cdot \pi \cdot d \cdot H = 0,63 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 7,91 \cdot 10^{-3} [\text{кг}] \quad (2.165)$$

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

Это значение влажности нормировано [133] и находится в пределах

$$W_p = 0,11 \div 0,22. \quad (2.166)$$

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 (2.123) определяем размер зоны максимального гигроскопического влагосодержания:

$$\delta_{M.G.} = \frac{3,06 \cdot 10^{-8} \cdot 381 \cdot 3600}{550(0,333 - 0,165)} = 0,45 \cdot 10^{-3} [\text{м}]. \quad (2.167)$$

Объем этого слоя будет равен

$$V_{cl} = F \cdot \delta_{M.G.} = \pi \cdot d \cdot H \cdot \delta_{M.G.} = 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} = 5,65 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3]. \quad (2.168)$$

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

$$m_{сух} = V_{cl} \cdot \rho_0 = 5,65 \cdot 10^{-6} \cdot 550 = 3,1 \cdot 10^{-3} [\text{кг}]. \quad (2.169)$$

И

$$m_{вл.p.} = W_p \cdot m_{сух} = 0,165 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} = 0,512 \cdot 10^{-3} [\text{кг}]. \quad (2.170)$$

Определяем общее количество влаги в нагеле, добавляя сконденсированную воду (2.165):

$$m_{вл.общ.} = m_{вл.p.} + m_{BL} = 0,512 \cdot 10^{-3} + 7,91 \cdot 10^{-3} = 8,42 \cdot 10^{-3} [\text{кг}]. \quad (2.171)$$

Общая влажность прилегающего к поверхности металла слоя будет

$$W_{ОГН.ОБЩ} = \frac{8,42 \cdot 10^{-3}}{3,1 \cdot 10^{-3}} = 2,72 [\text{кг} / \text{кг}]. \quad (2.172)$$

Если вновь обратиться к литературным источникам, нетрудно определить [137], что в зависимости от сорта древесины значение максимальной

гигроскопической влажности колеблется в пределах 20-30 %. Как и ранее, следует выбрать среднее значение и выразить его в относительных концентрациях:

$$W_{M.г.} = \frac{0,25}{1-0,25} = 0,333[\text{кг}/\text{кг}]. \quad (2.173)$$

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

Следует продолжить оценку процессов массопереноса, протекающих в нагельном соединении. В соответствии с рис. 2.2 с 12.00 18 июля начинается подъем температуры воздуха, однако его средняя температура в течение последующих 15 часов остается равной 14,5 °С, а относительная влажность $\varphi=84\%$.

Удельное количество влаги, испарившейся из места контакта нагеля и древесины, по аналогии с (2.163) и (2.164) определится как

$$\frac{m_{\text{вл.исп.}}}{F} = 3,06 \cdot 10^{-8} \cdot (1509 - 1397) \cdot 15 \cdot 3600 = 0,185[\text{кг}/\text{м}^2] \quad (2.174)$$

Здесь 1397 – парциальное давление водяного пара в воздухе при $\varphi=84\%$, Па. И тогда физическое количество испарившейся влаги будет

$$m_{\text{вл.исп.}} = 0,185 \cdot 12,56 \cdot 10^{-3} = 2,32[\text{кг}] \quad (2.175)$$

Оставшееся количество влаги в соединении

$$m_{\text{вл.ост.}} = m_{\text{вл.общ.}} - m_{\text{вл.исп.}} = (8,42 - 2,32) \cdot 10^{-3} = 6,1 \cdot 10^{-3}[\text{кг}] \quad (2.176)$$

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

$$W = \frac{m_{\text{вл.ост.}}}{m_{\text{сух}}} = \frac{6,1 \cdot 10^{-3}}{3,1 \cdot 10^{-3}} = 1,97 \gg 0,333[\text{кг}/\text{кг}] \quad (2.177)$$

Следующим этапом определяется количество продиффундированной влаги от поверхности металла в слой древесины. Для этого необходимо обратиться к формулам (2.168) и (2.169). Среднее значение коэффициента

массопроводности можно принять равным [3]: $k_1 = 5,55 \cdot 10^{-10} [м^2 / с]$. Определяем среднее значение массообменного числа Фурье к моменту времени 03.00 19.07.12:

$$Fo_m = \frac{k \cdot \tau}{(R_1 - R_o)^2} = \frac{5,55 \cdot 10^{-10} \cdot 15 \cdot 3600}{(10 \cdot 10^{-3})^2} = 0,3 \quad (2.178)$$

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

$$\left. \frac{\partial U(\bar{r}, Fo_m)}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=0} = -0,1 \quad (2.179)$$

Далее определяется максимальное безразмерное влагосодержание в соответствии с выражением (2.149)

$$M_{BL}(Fo_m)_{Fo_m=0} = \frac{m_{вл.общ}}{F(R_1 - R_o)\rho_0 w_p} = \frac{8,42 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 550 \cdot 0,165} = 0,74 \quad (2.180)$$

С учетом (2.178) и (2.179) из (2.153) можно записать:

$$M_{BL}(Fo_m)_{Fo_m=0,3} = 0,74 - 0,3 \cdot 0,1 = 0,71. \quad (2.181)$$

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

$$m_{вл.н..} = 0,71 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 550 \cdot 0,165 = 8 \cdot 10^{-3} \quad (2.182)$$

Следует обратить внимание на тот факт, что за время второго этапа количество испарившейся влаги более чем на порядок превысило количество влаги, продиффундировавшей от поверхности металла в глубь древесины. При этом оставшееся количество влаги ($8 \cdot 10^{-3} [кг]$) более чем на порядок превышает максимальное гигроскопическое ($0,333 \cdot 10^{-3} [кг]$).

В свою очередь, такое повышение влагосодержания в древесине нагельного соединения неизбежно приводит к появлению грибковых микроорганизмов и последующей биокоррозии.

Нельзя не отметить и еще одно обстоятельство. Приведенные в настоящем разделе диссертации расчеты выполнены для осредненных

значений равновесной влажности ($W_p=16,5$ %) и максимального гигроскопического влагосодержания ($W_{м.г.}=33,3$ %), которые опубликованы в [101-103]. Приведенные в настоящем разделе данные показали, что для исследованного образца из сосны эти параметры несколько отличаются $W_p=6,8$ % и $W_{м.г.}=43,8$ %. Однако, как показали расчеты по приведенной выше методике, эти различия принципиального значения не имеют т.к. и в этом случае в месте контакта оставшееся количество влаги значительно превышает максимальное гигроскопическое.

2.5. Выводы по главе 2

Анализ результатов теоретических разработок, приведенных в настоящей главе, позволяет сделать следующие выводы.

1. Представлена общая методология процесса создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных строительных конструкций из древесины, отличающаяся от известной тем, что в нее добавлены элементы, позволяющие теоретическими методами выполнять изучение процессов тепломассопереноса в нагельных соединениях и учитывать сведения о таких процессах для определения и обеспечения требуемых эксплуатационных показателей строительных конструкций; методология имеет универсальный характер, так как она применима как для создания новых строительных деревянных конструкций, так и для оценки состояния и работоспособности уже эксплуатируемых конструкций; фундаментальной научно-теоретической основой вновь предложенных элементов методологии является современная теория взаимосвязанного тепломассопереноса [43, 53, 54, 100, 105, 106].

2. К числу вновь предложенных элементов методологии относятся математическая модель нестационарных процессов тепловлагодпереноса в древесине болтовых соединений, математическая модель нестационарных процессов тепловлагодпереноса в древесине соединений с применением МЗП и инженерная методика расчета и мониторинга тепломассообменных процессов

в древесине нагельного соединения для определения его эксплуатационных показателей.

3. В настоящее время такие теоретические инструменты отсутствуют, и их создание является актуальной и весьма непростой задачей; был сделан вывод, что для решения этой задачи целесообразно и удобно использовать численно-аналитические методы; в этом случае достигается наиболее простой вид аналитических расчетных выражений, а численный характер вычислений позволяет достаточно просто учесть влияние различных факторов, например, изменение в толще древесины по координате и по времени ее теплофизических показателей; в итоге обеспечивается максимальная универсальность искомых математических моделей.

4. В настоящей главе рассмотрены две математические модели из числа требующих своего создания: численно-аналитическая математическая модель нестационарного теплопереноса в древесине болтового соединения, также численно-аналитическая математическая модель нестационарного влагопереноса в древесине такого соединения, в том числе осложненного капиллярной конденсацией и испарением влаги; важным преимуществом предложенных математических моделей является то, что они позволяют не только определять изменение температуры и влагосодержания в пространстве (в объеме древесины) и во времени, но также определять изменение градиентов температуры и влагосодержания, т.к. в некоторых случаях знание градиентов этих величин может иметь большее практическое значение, чем знание самих этих показателей.

5. Несмотря на некоторую громоздкость полученных расчетных выражений и процедуры вычислений, программирование расчетов в среде Math lab и MATCAD не вызывает серьезных затруднений и доступно широкому кругу пользователей, которые знакомы с этими вычислительными инструментами; результаты апробации полученных математических моделей, также представленные в настоящей главе, качественно полностью соответствуют существующим физическим представлениям о процессах

тепловлагопереноса в древесине, а также характеристикам таких процессов, известным из литературных источников, что позволяет сделать вывод о достоверности предложенных математических моделей.

6. Вычисления в ходе указанной выше апробации математических моделей были выполнены на основании реальных характеристик циклического изменения параметров окружающей среды (температуры, влажности), а их результаты свидетельствуют о значительном влиянии колебаний атмосферных параметров на процессы тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений, вызывая в этом материале циклически изменяющиеся по величине и направлению потоки теплоты и влаги, что неизбежно должно отрицательно сказываться на работоспособности и ресурсе нагельных соединительных узлов строительных деревянных конструкций; это в полной мере подтверждает целесообразность введения в процесс создания новой (или оценки состояния эксплуатируемой) строительной конструкции из древесины этапа всестороннего исследования процессов тепловлагопереноса в нагельных соединениях (см. рис. 2.1), как предложено в настоящей работе.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ДРЕВЕСИНЕ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ В ФОРМЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЛАСТИН (МЗП)

3.1. Физико-математическая постановка задачи взаимосвязанного тепловлагопереноса в системе «древесина – МЗП»

Как уже отмечалось выше, деревянные конструкции покрытия работают в условиях изменяющихся температурно-влажностных параметров воздушной среды эксплуатации. Чередующиеся процессы конденсации влаги на нагеле, диффузия (массоперенос) влаги в прилегающие к нагелю слои древесины, испарение влаги и сушка способны приводить к явлениям образования плесеней и биологической деструкции древесины [127, 138-140].

Выше, в гл. 2, были представлены математические модели процессов переноса теплоты и массы вещества (влаги) в системе «цилиндрический нагель-древесина».

В настоящей главе приводятся постановка и решение задач динамики тепло- и массопереноса в системе двух параллельных пластин, установленных в древесине (см. рис. 1.8÷1.10).

При изучении процесса теплопереноса в такой системе следует учитывать одну важную особенность. Она заключается в том, что зубья МЗП, которые заглубляются в толщу древесины при запрессовке пластин, будут иметь всегда такую же температуру, что и сами пластины, из-за значительно более высокой теплопроводности металла по сравнению древесиной. Это означает, что наряду с тепловыми потоками и температурным полем в объеме деревянной детали в промежутке между двумя пластинами (см. рис. 1.10) аналогичные явления будут иметь место между соседними зубьями в направлении, параллельном поверхности пластин. Совершенно очевидно, что выравнивание температурного поля между соседними зубьями будет происходить заметно

быстрее из-за существенно меньшего расстояния между зубьями по сравнению с расстоянием между пластинами. Одновременно температурное поле между зубьями является одной из составляющих температурного поля в древесине нагельного соединения с МЗП. Поэтому начать изучение такого поля целесообразно с решения задачи по определению нестационарного температурного поля в промежутке между соседними зубьями МЗП.

Схематично элемент, содержащий два соседних зуба МЗП, находящихся в толще древесины рассматриваемой конструкции, показан на рис. 3.1.

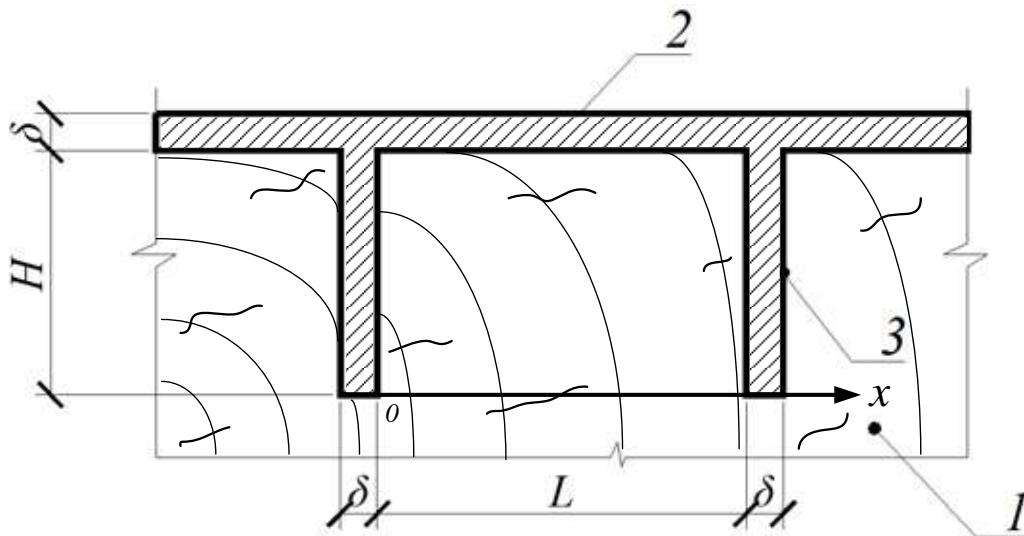


Рисунок 3.1. Модель металлической зубчатой пластины (МЗП) с двумя зубьями: 1 – древесина; 2 – пластина; 3 – зубья; L – расстояние между поверхностями соседних зубьев; H – длина зубьев; δ – толщина МЗП

Следует предположить, что в начальный момент времени температуры нагеля и древесины одинаковы и равны

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_{но} \quad (3.1)$$

При изменении (росте или снижении) температуры воздушной среды вследствие конвективного теплообмена металл нагельного соединения (МЗП) начнет нагреваться (остывать), причем кинетика нагрева может быть охарактеризована зависимостью

$$t_n(\tau) = f_n(\tau). \quad (3.2)$$

Соответственно этому можно предположить, что температура слоя древесины, прилегающего к зубчатой пластине нагеля, будет изменяться в соответствии с этим законом:

$$t(x, \tau)|_{x=0} = f_n(\tau), \quad (3.3)$$

где x – координата от поверхности металла в слое древесины; $x = 0$ – координата зоны контакта.

На основе существующих представлений о процессах в системах, подобных представленной на рис. 3.1, динамику полей температур в рассматриваемом объекте (см. рис. 3.1) можно качественно представить зависимостями параболического вида, как показано на рис. 3.2,а и 3.3,а [53, 105, 106].

В общем случае краевые задачи переноса теплоты и массы вещества могут быть представлены нелинейными неоднородными дифференциальными уравнениями параболического типа в частных производных [53, 105, 106]:

- краевая задача теплопроводности будет иметь вид:

$$\rho(u, t) \cdot c(u, t) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(u, t) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right], \quad (3.4)$$

где $\rho(u, t)$, $c(u, t)$, $\lambda(u, t)$ – теплофизические параметры материала (древесины) (плотность, теплоемкость, теплопроводность), в общем случае зависящие от влагосодержания и температуры;

- начальное условие:

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x); \quad (3.5)$$

- граничные условия:

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

$$\left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0. \quad (3.7)$$

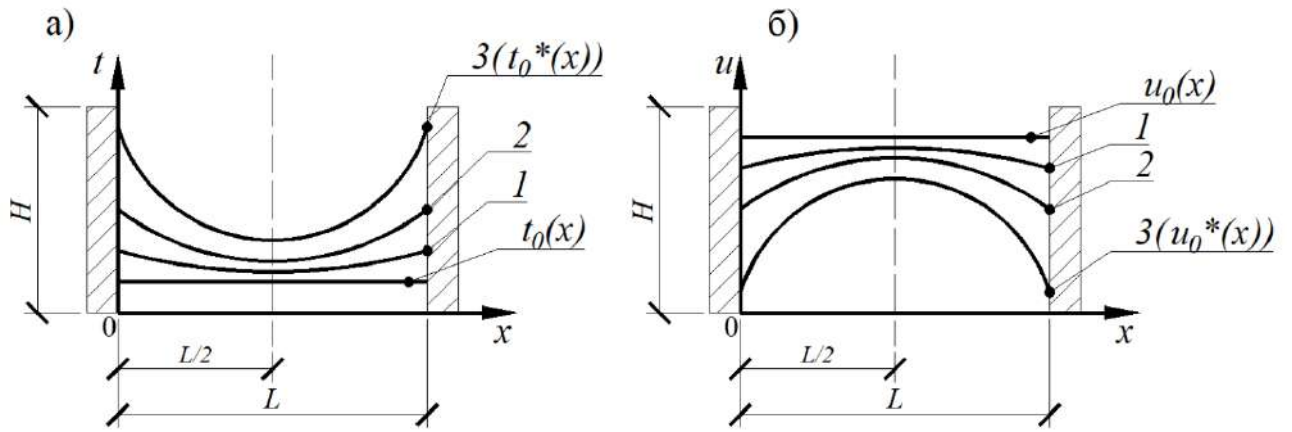


Рисунок 3.2. Иллюстрация к моделям динамики полей температур (а) и влагосодержаний (б) на стадии нагревания нагеля и испарения влаги: $t_0(x)$ – начальное распределение температур; $u_0(x)$ – начальное распределение влагосодержаний; 1 – момент времени τ_1 ; 2 – момент времени τ_2 ; 3 – момент времени τ_3 ; $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

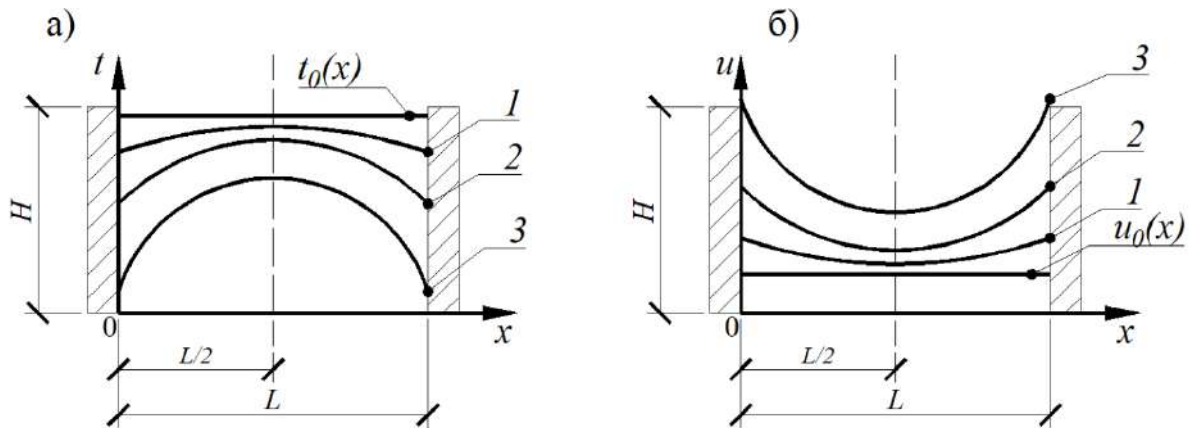


Рисунок 3.3. Иллюстрация к моделям динамики полей температур (а) и влагосодержаний (б) на стадии охлаждения МЗП и конденсации влаги: $t_0(x)$ – начальное распределение температур; $u_0(x)$ – начальное распределение влагосодержаний; 1 – момент времени τ_1 ; 2 – момент времени τ_2 ; 3 – момент времени τ_3 ; $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

Начальное условие (3.5) показывает, что в момент времени, принимаемый за начало отсчета, в слоях древесины имеется произвольное распределение температур по координате, которое должно иметь аналитическое описание.

Граничное условие (3.6), как уже отмечалось, отражает тот факт, что в зоне контакта металла нагельного соединения и древесины, от которой отсчитывается координата x , температуры металла и древесины одинаковы. Условие (3.7) показывает, что задача может рассматриваться как симметричная (см. рис. 3.1).

Обращаем внимание на тот факт, что при работе нагельного соединения при циклически меняющихся параметрах среды эксплуатации конечное распределение температур после завершения стадии нагревания $t_0^*(x)$ принимается в качестве начального распределения для стадии охлаждения. Этот факт иллюстрируется кривыми на рис. 3.4,а.

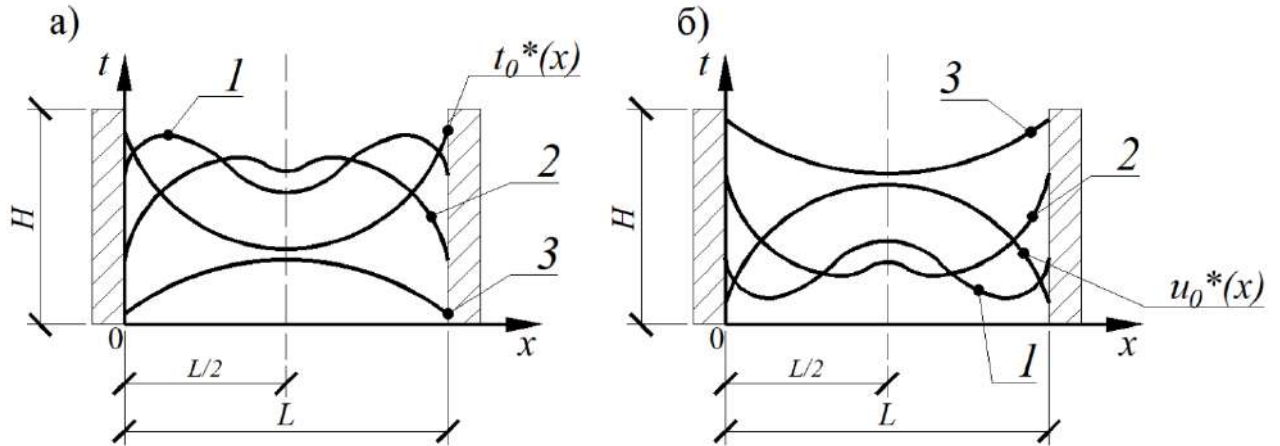


Рисунок 3.4. Иллюстрация к моделям динамики полей температур (а) и влагосодержаний (б) на этапе охлаждения нагеля после нагрева и конденсации влаги после стадии испарения: $t_0^*(x)$ – конечное распределение температур на стадии нагревания нагеля, принимаемое за начальное для стадии охлаждения; $u_0^*(x)$ – конечное распределение влагосодержаний на стадии испарения влаги, принимаемое за начальное для стадии конденсации влаги: 1 – момент времени τ_1 ; 2 – момент времени τ_2 ; 3 – момент времени τ_3 ; $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

Аналогичным образом, краевую задачу влагопроводности можно записать следующим образом:

- краевая задача влагопроводности:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(u, t) \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \right], \quad (3.8)$$

где $k(u, \tau)$ - коэффициент массо(влаго)проводности, в общем случае зависящий от влагосодержания и температуры материала, как это было показано в главе 1;

- начальное условие:

$$u(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = u_0(x); \quad (3.9)$$

- граничные условия:

$$u(x, \tau) \Big|_{x=0} = u_n, \quad (3.10)$$

$$\left. \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0. \quad (3.11)$$

Иллюстрация для динамики полей влагосодержаний обозначена соответствующими линиями параболического вида на рисунках 3.2,б и 3.3,б.

Следует обратить внимание на тот факт, что при работе нагельного соединения в циклически меняющихся условиях среды эксплуатации конечные распределения влагосодержаний после завершения стадии испарения влаги $u_0^*(x)$ принимаются в качестве начального для стадии конденсации. И этот факт иллюстрируется кривыми рисунка 3.4,б.

Следует привести еще одну важную иллюстрацию. Кривые на рис. 3.4 показывают, что кривые изменения температур (а) и влагосодержаний (б) в древесине при циклическом изменении параметров среды эксплуатации могут иметь достаточно сложный вид. Ни один из существующих методов решения краевых задач математической физики не позволяет получить аналитические решения задач тепло- и массопереноса для такого вида начальных условий. И только применение метода «микропроцессов» (зонального метода) дает возможность получить необходимые расчетные выражения (см. гл. 2).

В общем случае решение краевых задач (3.4)-(3.7) и (3.8)-(3.11) современными аналитическими методами математической физики получить не удастся.

Применение метода «микропроцессов» [53, 105, 110] позволяет привести данные краевые задачи к линейным однородным уравнениям с постоянными коэффициентами:

- краевая задача теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0; 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad (3.12)$$

$$t(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = t_0(x), \quad (3.13)$$

$$t(x, \tau) \Big|_{x=0} = t_n, \quad (3.14)$$

$$\left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0; \quad (3.15)$$

- краевая задача влагопроводности:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0; 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad (3.16)$$

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x), \quad (3.17)$$

$$u(x, \tau)|_{x=0} = u_n, \quad (3.18)$$

$$\left. \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0. \quad (3.19)$$

Требуется найти решение сформулированных задач (3.12)÷(3.19), однако это будет лишь первым шагом к получению полной математической модели процессов тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений с МЗП. Действительно, одномерная модель недостаточна для адекватного описания температурных полей и полей в объеме древесины и, как показано ниже, потребуются ее дальнейшее развитие в целях достижения конечного результата.

3.2. Решение одномерной задачи теплопроводности и диффузии влаги (массопроводности) в нагельных соединениях с МЗП

По аналогии с болтовым нагельным соединением (гл. 2) в целях получения решения для случая на рис. 3.1 необходимо ввести безразмерные переменные:

- для задачи теплопроводности:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_n - t_0}; Fo = \frac{a\tau}{(L/2)^2}; \bar{x} = \frac{x}{(L/2)}. \quad (3.20)$$

- для задачи влагопроводности:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u(x, \tau) - u_0}{u_n - u_0}; Fo_m = \frac{k\tau}{(L/2)^2}. \quad (3.21)$$

И тогда задача (3.12) – (3.15) примет вид

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}; Fo > 0; 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad (3.22)$$

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_n - t_0} = T_0(\bar{x}), \quad (3.23)$$

$$T(\bar{x}, Fo) \Big|_{\bar{x}=0} = \frac{t_n - t_0}{t_n - t_0} = 1, \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = 0. \quad (3.25)$$

Соответственно для задачи (3.16) - (3.19) можно записать:

$$\frac{\partial U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}; Fo_m > 0; 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad (3.26)$$

$$U(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = U_0(\bar{x}), \quad (3.27)$$

$$U(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{\bar{x}=0} = 1, \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = 0. \quad (3.29)$$

Необходимо обратить внимание на идентичность систем (3.22) - (3.25) и (3.26) - (3.29). Это обстоятельство весьма ценно, поскольку позволяет, получив решение какой-либо одной краевой задачи, легко представить решение и второй краевой задачи.

Решение краевой задачи теплопроводности следует также выполнить методом интегрального преобразования Лапласа, как это было сделано в гл. 2 [122, 129].

В области изображений по Лапласу решение уравнения (3.22) с учетом начального условия (3.23) имеет вид [129]

$$T(\bar{x}, s) = Ach(\sqrt{s\bar{x}}) + Bsh(\sqrt{s\bar{x}}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} T_0(\xi) sh\sqrt{s(\bar{x}-\xi)} d\xi. \quad (3.30)$$

Граничные условия (3.24) и (3.25) в области изображений по Лапласу запишутся так:

$$T(\bar{x}, s) \Big|_{\bar{x}=0} = \frac{1}{s}. \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial T(\bar{x}, s)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = 0. \quad (3.32)$$

При подстановке решения (3.30) в граничное условие (3.31) получается

$$\frac{1}{s} = A \cdot ch(\sqrt{s\bar{x}}) \Big|_{\bar{x}=0} + B \cdot sh(\sqrt{s\bar{x}}) \Big|_{\bar{x}=0} \quad (3.33)$$

Отсюда для константы A следует, что

$$A = \frac{1}{s}. \quad (3.34)$$

После дифференцирования решения (3.30) по \bar{x} с учетом (3.34) можно записать

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(\bar{x}, s)}{\partial \bar{x}} &= \frac{1}{s} \sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s\bar{x}}) + B \sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s\bar{x}}) - \\ &- \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} T_0(\xi) \cdot \sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}(\bar{x} - \xi) d\xi. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Отсюда для константы B получено

$$B = \frac{1}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \left[-\frac{1}{\sqrt{s}} sh\sqrt{s} + \int_0^1 T_0(\xi) ch\sqrt{s}(1 - \xi) d\xi \right]. \quad (3.36)$$

Подставляя (3.34) и (3.36) в выражение (3.30), получаем окончательное решение задачи теплопроводности в области изображений:

$$\begin{aligned} T(\bar{x}, s) &= \frac{1}{s} \cdot ch(\sqrt{s\bar{x}}) + \frac{sh(\sqrt{s\bar{x}})}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \left[-\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot sh\sqrt{s} + \int_0^1 T_0(\xi) ch\sqrt{s}(1 - \xi) d\xi \right] - \\ &- \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} T_0(\xi) sh\sqrt{s}(\bar{x} - \xi) d\xi. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Преобразуя выражение (3.37) к более удобному виду, раскрывая квадратные скобки и группируя подобные члены, имеем

$$T(\bar{x}, s) = \frac{ch(\sqrt{s\bar{x}}) \cdot ch\sqrt{s} - sh(\sqrt{s\bar{x}}) \cdot sh\sqrt{s}}{s \cdot ch\sqrt{s}} + \frac{sh(\sqrt{s\bar{x}})}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \int_0^1 T_0(\xi) ch\sqrt{s}(1-\xi) d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} T_0(\xi) \cdot sh\sqrt{s}(\bar{x}-\xi) d\xi. \quad (3.38)$$

В соответствии со второй теоремой разложения [129], переход из области изображений в оригиналы осуществляется для каждого слагаемого (3.38):

$$T(\bar{x}, Fo) = L^{-1}[T(\bar{x}, s)] = \frac{\phi(s_n)}{\psi'(s_n)} \Big|_{s_n=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi(s_n)}{\psi'(s_n)} \exp(s_n Fo). \quad (3.39)$$

Характеристическое уравнение для поиска множества корней имеет вид

$$ch\sqrt{s_n} = 0 \rightarrow \cos(i\sqrt{s_n}) \rightarrow \cos \mu_n = 0 \rightarrow \rightarrow \mu_n = \frac{\pi}{2}(2n-1). \quad (3.40)$$

В силу этого последнее слагаемое в (3.38) обращается в ноль.

Функцию в числителе первого слагаемого (3.38) можно записать в следующем виде:

$$\phi_1(s_n) = ch(\sqrt{s_n \bar{x}}) \cdot ch\sqrt{s_n} - sh(\sqrt{s_n \bar{x}}) \cdot sh\sqrt{s_n}. \quad (3.41)$$

В силу характеристического уравнения (3.40), для числителя получается

$$\phi_1(s_n) = -sh(\sqrt{s_n \bar{x}}) \cdot sh\sqrt{s_n}. \quad (3.42)$$

Далее производится дифференцирование знаменателя по s :

$$\begin{aligned} \psi_1'(s_n) &= s_n' \cdot ch\sqrt{s_n} + s_n \cdot (ch\sqrt{s_n})' = \\ &= ch\sqrt{s_n} + s_n \cdot \frac{1}{2\sqrt{s_n}} \cdot sh\sqrt{s_n} = \frac{\sqrt{s_n}}{2} sh\sqrt{s_n}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Для того чтобы привести последнее слагаемое (3.38) к виду других слагаемых этого выражения, его необходимо умножить и разделить на $ch\sqrt{s_n}$.

Поскольку характеристическое уравнение имеет вид (3.40), (3.36) $\rightarrow 0$.

Таким образом, для множества корней в соответствии со вторым слагаемым правой части (3.39) запишем:

$$\begin{aligned}
L^{-1} \left[- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot sh(\sqrt{s_n x}) \cdot sh \sqrt{s_n}}{\sqrt{s_n} \cdot sh \sqrt{s_n}} \exp(s_n \cdot Fo) \right] &= \\
&= -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(i \sqrt{s_n x})}{i \sqrt{s_n}} \exp[(i s_n)^2 Fo] = \\
&= -\frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right]. \quad (3.44)
\end{aligned}$$

Далее производится разложение в степенной ряд по степеням s числителя и знаменателя первого слагаемого (3.38):

$$\begin{aligned}
\phi_1(s) &= \left[1 + \frac{(\sqrt{s x})^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \dots \right] - \\
&- \left[\sqrt{s x} + \frac{(\sqrt{s x})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] = \\
&= \left[1 + \frac{s x}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] - \\
&- s \left[\bar{x} + \frac{s x^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s}{3!} + \dots \right]. \quad (3.45)
\end{aligned}$$

При $s=0$ получаем

$$\phi_1(s)|_{s=0} = 1. \quad (3.46)$$

Аналогичным образом, разложение в ряд для знаменателя даёт

$$\psi_1(s) = s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]. \quad (3.47)$$

Дифференцирование по s при $s=0$ даёт

$$\psi_1'(s)|_{s=0} = s' \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] + s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]' \Big|_{s=0} = 1. \quad (3.48)$$

Итак, для нулевого корня получается

$$\frac{\phi_1(0)}{\psi_1'(0)} = 1. \quad (3.49)$$

Второе слагаемое (3.38) можно записать, преобразовав его следующим образом:

$$[\sim 2 \sim] = \int_0^1 T_0(\xi) \left[\frac{sh(\sqrt{s_n x}) \cdot ch\sqrt{s_n} (1-\xi)}{\sqrt{s_n} \cdot ch\sqrt{s_n}} \right] d\xi. \quad (3.50)$$

В результате дальнейшего преобразования с учетом характеристического уравнения и свойств гиперболических функций получено:

$$\begin{aligned} \varphi_2(s_n) &= sh(\sqrt{s_n x}) \cdot [ch\sqrt{s_n} \cdot ch(\sqrt{s_n} \xi) - \\ &- sh\sqrt{s_n} \cdot sh(\sqrt{s_n} \xi)] = -sh\sqrt{s_n} \cdot sh(\sqrt{s_n x}) \cdot sh(\sqrt{s_n} \xi). \end{aligned} \quad (3.51)$$

Определяется производная знаменателя

$$\begin{aligned} \psi_2'(s_n) &= (\sqrt{s_n})' \cdot ch\sqrt{s_n} + \sqrt{s_n} \cdot (ch\sqrt{s_n})' = \\ &= \frac{\sqrt{s_n}}{2\sqrt{s_n}} sh\sqrt{s_n}. \end{aligned} \quad (3.52)$$

Итак, для квадратной скобки (3.50) можно записать

$$\frac{\phi_2(s_n)}{\psi_2'(s_n)} = -2sh(\sqrt{s_n x}) \cdot sh(\sqrt{s_n} \xi). \quad (3.53)$$

Возвращение второго слагаемого в область оригиналов производится с использованием выражения

$$\begin{aligned} L^{-1}[\sim 2 \sim] &= -2 \sum_{n=1}^{\infty} sh(\sqrt{s_n x}) \int_0^1 T_0(\xi) sh(\sqrt{s_n} \xi) d\xi \cdot \\ &\cdot \exp(s_n Fo) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{i} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) x \right] \cdot \\ &\cdot \int_0^1 T_0(\xi) \frac{1}{i} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] = \\ &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) x \right] \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right]. \end{aligned} \quad (3.54)$$

Здесь учтено, что $\frac{1}{i^2} = -1$.

Проверяем наличие нулевого корня, предварительно разлагая числитель (3.50) в ряд по степеням s :

$$\begin{aligned} \varphi_2(s) = & \left[\sqrt{s\bar{x}} + \frac{(\sqrt{s\bar{x}})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \\ & \cdot \left\{ \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s\xi^2}{2!} + \dots \right] - \right. \\ & \left. - \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s})^3}{3!} + \dots \right] \cdot \left[\sqrt{s\xi} + \frac{(\sqrt{s\xi})^3}{3!} + \dots \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Отсюда следует, что $\varphi_2(s)|_{s=0} = 0$, а это означает отсутствие нулевого корня.

Теперь можно записать окончательное решение краевой задачи теплопроводности с учетом выражений (3.49), (3.44) и (3.54):

$$\begin{aligned} T(\bar{x}, Fo) = & 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right]. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Аналогичным образом, решение краевой задачи массопроводности (влагопроводности) (3.26) - (3.29) может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} U(\bar{x}, Fo_m) = & 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_m \right] \\ & + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \int_0^1 U_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_m \right]. \end{aligned} \quad (3.57)$$

Соответствующие результаты расчетов и их анализ приведен в разд. 3.4 настоящей главы.

3.3. Моделирование нестационарных процессов переноса теплоты и влаги при двумерной постановке задачи

На практике при монтаже конструкций с соединениями на МЗП пластины располагают с обеих сторон узлового соединения [106, 116, 141, 142] (см. рис.

3.5, рис. 1.10). При этом острия зубьев не оказывают определяющего влияния на физическую картину динамики полей температур и влагосодержаний. Однако практические реалии требуют внесения ряда изменений в математическую формулировку задачи, а именно необходимость учета явлений переноса субстанции по двум направлениям координат x и y .

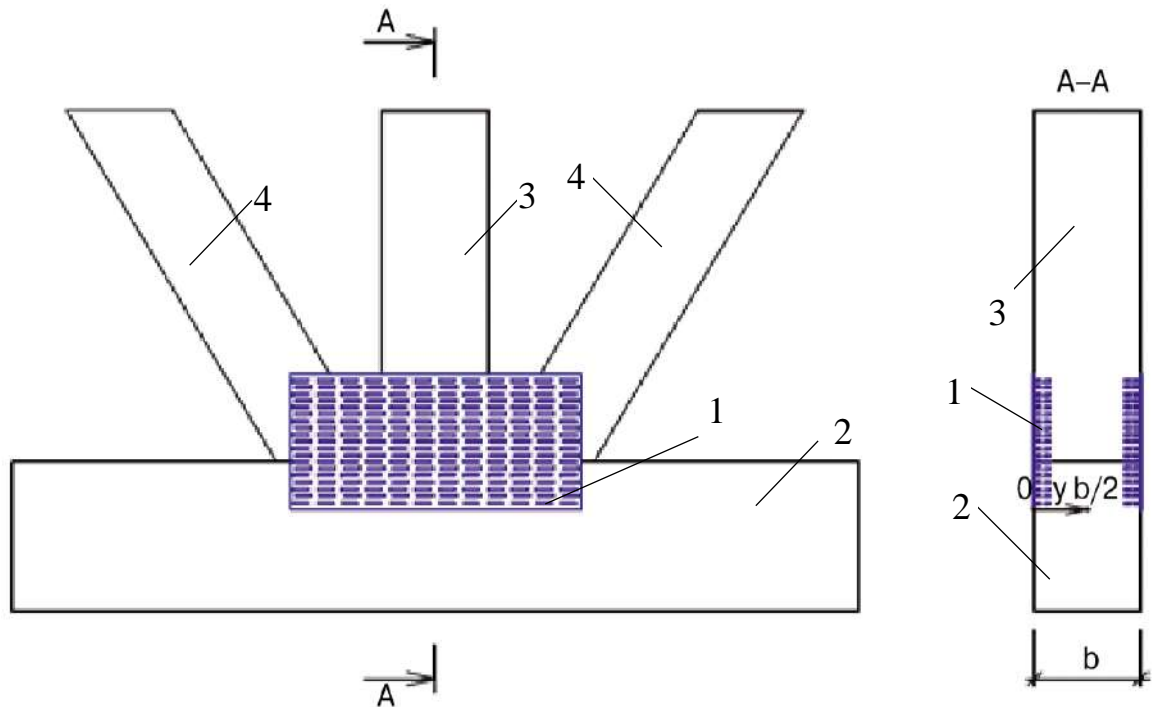
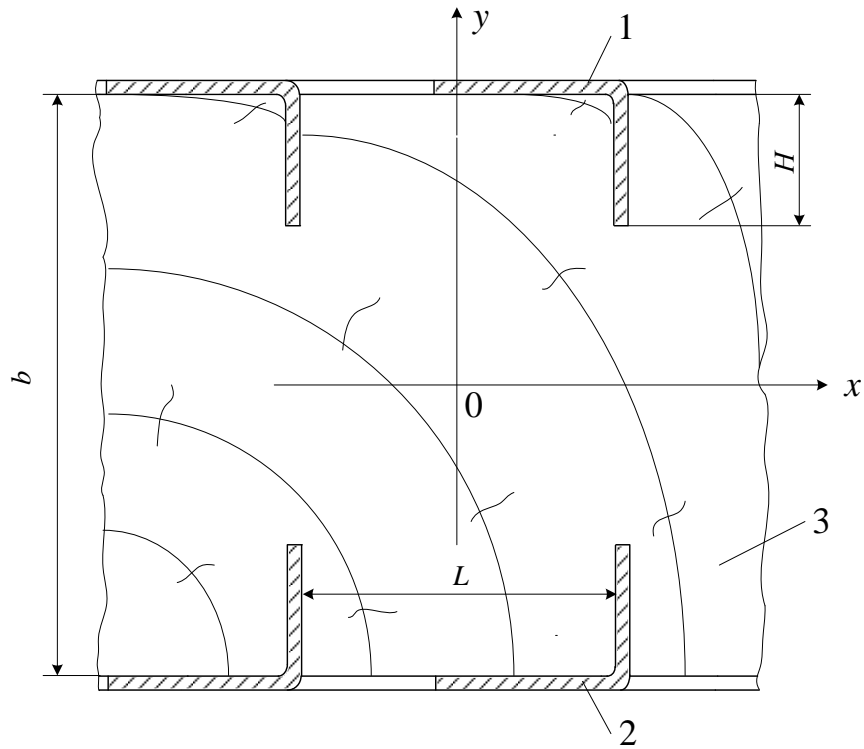


Рисунок 3.5. Симметричное расположение пластин в узле:
1 - металлическая зубчатая пластина; 2 - нижний пояс фермы; 3 - стойка; 4 - раскосы

На рис. 3.6 схематично представлен фрагмент нагельного соединения (а) и иллюстрация предполагаемой динамики полей температур (б) и влагосодержаний (в) в рассматриваемых плоскостях $t-0-x$ и $t-0-y$, а также $u-0-x$ и $u-0-y$.

Можно предположить, что изменения параметров среды эксплуатации (температуры и относительной влажности воздуха) не оказывают существенного влияния на теплофизические характеристики древесины. Кроме того, учитывая определенную инерционность сорбционно-десорбционных процессов, также можно принять, что влажность поверхностных слоёв древесины в начальный момент времени процесса

принимается равномерно распределенной по толщине и равной u_0 (равновесной с начальными параметрами воздуха).



а)

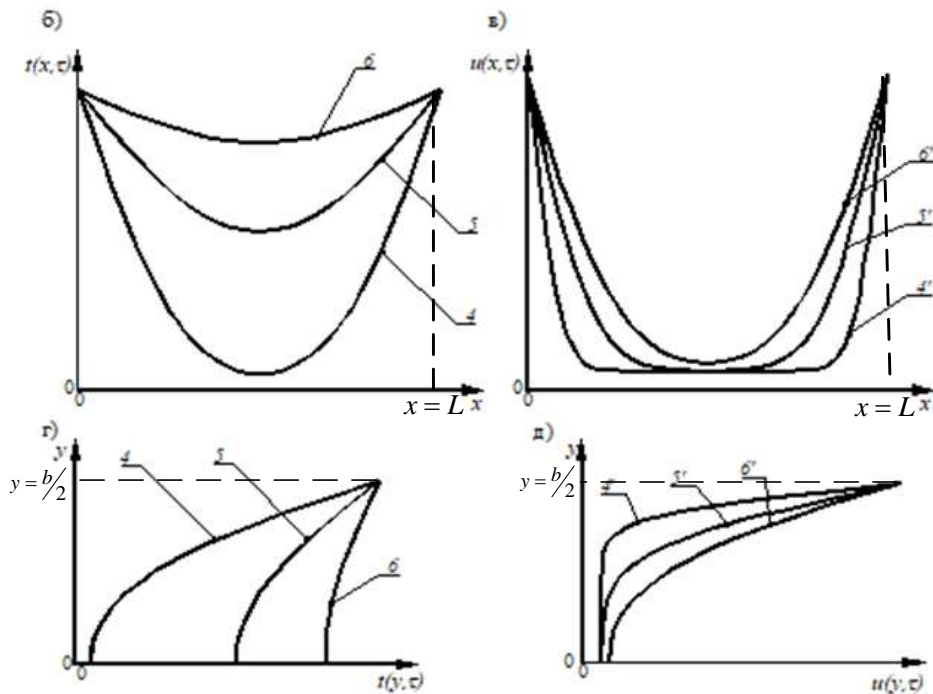


Рисунок 3.6. Фрагмент нагельного соединения с МЗП (а) и иллюстрация к формулировке краевых задач теплопроводности (б, г) и массопроводности (в, д) (диффузии влаги): 1, 2 – встречные МЗП; 3 – древесина; 4(4'), 5(5'), 6(6') – поля безразмерных температур и влагосодержания в различные моменты времени $\tau_4 < \tau_5 < \tau_6$

С учетом принятых допущений краевые задачи тепло- и влагопроводности по оси x остаются в форме выражений (3.12) - (3.19), а для координаты y они приобретают следующий вид [53, 101-104, 126, 142, 143]:

- краевая задача теплопроводности

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial t(y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 t(y, \tau)}{\partial y^2}; \tau > 0; 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad (3.58)$$

$$t(y, \tau)|_{\tau=0} = t_0(y), \quad (3.59)$$

$$\left. \frac{\partial t(y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad (3.60)$$

$$t(y, \tau)|_{y=\frac{b}{2}} = t_{нов} = t_n. \quad (3.61)$$

Здесь b – ширина поперечного сечения деревянного элемента (рис. 3.5);

- краевая задача влагопроводности

$$\frac{\partial u(y, \tau)}{\partial \tau} = k \cdot \frac{\partial^2 u(y, \tau)}{\partial y^2}; \tau > 0; 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad (3.62)$$

$$u(y, \tau)|_{\tau=0} = u_0(y), \quad (3.63)$$

$$\left. \frac{\partial u(y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad (3.64)$$

$$u(y, \tau)|_{y=\frac{b}{2}} = u_p. \quad (3.65)$$

Для данного случая безразмерные переменные аналогично (3.20) и (3.21) запишутся следующим образом:

- для задачи теплопроводности

$$T(\bar{y}, Fo) = \frac{t(y, \tau) - t_0}{t_n - t_0}; Fo = \frac{a \cdot \tau}{(b/2)^2}; \bar{y} = \frac{y}{(b/2)}; \quad (3.66)$$

- для задачи влагопроводности

$$U(\bar{y}, Fo_m) = \frac{u(y, \tau) - u_p}{u_n - u_p}; Fo_m = \frac{k \cdot \tau}{(b/2)^2}; \bar{y} = \frac{y}{(b/2)}. \quad (3.67)$$

С учетом принятых обозначений выражения (3.50) - (3.61) преобразуются к следующему виду:

$$\frac{\partial T(\bar{y}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{y}, Fo)}{\partial \bar{y}^2}; Fo > 0; 0 \leq \bar{y} \leq 1, \quad (3.68)$$

$$T(\bar{y}, Fo) = \frac{t(y, \tau) - t_0}{t_n - t_0} = T_0(\bar{y}), \quad (3.69)$$

$$\left. \frac{\partial T(\bar{y}, Fo)}{\partial \bar{y}} \right|_{\bar{y}=0} = 0, \quad (3.70)$$

$$T(\bar{y}, Fo) \Big|_{\bar{y}=1} = 1. \quad (3.71)$$

Соответственно система уравнений (3.62) - (3.65) в безразмерном виде представится следующим образом:

$$\frac{\partial U(\bar{y}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U(\bar{y}, Fo_m)}{\partial \bar{y}^2}; Fo_m > 0; 0 \leq \bar{y} \leq 1, \quad (3.72)$$

$$U(\bar{y}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = U_0(\bar{y}), \quad (3.73)$$

$$\left. \frac{\partial U(\bar{y}, Fo_m)}{\partial \bar{y}} \right|_{\bar{y}=0} = 0, \quad (3.74)$$

$$U(\bar{y}, Fo_m) \Big|_{\bar{y}=1} = 1. \quad (3.75)$$

И вновь следует обратить внимание на идентичность формы записи краевых задач (3.68) - (3.71) и (3.72) - (3.75).

Далее можно продолжить преобразования и, по применявшейся уже в гл. 2 процедуре, следует записать решение уравнения (3.68) в области изображений по Лапласу с учетом начального условия (3.69):

$$T(\bar{y}, s) = Ach(\sqrt{s\bar{y}}) + Bsh(\sqrt{s\bar{y}}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{y}} T_0(\hat{\xi}) sh\sqrt{s(\bar{y} - \hat{\xi})} d\xi. \quad (3.76)$$

Здесь $\hat{\xi}$ - координата в диапазоне $0 \dots \bar{y}$.

Граничные условия (3.70) и (3.71) в области изображений по Лапласу запишутся так:

$$L \left[\frac{\partial T(\bar{y}, s)}{\partial \bar{y}} \Big|_{\bar{y}=0} \right] = \frac{dT(\bar{y}, s)}{d\bar{y}} \Big|_{\bar{y}=0} = 0, \quad (3.77)$$

$$L \left[T(\bar{y}, Fo) \Big|_{\bar{y}=1} \right] = T(\bar{y}, s) \Big|_{\bar{y}=1} = \frac{1}{s}. \quad (3.78)$$

Подстановка решения (3.76) в граничное условие (3.77) приводит к результату:

$$A \cdot \sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s\bar{y}}) \Big|_{\bar{y}=0} + B \cdot \sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s\bar{y}}) \Big|_{\bar{y}=0} = 0. \quad (3.79)$$

А из этого результата следует вывод о том, что оно выполняется при условии

$$B = 0. \quad (3.80)$$

После подстановки решения (3.76) с учетом (3.80) в граничное условие (3.78) получено

$$Ach(\sqrt{s\bar{y}}) \Big|_{\bar{y}=1} - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{y}} T_0(\hat{\xi}) sh\sqrt{s(\bar{y} - \hat{\xi})} d\xi = \frac{1}{s} \quad (3.81)$$

Отсюда для константы A можно записать

$$A = \frac{1}{s \cdot ch\sqrt{s}} + \frac{1}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) sh\sqrt{s(1 - \hat{\xi})} d\xi. \quad (3.82)$$

Таким образом, с учетом выражений (3.80) и (3.82) окончательное решение для (3.76) в области изображений будет

$$T(\bar{y}, s) = \frac{ch(\sqrt{s}\bar{y})}{s \cdot ch\sqrt{s}} + \frac{ch(\sqrt{s}\bar{y})}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) sh\sqrt{s} l(\bar{y} - \hat{\xi}) d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{y}} T_0(\hat{\xi}) sh\sqrt{s} (\bar{y} - \hat{\xi}) d\xi. \quad (3.83)$$

Возвращение из области изображений в оригиналы по аналогии с выражением (3.39) следует производить по формуле

$$T(\bar{y}, Fo) = L^{-1} [T(\bar{y}, s)] = \left. \frac{\phi(s_n)}{\psi'(s_n)} \right|_{s_n=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi(s_n)}{\psi'(s_n)} \exp(s_n Fo). \quad (3.84)$$

Характеристическим уравнением для данной краевой задачи будет выражение (3.40).

Для того чтобы еще раз убедиться в возможности осуществления обратного преобразования Лапласа в отношении первого слагаемого в правой части (3.83), следует записать:

$$\varphi_1(s) = ch(\sqrt{s}\bar{y}) = \left[1 + \frac{(\sqrt{s}\bar{y})^2}{2!} + \dots \right] = 1 + \frac{s\bar{y}^2}{2!} + \dots \quad (3.85)$$

$$\psi_1'(s) = s \cdot ch(\sqrt{s}) = s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]. \quad (3.86)$$

Итак, условие второй теоремы разложения выполняются: числитель и знаменатель являются обобщенными полиномами относительно s , при этом производная для знаменателя получается в форме (3.43). И тогда для нулевого корня получено:

$$\varphi_1(s)|_{s=0} = 1, \psi_1(s)|_{s=0} = 1 \Rightarrow \left. \frac{\phi_1(s)}{\psi_1(s)} \right|_{s=0} = 1. \quad (3.87)$$

Отсюда следует, что значение нулевого корня равно единице.

Для определения второго слагаемого, находящегося под знаком суммы, определяются необходимые функции:

$$\phi_1(s_n) = ch(\sqrt{s_n}\bar{y}) \Rightarrow \phi_1(\mu_n) = \cos(i\sqrt{s_n} \cdot \bar{y}) = \cos(\mu_n \bar{y}), \quad (3.88)$$

$$\psi_1'(s_n) = s_n' \cdot ch\sqrt{s_n} + s_n \cdot (ch\sqrt{s_n})' = ch\sqrt{s_n} + s_n \cdot \frac{1}{2\sqrt{s_n}} \cdot sh\sqrt{s_n}. \quad (3.89)$$

$$\begin{aligned}\psi_1'(\mu_n) &= \cos(i\sqrt{s_n}) + \frac{\sqrt{s_n}}{2} \cdot \frac{1}{i} \cdot \sin(i\sqrt{s_n}) = \cos(\mu_n) + \frac{i\sqrt{s_n}}{2} \cdot \frac{1}{i^2} \cdot \sin \mu_n = \\ &= \cos(\mu_n) + \frac{i\sqrt{s_n}}{2} \cdot \frac{1}{i^2} \cdot \sin \mu_n = -\frac{\mu_n}{2} \sin \mu_n.\end{aligned}\quad (3.90)$$

И тогда выражение под знаком суммы (3.81) будет

$$\begin{aligned}\sum_{n=1}^{\infty} -\frac{2\cos(\mu_n \bar{y})}{\mu_n \sin \mu_n} \exp[-\mu_n^2 Fo] &= \\ &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2n-1)\bar{y}\right] \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right].\end{aligned}\quad (3.91)$$

Далее в результате преобразования второго слагаемого, внося предынтегральный сомножитель под знак интеграла, получаем

$$[\sim 2 \sim] = \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \left[\frac{ch(\sqrt{s}y) \cdot sh\sqrt{s}(1-\hat{\xi})}{\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}} \right] d\hat{\xi}. \quad (3.92)$$

Затем производится разложение числителя и знаменателя в квадратной скобке в степенной ряд, чтобы проверить условие соблюдения второй теоремы разложения, необходимое для последующего перевода в область оригиналов:

$$\begin{aligned}\varphi_2(s) &= \left[1 + \frac{(\sqrt{s}y)^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[\sqrt{s} + \frac{(\sqrt{s}(1-\hat{\xi}))^3}{3!} + \dots \right] = \\ &= \sqrt{s} \left[1 + \frac{s y^2}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s(1-\hat{\xi})^3}{3!} + \dots \right]\end{aligned}\quad (3.93)$$

$$\psi_2(s) = \sqrt{s} \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]. \quad (3.94)$$

Очевидно, что функции $\varphi_2(s)$ и $\psi_2(s)$ не являются обобщенными полиномами относительно s , но легко к ним приводятся умножением или делением на \sqrt{s} . Таким образом, условия второй теоремы разложения выполнены.

Производится преобразование числителя в фигурной скобке дроби (3.92) с использованием свойств гиперболических функций:

$$\begin{aligned} ch(\sqrt{s}y) \cdot sh\sqrt{s}(1-\hat{\xi}) &= ch(\sqrt{s}y) \cdot [sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}\hat{\xi}) - sh(\sqrt{s}\hat{\xi}) \cdot ch\sqrt{s}] = \\ &= sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}y) \cdot ch(\sqrt{s}\hat{\xi}) - ch(\sqrt{s}y) \cdot sh(\sqrt{s}\hat{\xi}) \cdot ch\sqrt{s}. \end{aligned} \quad (3.95)$$

Для проведения дальнейшей процедуры поиска нулевого корня выражения (3.94) и (3.95) переписывают, поделив обе части этих выражений на \sqrt{s} :

$$\frac{1}{\sqrt{s}} \Phi_2(s) = \left[1 + \frac{sy^{-2}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s(1-\hat{\xi})^3}{3!} + \dots \right] \quad (3.96)$$

$$\frac{1}{\sqrt{s}} \Psi_2(s) = \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]. \quad (3.97)$$

А при умножении на \sqrt{s} получатся следующие записи:

$$\sqrt{s} \Phi_2(s) = s \left[1 + \frac{sy^{-2}}{2!} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{s(1-\hat{\xi})^3}{3!} + \dots \right] \quad (3.98)$$

$$\sqrt{s} \Psi_2(s) = s \left[1 + \frac{s}{2!} + \dots \right]. \quad (3.99)$$

Еще одним из условий второй теоремы разложения является то, что полином в знаменателе не должен содержать постоянной величины. Из формулы (3.97) следует, что в данном случае условие второй теоремы разложения не выполняется, т.к. в полиноме присутствует постоянное слагаемое – «1». В выражении (3.99) такое слагаемое отсутствует, поскольку вся скобка умножается на s . Но в таком случае выражение (3.98) обращается в ноль при $s = 0$. Следовательно, нулевой корень в данном случае будет отсутствовать.

Продолжая анализ далее, определяем производную в знаменателе дроби (3.92):

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} [\sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}] &= \frac{d\sqrt{s}}{ds} ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \frac{d(ch\sqrt{s})}{ds} = \frac{1}{2\sqrt{s}} ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \frac{1}{2\sqrt{s}} sh\sqrt{s} = \\ &= \frac{1}{2\sqrt{s}} [ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}] \end{aligned} \quad (3.100)$$

Таким образом, для перевода (3.91) в область оригиналов записывается следующая формула, с учетом (3.95) и (3.100):

$$\begin{aligned}
 [\sim 2 \sim] &= \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \left[\frac{sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}y) \cdot ch(\sqrt{s}\hat{\xi}) - ch(\sqrt{s}y) \cdot sh(\sqrt{s}\hat{\xi}) \cdot ch\sqrt{s}}{\frac{1}{2\sqrt{s}} [ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}]} \right] d\hat{\xi} = \\
 &= 2 \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \left\{ \frac{\sqrt{s} [sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}y) \cdot ch(\sqrt{s}\hat{\xi}) - ch(\sqrt{s}y) \cdot sh(\sqrt{s}\hat{\xi}) \cdot ch\sqrt{s}]}{[ch\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}]} \right\} d\hat{\xi}.
 \end{aligned} \tag{3.101}$$

Характеристическим уравнением в данном случае остается уравнение (3.40), из которого следует, что первое слагаемое в знаменателе обращается в ноль, и в ноль же обращается второе слагаемое числителя.

Далее следует записать:

$$[\sim 2 \sim] = 2 \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \left\{ \frac{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s} \cdot ch(\sqrt{s}y) \cdot ch(\sqrt{s}\hat{\xi})}{\sqrt{s} \cdot sh\sqrt{s}} \right\} d\hat{\xi} \tag{3.102}$$

Применяя последовательно:

- а) очередные сокращения в числителе и знаменателе;
- б) перевод гиперболических функций в тригонометрические;
- в) формулу обратного преобразования Лапласа, получено:

$$\begin{aligned}
 L^{-1}[\sim 2 \sim] &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \left\{ \cos(i\sqrt{s}y) \cdot \cos(i\sqrt{s}\hat{\xi}) \right\} d\hat{\xi} \cdot \exp(i^2 s_n Fo) = \\
 &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \left\{ \cos(\mu_n y) \cdot \cos(\mu_n \hat{\xi}) \right\} d\hat{\xi} \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo) = \\
 &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\mu_n y) \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \cos(\mu_n \hat{\xi}) d\hat{\xi} \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo) = \\
 &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1)y \right] \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1)\hat{\xi} \right] d\hat{\xi} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right]
 \end{aligned} \tag{3.103}$$

С учетом (3.87), (3.91) и (3.103) окончательное решение задачи теплопроводности (3.68) - (3.71) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
T(\bar{y}, Fo) = & 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + \\
& + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \hat{\xi} \right] d\hat{\xi} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right].
\end{aligned} \quad (3.104)$$

Аналогичным образом решение краевой задачи теплопроводности (3.72) - (3.75) будет иметь вид

$$\begin{aligned}
U(\bar{y}, Fo_m) = & 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{y} \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_m \right] + \\
& 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{y} \right] \int_0^1 U_0(\hat{\xi}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \hat{\xi} \right] d\hat{\xi} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_m \right].
\end{aligned} \quad (3.105)$$

В соответствии с принципом наложения решений для задач нестационарного теплопереноса [53, 105, 106] решение задач в двумерной постановке возможно представить следующим образом:

$$T(\bar{x}, \bar{y}, Fo) = T(\bar{x}, Fo_x) \cdot T(\bar{y}, Fo_y). \quad (3.106)$$

$$U(\bar{x}, \bar{y}, Fo_m) = U(\bar{x}, Fo_{mx}) \cdot U(\bar{y}, Fo_{my}). \quad (3.107)$$

Подстановка выражений (3.104) и (3.105) в формулы (3.106) и (3.107) приводит к окончательной записи решения краевых задач теплопроводности в двумерной постановке:

$$\begin{aligned}
T(\bar{x}, \bar{y}, Fo_x, Fo_y) = & \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_x \right] + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \times \\ & \times \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_x \right] \end{aligned} \right\} \times \\
& \times \left\{ \begin{aligned} & 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_y \right] + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \hat{\xi} \right] d\hat{\xi} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_y \right] \end{aligned} \right\}.
\end{aligned} \quad (3.108)$$

$$\begin{aligned}
 U(\bar{x}, \bar{y}, Fo_{m,x}, Fo_{m,y}) = & \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_{m,x} \right] + \right. \\
 & \left. + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \int_0^1 U_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \xi \right] d\xi \times \right. \\
 & \left. \times \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_{m,x} \right] \right\} \times \\
 & \times \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{y} \right] \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_{m,y} \right] + \right. \\
 & \left. + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{y} \right] \int_0^1 U_0(\hat{\xi}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \hat{\xi} \right] d\hat{\xi} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_{m,y} \right] \right\}.
 \end{aligned} \quad (3.109)$$

Как было отмечено в гл. 2, кроме значений температуры и влагосодержания необходимо также определять величину градиентов температуры и влагосодержания. Поэтому по аналогии с тем, что было сделано в случае болтового нагельного соединения (гл. 2), и с использованием соотношений (3.108) и (3.109) получены формулы для определения составляющих градиента вдоль различных координатных осей x и y (см. рис. 3.6). Для составляющих градиента температуры вдоль оси x и y соответственно выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \frac{dT}{dx} = \{[1]\}' \cdot \{[2]\} = & \left\{ -2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_x \right] + \right. \\
 & \left. + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \left\langle (2n-1) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_x \right] \right\rangle \cdot \{[2]\}' \right\};
 \end{aligned} \quad (3.110)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dT}{dy} = \{[1]\} \cdot \{[2]\}' = \{[1]\} \cdot & \left\{ -2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{y} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_y \right] + \right. \\
 & \left. + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \left\langle (2n-1) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\hat{\xi}) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \hat{\xi} \right] d\hat{\xi} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo_y \right] \right\rangle \cdot \right\}.
 \end{aligned} \quad (3.111)$$

Для определения составляющих градиента влагосодержания получены следующие соотношения:

$$\frac{dU}{d\bar{x}} = \{[1]\}' \cdot \{[2]\} = \left\{ -2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_{m,x} \right] + \right. \\ \left. + \pi \sum_{m=1}^{\infty} \left((2m-1) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 U_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_{m,x} \right] \right) \right\} \cdot \{[2]\}' \quad (3.112)$$

$$\frac{dU}{d\bar{y}} = \{[1]\} \cdot \{[2]\}' = \{[1]\} \cdot \left\{ -2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{y} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_{m,y} \right] + \right. \\ \left. + \pi \sum_{m=1}^{\infty} \left((2m-1) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 U_0(\hat{\xi}) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2m-1) \hat{\xi} \right] d\hat{\xi} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2m-1)^2 Fo_{m,y} \right] \right) \right\} \quad (3.113)$$

Представленные формулы (3.56), (3.57), (3.104), (3.105), (3.108)÷(3.113) составляют полный набор инструментов для определения параметров нестационарных полей температуры и влагосодержания в любой точке объема древесины нагельного соединения с МЗП (см. рис. 3.5, 3.6) и в любой момент времени [101-104, 126, 140, 142, 143].

3.4. Проведение и анализ результатов численного эксперимента с помощью предложенной математической модели

В качестве примера некоторые результаты расчетов по формуле (3.56) приведены на рис. 3.7 [125, 126]. Для большей наглядности расчеты выполнены для случая равномерного начального распределения температур в древесине:

$$T_0(\bar{x}) = T(\bar{x}, Fo) \Big|_{Fo=0} = 0 \quad (3.114)$$

Кривые на рис. 3.7 иллюстрируют динамику полей безразмерных температур в пространстве между двумя зубьями (в соответствии с рис. 3.6 значение координат $\bar{x} = -1$ установлено у плоскости левого зуба, а $\bar{x} = 1$ – плоскость правого зуба).

Интересно отметить то, как идет симметричный прогрев древесины: до достижения тепловым критерием Фурье значения порядка 0,15 между зубьями существует постепенно сужающаяся зона с сохраняющейся начальной температурой древесины. Затем температурные кривые соединяются и при $Fo \geq 1,0$ зона между зубьями оказывается практически вся равномерно прогретой.

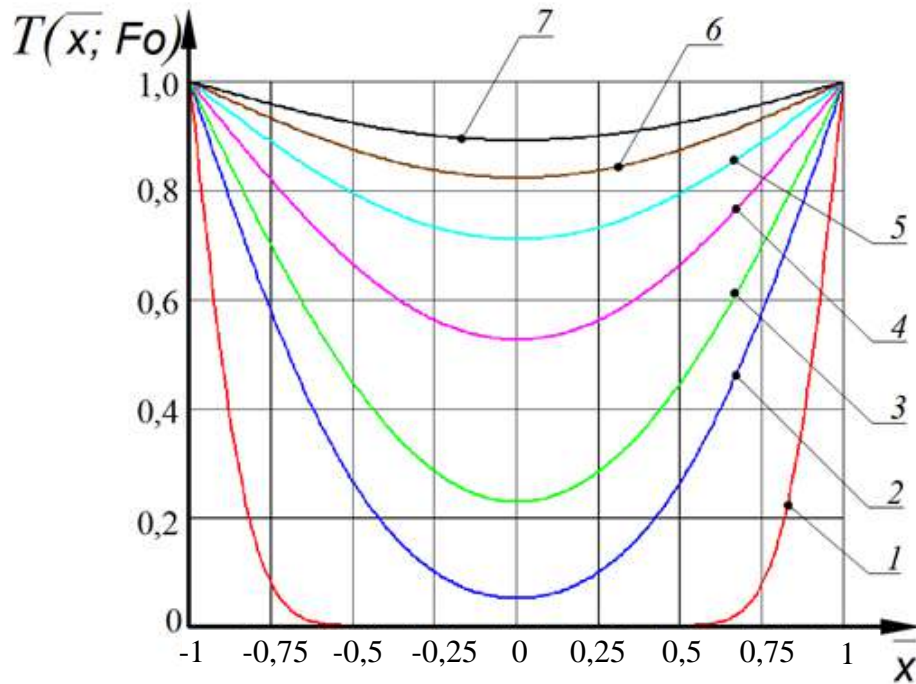


Рисунок 3.7. Изменение безразмерных температур в пространстве между двумя зубьями нагеля при $Fo = 1) 0,01; 2) 0,1; 3) 0,2; 4) 0,4; 5) 0,6; 6) 0,8; 7) 1$

Если в качестве примера для материала выбрать желтую сосну, для которой значение коэффициента температуропроводности можно принять равным $a = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, а расстояние между зубьями $L = 20 \text{ мм}$, то температурные кривые в центре (расстояние между зубьями $L/2$) сойдутся через время, равное

$$\tau = \frac{Fo(L/2)^2}{a} = \frac{0,15 \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2}{8,2 \cdot 10^{-8}} = 183[\text{с}] \approx 3[\text{мин}]. \quad (3.115)$$

И в этом случае для практически полного прогрева потребуется время

$$\tau = \frac{1,0 \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2}{8,2 \cdot 10^{-8}} = 1220[\text{с}] \approx 20[\text{мин}]. \quad (3.116)$$

Отметим еще один важный момент. Как известно [106], мерой соотношения процессов диффузионного и теплового переноса является критерий Лыкова:

$$L_u = \frac{k}{a} = \frac{Fo_m}{Fo} \quad (3.117)$$

Это говорит об общности подхода к расчету как безразмерных, так и физически размерных температур и влагосодержаний в древесине нагельного соединения в процессах циклического изменения температуры и влажности среды эксплуатации деревянной строительной конструкции.

В соответствии с методологией, изложенной в гл. 2, это позволяет определить количество конденсирующейся на поверхности МЗП влаги на стадии охлаждения воздушной среды, рассчитать количество испаряемой влаги на последующей затем стадии подъема температуры, а также определить количество влаги, продиффундировавшей в древесину и ставшей потенциально опасной с точки зрения последующего развития процессов биохимической коррозии древесины и, как следствие, потери эксплуатационной прочности конструкции.

В качестве примера, иллюстрирующего наглядность полученных решений, некоторые результаты расчетов по выражению (3.57) показаны на рис. 3.8 в виде безразмерных влагосодержаний, расположенных в безразмерном координатном пространстве $-1 < \bar{x} < 1$. Кривые на рис. 3.8 отражают динамику безразмерных полей влагосодержаний в этом же координатном пространстве [119].

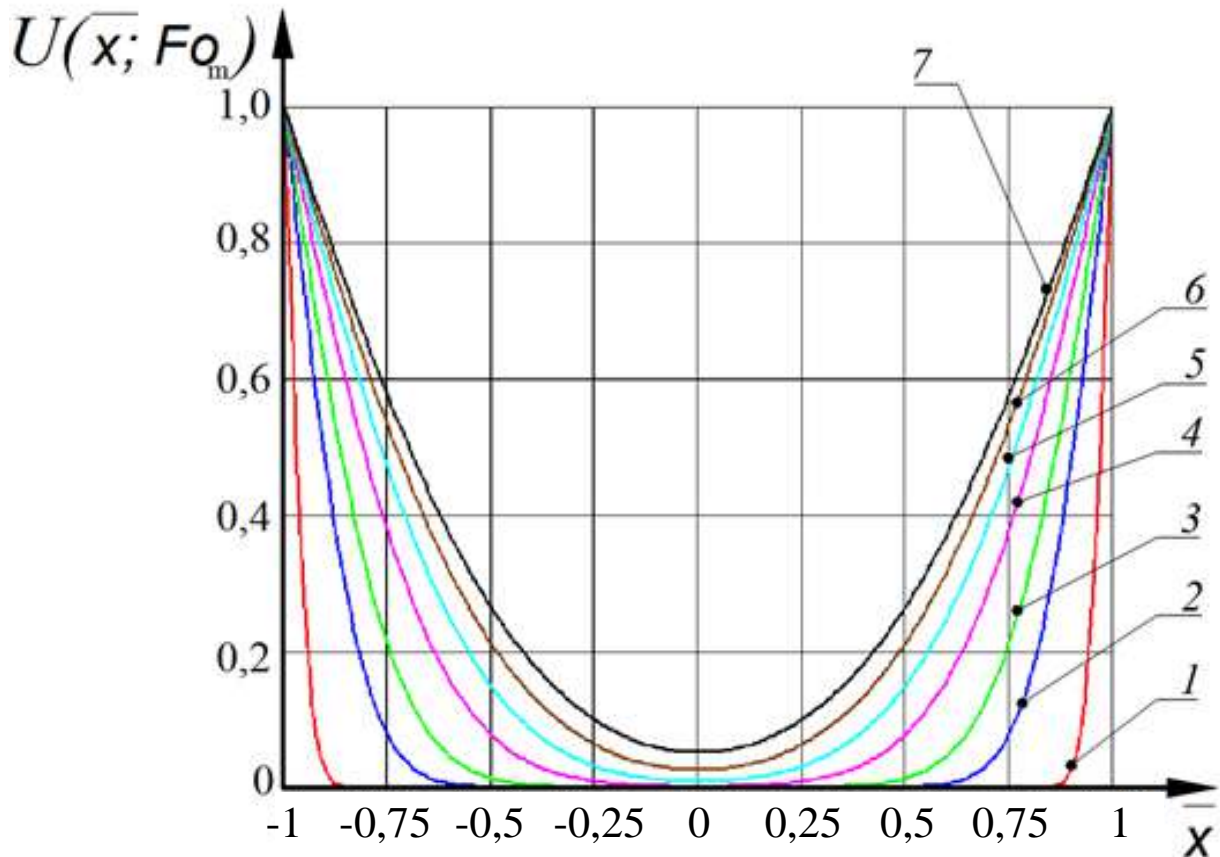


Рисунок 3.8. Динамика полей влагосодержаний в пространстве между двумя зубьями нагеля при $Fo = 1) 0,001; 2) 0,01; 3) 0,02; 4) 0,04; 5) 0,06; 6) 0,08; 7) 0,1$

На рис. 3.9 - 3.11 приведены данные о результатах расчетов по выражению (3.109). В этом случае координата x изменяется в тех же пределах ($-1 < \bar{x} < 1$), а координата y изменяется в пределах $0 < \bar{y} < 0,75$ (см. рис. 3.6). Значение $\bar{y} = 0,75$ соответствует положению кончиков зубьев МЗП, а эти точки интересны тем, что здесь возникает наибольшая неоднородность как температурного поля, так и поля влагосодержаний в древесине. Следует заметить также, что картина поля в области отрицательных значений координаты y будет иметь точно такой же вид, как на рис. 3.9 - 3.11 (численные значения записываются со знаком «-»), т.е. поле имеет симметричный вид относительно осей координат (см. рис. 3.6,а).

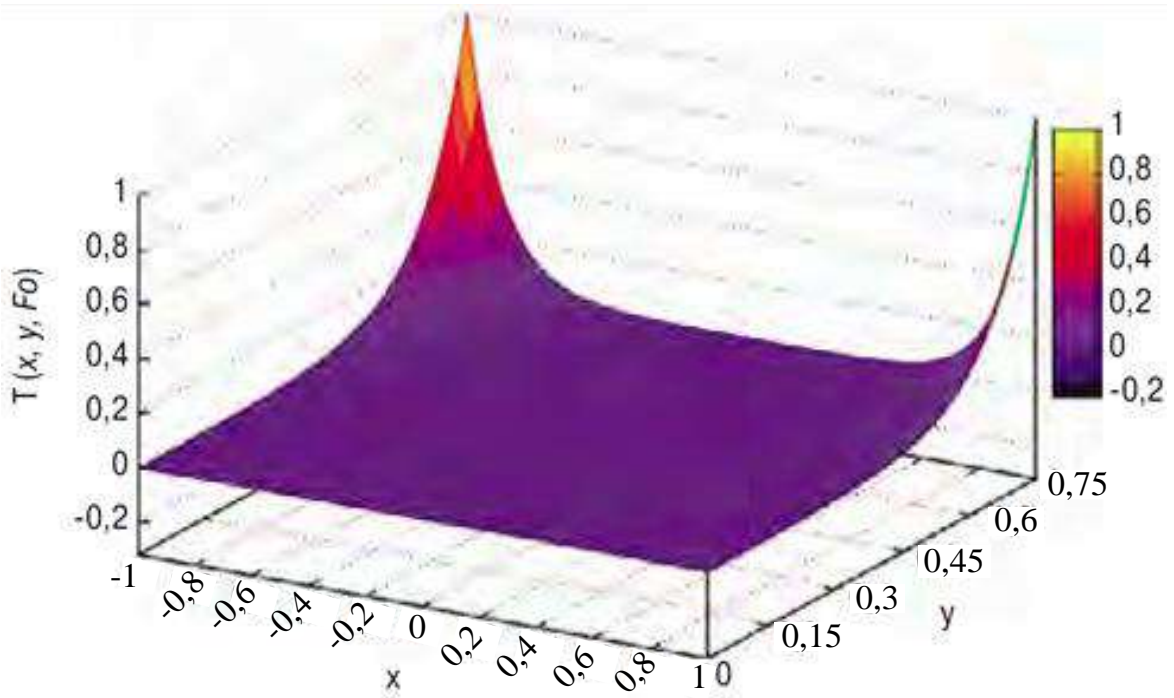


Рисунок 3.9. Температурное поле при значении числа Фурье $Fo = 0,01$

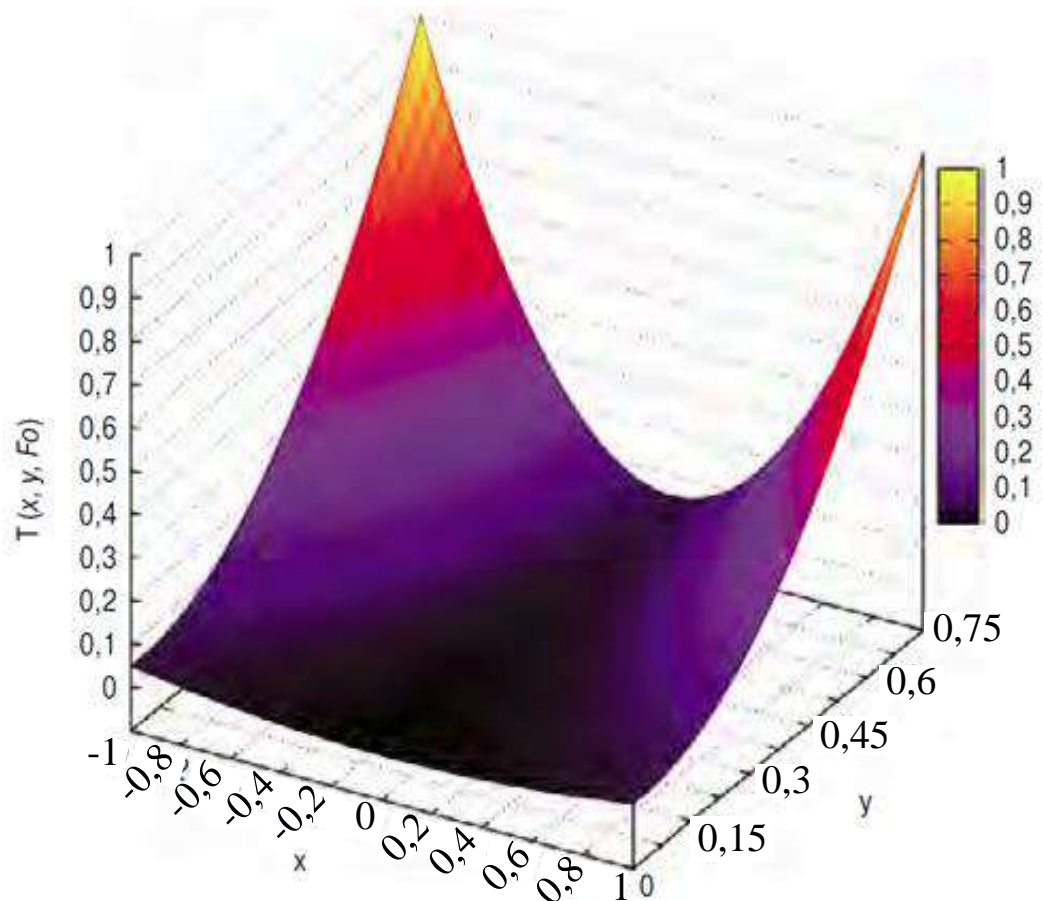


Рисунок 3.10. Температурное поле при значении числа Фурье $Fo = 0,1$

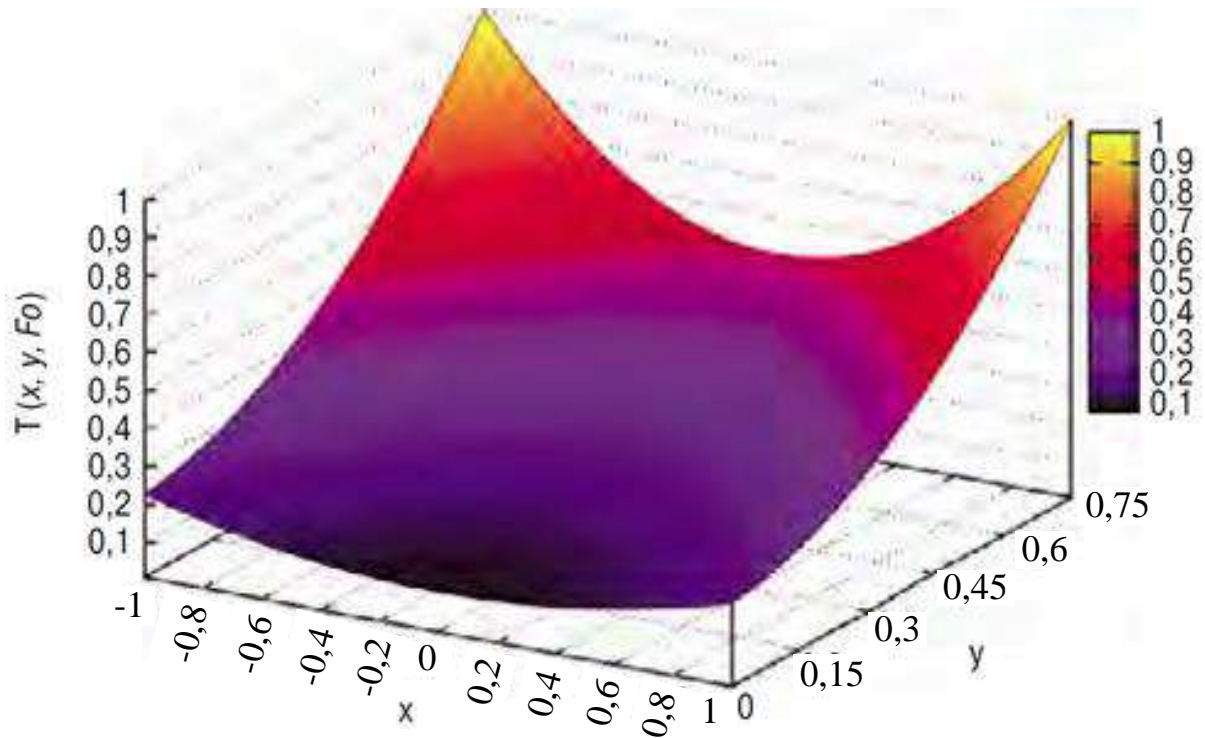


Рисунок 3.11. Температурное поле при значении числа Фурье $Fo = 0,2$

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что эти результаты соответствуют качественным представлениям о процессах тепловлагодпереноса во влагопроницаемых материалах, к которым можно отнести древесину. Эти зависимости в сравнении с аналогичным результатом для болтовых нагельных соединений (см. гл. 2) позволяют сделать заключение, что для нагельных соединений с МЗП характерны более неоднородные температурные поля и поля влагосодержаний, а максимальная неоднородность имеет место на кончиках зубьев МЗП, запресованных в глубь древесины.

3.5. Методика определения показателей ресурса нагельных соединений при циклических колебаниях температурно-влажностных условий эксплуатации

Предложенные в гл.2 и 3 математические модели тепловлагодпереноса позволяют досконально изучать циклические процессы увлажнения и высыхания древесины нагельных соединений при наличии колебаний

температуры. Однако сами получаемые при этом характеристики таких процессов еще не позволяют дать ответ на вопрос о том, каковы состояние и ресурс нагельного соединения. Для решения этого вопроса была разработана методика расчета допустимого ресурса нагельного соединения, представленная в этом разделе.

Построение методики основано на известных сведениях о структуре древесины и той роли, которую играют ее органические составляющие в обеспечении механической прочности этого материала (см. гл. 1). С этой точки зрения интерес представляют важнейшие соединения – целлюлоза и лигнин, практическое значение которых состоит в том, что волокна целлюлозы создают пространственный каркас материала, воспринимающий нагрузки, а лигнин выполняет функцию связующего для элементов целлюлозного каркаса. Эти составляющие в основном обеспечивают механическую прочность древесины [1, 3, 33, 35, 57, 89, 135].

Известно также, что целлюлоза обладает значительно большей химической стойкостью, чем лигнин. Соединения лигнина имеют склонность к разрушению под действием различных факторов, например, повышенной температуры, увлажнения древесины и др. Можно предположить, что циклические процессы тепломассопереноса и температура являются основными факторами, приводящими к постепенному ухудшению механических характеристик древесины нагельных соединений в условиях напряженно-деформированного состояния вплоть до разрушения. Следует также предположить, что разрушение лигнина происходит по причине нарушения связей между атомами соединений, входящих в состав лигнина, т.е. имеет химическую природу. Поэтому для учета влияния температуры на химический процесс разрушения молекул лигнина удобно использовать один из фундаментальных законов химии – уравнение Аррениуса, который пригоден как для описания процесса образования химических связей, так и процесса их разрушения [99, 144].

Исходя из изложенного, можно принять, что механическая прочность древесины будет пропорциональна числу остающихся в работе химических связей лигнина N в процессе их постепенного разрушения под действием указанных выше факторов. Поэтому можно записать следующее соотношение:

$$R = R_0 \frac{N}{N_0}, \quad (3.118)$$

где R_0 и $R \leq R_0$ – начальное и текущее значения механической прочности древесины; N_0 – начальное количество химических связей.

Количество разрушенных химических связей будет определяться как произведение количества циклов увлажнения и высыхания древесины $n_{\text{ц}}$ и значения $N_{P_{\text{ц}}}$, количества разрушенных химических связей за один цикл.

Для определения величины N целесообразно воспользоваться законом Аррениуса, согласно которому константа скорости химических превращений описывается соотношением [144]

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (3.119)$$

где K – константа скорости химической реакции, 1/с; A – постоянный коэффициент (число химических взаимодействий в единицу времени), 1/с; E – энергия активации химической реакции, Дж; T – абсолютная температура, К; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

При известной константе скорости химической реакции значение этой скорости во времени, кг/(с·м³), определяется выражением [99, 144]

$$\frac{dN}{dt} = -K \cdot N = -A \cdot N \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right), \quad (3.120)$$

где N – количество химических связей, 1/м³, остающихся в работе в произвольный момент времени t (предполагается, что порядок реакции равен единице).

Решение уравнения (3.120) выполняется посредством разделения переменных и интегрирования обеих частей в пределах интервала времени первого цикла увлажнения и высыхания древесины нагельного соединения:

$$\int_{N_0}^{N_1} \frac{dN}{N} = - \int_{t_0=0}^{t_1} A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_1}\right) dt, \quad (3.121)$$

Это позволяет получить выражение для определения величины остающихся в работе химических связей $N_1 \leq N_0$ в момент времени t_1 окончания первого цикла увлажнения и высыхания:

$$N_1 = N_0 \cdot e^{-\Delta t_1 \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_1}\right)}, \quad (3.122)$$

где N_0 – уже упомянутое выше начальное количество химических связей в момент времени $t_0=0$; T_1 – температура, при которой протекал этот цикл; $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ – продолжительность цикла.

Для второго цикла увлажнения и высыхания древесины выражение (3.121) будет записано в следующем виде:

$$\int_{N_1}^{N_2} \frac{dN}{N} = - \int_{t_1}^{t_2} A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_2}\right) dt \quad (3.123)$$

где $N_2 \leq N_1$ – количество остающихся в работе химических связей в момент времени $t_2 \geq t_1$ окончания второго цикла; T_2 – температура, при которой протекал этот цикл.

По аналогии с (3.122) и с учетом этой формулы можно записать

$$N_2 = N_1 \cdot e^{-\Delta t_2 \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_2}\right)} = N_0 \cdot e^{-\Delta t_1 \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_1}\right)} \cdot e^{-\Delta t_2 \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_2}\right)}, \quad (3.124)$$

где $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ – продолжительность второго цикла.

Если далее повторить выкладки (3.121)÷(3.124), то для определения количества остающихся в работе химических связей в момент времени $t_3 \geq t_2$

окончания третьего цикла увлажнения и высыхания древесины можно записать формулу

$$N_3 = N_2 \cdot e^{-\Delta t_3 \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_3}\right)} = N_0 \cdot e^{-\Delta t_1 \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_1}\right)} \cdot e^{-\Delta t_2 \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_2}\right)} \cdot e^{-\Delta t_3 \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_3}\right)}, \quad (3.125)$$

где $\Delta t_3 = t_3 - t_2$ – продолжительность третьего цикла; T_3 – температура, при которой протекал этот цикл.

Выражение (3.125) можно записать в более компактном виде:

$$N_3 = N_0 \cdot e^{-A \cdot \sum_{i=1}^{i=3} \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_i}\right)}, \quad (3.126)$$

При повторении представленных рассуждений нетрудно получить формулу вида (3.126) для определения количества химических связей, остающихся в работе, при произвольном количестве n_u последовательных циклов увлажнения и высыхания древесины нагельных соединений:

$$N = N_0 \cdot e^{-A \cdot \sum_{i=1}^{n_u} \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_i}\right)}, \quad (3.127)$$

где Δt_i – продолжительность i -го цикла; T_i – температура, при которой протекал этот цикл

После подстановки (3.127) в (3.118) формула для определения текущего значения механической прочности древесины приобретает вид

$$R = R_0 \cdot e^{-A \cdot \sum_{i=1}^{n_u} \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_i}\right)}. \quad (3.128)$$

Анализ полученного выражения (3.128) позволяет сделать вывод, что на механическую прочность древесины оказывают влияние три важнейших эксплуатационных фактора: число циклов увлажнения и высыхания, продолжительность этих циклов и температура. Причем увеличение этих параметров сопровождается снижением механической прочности. Это

качественно соответствует существующим представлениям о влиянии таких факторов на механическую прочность древесины (см. гл. 1).

Формула (3.128) заметно упрощается в том случае, если следующие друг за другом процессы увлажнения и высыхания древесины имеют одинаковую продолжительность $\Delta t_i = \Delta t = \text{const}$ и протекают при одинаковой температуре $T_i = T = \text{const}$. В этом случае суммирование в этой формуле можно заменить произведением

$$R = R_0 \cdot e^{-A \cdot n_y \cdot \Delta t \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right)}. \quad (3.129)$$

Полученное выражение (3.129) позволяет определить допустимое число циклов увлажнения и высыхания. Как известно, отношение величины предела прочности к величине допускаемого напряжения называется коэффициентом запаса [64, 145]:

$$K_3 = \frac{R_0}{R_{дон}}. \quad (3.130)$$

Для древесины, вследствие отмеченных выше ее особенностей (см. гл. 1), коэффициент запаса устанавливается более высоким, чем для других материалов (например, металла). В зависимости от характера действующего усилия коэффициенты запаса колеблются в довольно широких пределах: от $K_3 = 3 \div 5$ при сжатии и скалывании до $K_3 = 8 \div 10$ при растяжении вдоль волокон [61, 64, 145]. Из (3.130) можно определить допустимую величину механического воздействия на древесину:

$$R_{дон} = \frac{R_0}{K_3}. \quad (3.131)$$

Практическое значение этого параметра заключается в том, что в процессе эксплуатации нагельного соединения механическая прочность древесины уменьшается с течением времени и под действием циклических процессов увлажнения и высыхания до тех пор, пока не достигнет допустимого значения.

В этот момент происходит разрушение древесины, т.е. нагельного соединения. Число циклов увлажнения и высыхания древесины, которое предшествовало этому событию, следует также считать допустимым значением этого параметра, и его знание имеет практическое значение.

Очевидно, что, если принять $R = R_{дон}$ в левой части уравнения (3.129), следует считать, что число циклов, присутствующее в правой части, будет равно допустимому значению: $n_{ц} = n_{дон}$. Тогда это уравнение с учетом (3.131) можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{K_3} = e^{-A \cdot n_{дон} \cdot \Delta t \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right)}. \quad (3.132)$$

В результате решения этого уравнения относительно $n_{дон}$ получено следующее выражение для определения допустимого числа циклов увлажнения и высыхания древесины нагельного соединения:

$$n_{дон} = \frac{\ln K_3}{A \cdot \Delta t} \exp\left(\frac{E}{k \cdot T}\right). \quad (3.133)$$

Из анализа выражения (3.128) следует, что увеличение длительности циклов увлажнения и высыхания и температуры приводит к уменьшению допустимого числа таких циклов, т.е. к снижению ресурса нагельных соединений. Однако увеличением коэффициента запаса можно увеличить этот ресурс.

Для того чтобы иметь возможность воспользоваться формулами (3.128), (3.129) и (3.133), необходимо знать две входящие в нее константы – A и E . Однако в настоящее время отсутствуют какие-либо сведения об этих параметрах, и оценить их значения можно только посредством экспериментов. Кроме того, эта формула позволяет определить допустимое число циклов увлажнения и высыхания древесины лишь при некотором неизменном значении температуры. Вместе с тем хорошо известно (см. гл. 1 и 2), что температурный режим эксплуатации нагельных соединений может колебаться

в широких пределах, даже в пределах одного цикла увлажнения и высыхания древесины.

Для получения выражения, позволяющего определять допустимое число циклов увлажнения и высыхания древесины нагельного соединения применительно к такому, т.е. общему, случаю, необходимо вновь обратиться к выражению (3.128). Используя (3.131) и полагая $R = R_{дон}$, указанное выражение по аналогии с (3.132) можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{K_3} = e^{-A \cdot \sum_{i=1}^{n_{дон}} \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_i}\right)}, \quad (3.134)$$

или в более удобном виде

$$\ln K_3 = A \cdot \sum_{i=1}^{n_{дон}} \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_i}\right). \quad (3.135)$$

Из анализа (3.135) нетрудно сделать вывод, что в этом случае невозможно выразить $n_{дон}$ в явном виде, и это уравнение может быть решено относительно $n_{дон}$ посредством итерационных вычислений. Порядок использования формул (3.133) и (3.135) показан далее.

3.6. Выводы по главе 3

На основании представленной в настоящей главе информации можно сделать ряд выводов.

1. Полностью решена задача по созданию еще одного важного компонента описанной выше общей методологии получения надежной долговечной строительной конструкции из древесины (см. рис. 2.1): разработана математическая модель нестационарных процессов тепловлагопереноса в древесине узлового соединения в форме металлических зубчатых пластин (МЗП), которая, как в случае болтового соединения (см. гл. 2), обладает высокой универсальностью и достаточной простотой.

2. Сравнение этой математической модели с аналогичной теоретической разработкой для болтовых соединительных узлов (см. гл. 2) позволяет сделать вывод, что изучение температурных полей и полей влагосодержания в древесине в случае нагельных соединений с применением МЗП представляет более сложную задачу, т.к. эти поля имеют двухмерную картину, что приводит к необходимости использования более громоздких выражений и несколько большим затратам времени на программирование вычислений.

3. Анализ полученных характеристик температурных полей и полей влагосодержания в древесине нагельных узлов с МЗП позволяет сделать вывод о том, что эти зависимости в полной мере соответствуют представлениям о таких физических процессах, а также результатам, представленным в литературных источниках, что свидетельствует о достоверности предложенной в настоящей главе математической модели.

5. Характеристики нестационарного температурного поля и поля влагосодержания, полученные в настоящей главе, свидетельствуют о том, что эти поля обладают значительно большей неоднородностью, чем в случае болтового нагельного соединения (см. гл. 2), что можно объяснить малым радиусом кривизны поверхности металлических элементов, уходящих в глубь древесины, в виде зубьев МЗП; в настоящее время довольно затруднительно оценить влияние этого фактора на надежность нагельных соединений, для этого требуется проведение дополнительных исследований.

6. Совершенно очевидно, что цикличность изменения атмосферных параметров при эксплуатации нагельных соединений (см. рис. 2.2), как и в случае болтовых соединений (см. гл. 2), обязательно будет сопровождаться возникновением нестационарных температурных полей и полей влагосодержания в древесине с меняющимися по направлению и величине потоками теплоты и влаги, а также с изменением этих параметров в широких пределах; причем в случае нагельных соединений с МЗП такими процессами будет охвачен больший объем древесины, чем в случае болтовых соединений

из-за большой площади поверхности МЗП и большого числа зубьев, заглубленных в толщу древесины.

7. На основании сведений, представленных в гл. 1, следует предположить, что отрицательное влияние циклически изменяющихся температурных полей и полей влагосодержания в древесине должно в разной степени сказываться на прочности и надежности соединений с МЗП и болтовых узлов, поскольку прочность сцепления зубьев МЗП с древесиной в значительной степени зависит температурных и влажностных показателей этого материала; однако для проверки и количественной оценки такого заключения требуется проведение специальных экспериментальных исследований.

8. Поскольку сами исследования процессов тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений с помощью предложенных математических моделей (гл. 2 и 3) не дают полного представления о состоянии и ресурсе нагельных соединений, разработана и обоснована методика определения допустимого количества циклических процессов увлажнения и высыхания древесины этих узлов в процессе эксплуатации.

ГЛАВА 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Как отмечено в предыдущих главах настоящей работы, для завершения представленных теоретических разработок и проверки их достоверности требуется проведение экспериментальных исследований. Поэтому в настоящей главе представлены сведения об оборудовании, лабораторных установках, материалах и изделиях и методиках проведения экспериментальных исследований, использованных в настоящей работе.

4.1. Характеристики пород и сортов древесины и металлических крепежей

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 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» и представлены в табл. 4.1 и 4.2 [64]. Химический состав исследуемых пород древесины приведен в табл. 4.3 [1, 3, 33, 35, 57].

Таблица 4.1. 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 4.2. Основные механические свойства древесины при влажности 12 %

Порода дерева	Предел прочности, МПа				
	при сжатии вдоль волокон	при изгибе	при растяжении вдоль волокон	при скалывании	
				в радиальном направлении	в тангенциальном направлении
Лиственница	52	97	129	114	123
Сосна	44	79	115	7	7,5
Ель	42	77,5	122	5	5
Кедр	35	64,5	78	5,5	6
Пихта	33	58,5	84	6	6,5
Дуб	52	94	129	8,5	10,5
Бук	46	94	129	10	13
Береза	45	100	120	8,5	11
Лиля	39	68	116	7	8
Осина	37	77	111	6	8

Таблица 4.2. Продолжение

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

Таблица 4.3. 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 [146] из нержавеющей стали марки А2 [147], химический состав которой представлен в табл. 4.4 [33, 35].

Таблица 4.4. 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 табл. 4.5 приведены физико-механические свойства нержавеющей стали марки А2 [147].

Таблица 4.5. 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», не содержит пленок нефтепродуктов, жиров, масел. Водородный показатель воды $\text{pH} = 5,5$ [148].

Сведения о составе и количестве примесей, содержащихся в дистиллированной воде, приведены в табл. 4.6 [148].

Таблица 4.6. Содержание примесей в дистиллированной воде

Содержание примесей, мг/л, не более												
Сухой остаток после выпаривания	Сухой остаток после прокаливания	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 [85].

Основные характеристики используемых растворов серной кислоты указаны в табл. 4.7 [85].

Таблица 4.7. Основные характеристики растворов серной кислоты

Водная среда ($t = 20\text{ }^\circ\text{C}$)	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

4.2. Методики и инструментарий для измерения характеристик теплопереноса и теплофизических параметров объектов исследования

Экспериментальные исследования проводились в целях изучения структуры, состава и свойств исследуемых материалов (твердой и жидкой фазы) до и после воздействия агрессивных сред [101-104, 149, 151, 152].

В экспериментах использовались методы химического и физико-химического анализа: определение концентрации кислоты проводилось методом прямого титрования; влажность древесины определялась с помощью электровлагомера и весовым методом; плотность растворов серной кислоты измерялась при помощи ареометров; процессы теплопереноса исследовались с применением тепловизора.

4.2.1. Определение влажности древесины

Весовой метод

Определение влажности древесины проводится согласно [56]. 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

$$W = \frac{P_n - P_c}{P_c} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

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

Определение влажности электровлагомером

Электрический метод определения влажности с помощью электровлагомера основан на изменении электропроводимости древесины в зависимости от влажности [64].

Электровлагомер ЦНИИМОД-3 (рис. 4.1) состоит из скобы с двумя вкалываемыми в испытываемую древесину иглами-электродами длиной 1 см, измерительного контура, часового механизма со шкалой показаний влажности древесины и источника питания током.

Электровлагомер предназначен для быстрого определения влажности древесины различных пород от 8 до 30 % (рис. 4.2) со средней точностью измерения ± 1 %.

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

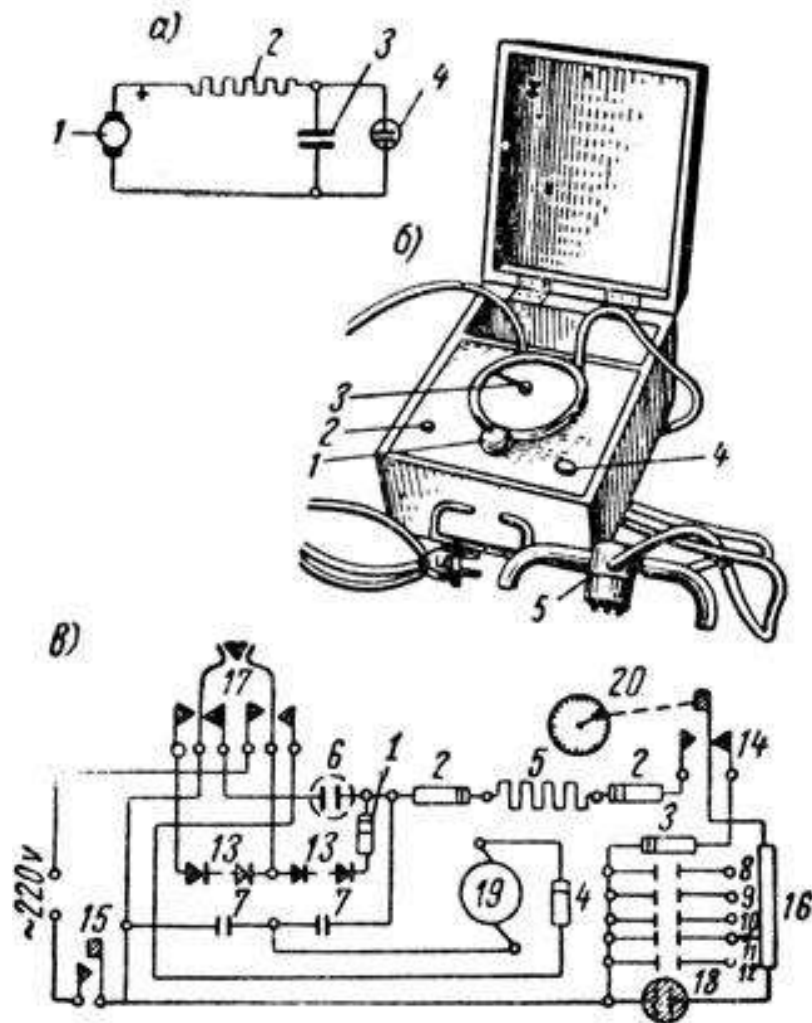


Рисунок 4.1. Электровлагомер ЦНИИМОД-3: а) схема измерения: 1 – источник постоянного тока; 2 – испытываемый образец древесины; 3 – конденсатор; 4 – неоновая лампа; б) общий вид электровлагомера: 1 – диапазонный переключатель; 2 – пусковая кнопка; 3 – стрелка указателя; 4 – лампочка; 5 – скоба с электродами; 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

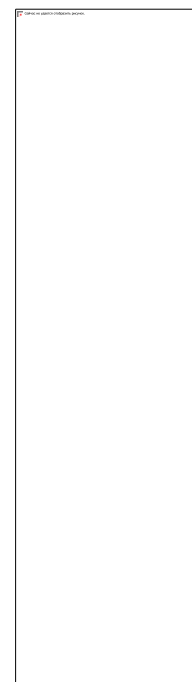
Электрический ток, проходя через древесину, заряжает конденсатор. Когда разность потенциалов на обкладках конденсатора достигает определенной величины, загорается неоновая лампа. Величина электрического сопротивления древесины определяется промежутком времени от момента включения тока до вспышки лампы. 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 %, 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. 4.1в, 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 [64]: вводят в древесину испытуемого образца иглы (электроды); устанавливают стрелку часового механизма на "нуль"; переводят ручку источника питания в 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 секунд.



Измерения производят при нормальной температуре древесины 20 °С. При температуре выше 20 °С показания прибора уменьшают на 0,1 % на каждый градус сверх 20 °С, а при меньшей температуре прибавляют 0,1 % на каждый градус ниже 20 °С [85].

Рисунок 4.2. График для определения перехода от абсолютной влажности к относительной

Для перехода от абсолютной влажности к относительной и обратно можно воспользоваться графиком, представленным на рис. 4.2 [64].

Таблица 4.8. Технические характеристики измерителей влажности древесины

№	Характеристики влагомера	БЭБПВ-04	SH-0453 (игольчатый)	SH-0453 (индуктивный)
1	Назначение влагомера	Контроль влажности при сушке древесины	Контроль влажности при сушке древесины	Контроль влажности при сушке древесины
2	Принцип действия влагомера	Электронный бесконтактный	Контактный, 2 изолированных электрода	Индуктивный датчик
3	Температура окружающего воздуха, °С	От -10 до +35 °С	От -20 до +50 °С	От -20 до +50 °С
4	Относительная влажность воздуха	30-80 %	30-80 %	30-80 %
5	Диапазон измерения влагомера	0-30 %	6-18 %	0-30 %
6	Обзорный диапазон измерений	0-60 %	18-60 %	0-30 %
7	Абсолютная погрешность измерений влагомера	2 %	2 %	2 %
8	Время измерения, не более	5 с	5 с	5 с
9	Толщина контролируемого слоя древесины, не более	50 мм	20 мм	40 мм
10	Минимальные размеры контролируемого датчика	90x90x20 мм	Длина электродов до 10мм	-
11	Питание	Автономное от аккумуляторов / от батарей	Автономное, от квадратной батареи типа 336, по заказу питание от сети 220 В	Автономное, от квадратной батареи типа 336, по заказу питание от сети 220 В
12	Напряжение питания	не менее 9 В	4.5 В	4.5 В
13	Габаритные размеры	140x60x40 мм	140x80x40 мм	140x80x40 мм
14	Масса влагомера не более, кг	04	03	0,3

Наряду с описанным прибором для измерения влажности древесины может использоваться другой прибор зарубежного производства типа Hydromette HT 85 T фирмы Gann (Германия). Этот прибор имеет идентичное устройство и принцип действия и отличается от рассмотренного выше лишь некоторыми особенностями конструктивного выполнения.

4.2.2. Исследование процессов теплопереноса в древесине

При выполнении экспериментов в рамках настоящей диссертационной работы кинетика теплопереноса в древесине изучалась с помощью тепловизора.

Тепловизор (рис. 4.3) – 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 таким образом, что различные градации цвета соответствуют распределению инфракрасного излучения (т.е. температуры) по поверхности объекта [153].

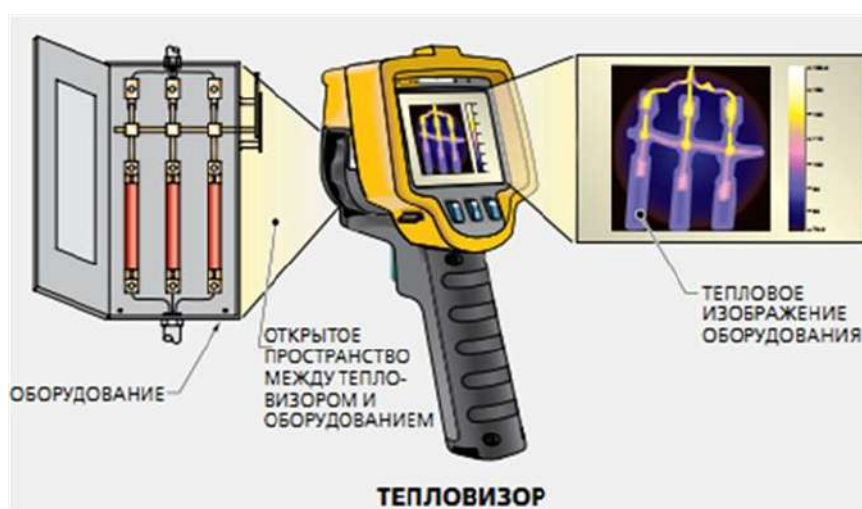


Рисунок 4.3. Тепловизор

4.3. Методики исследования сорбционных характеристик древесины промышленного назначения

4.3.1. Определение влагопоглощения древесины

Определение влагопоглощения древесины проводится согласно [154]. Образцы высушивают в бюксах до абсолютно сухого состояния согласно требованиям ГОСТ 16483.7-71 «Древесина. Методы определения влажности» [155] 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 , %, вычисляют с точностью до 0,1 % по формуле

$$W = \frac{m_n - m_1}{m_1 - m} \cdot 100, \quad (4.2)$$

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.

4.3.2. 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 кислотой. 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

$$C_1 = \frac{C_2 \cdot V_2}{V_1}, \quad (4.3)$$

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

$$N = \frac{C \cdot \rho \cdot 10}{\mathcal{E}}, \quad (4.4)$$

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

4.3.3. Определение плотности исследуемых растворов

Определение плотности растворов серной кислоты проводили с помощью ареометра.

Ареометр (рис. 4.4) представляет собой узкую стеклянную трубку, расширяющуюся в нижней части и имеющую на конце груз из свинцовой

дробь. В узкой части трубки помещается шкала. Причем у ареометров, предназначенных для измерения плотностей жидкости, больших единицы, шкала градуируется ниже отметки 1000 кг/м^3 , которая находится в верхней части прибора. При погружении в жидкость, прибор 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 располагают на уровне поверхности жидкости и замечают соответствующее значение шкалы [156].

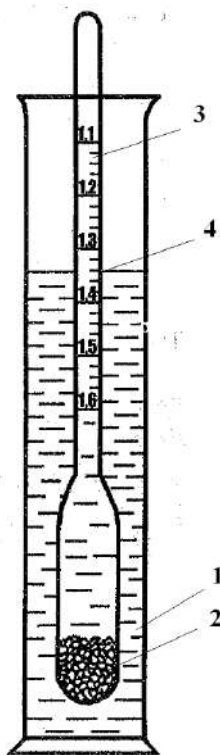
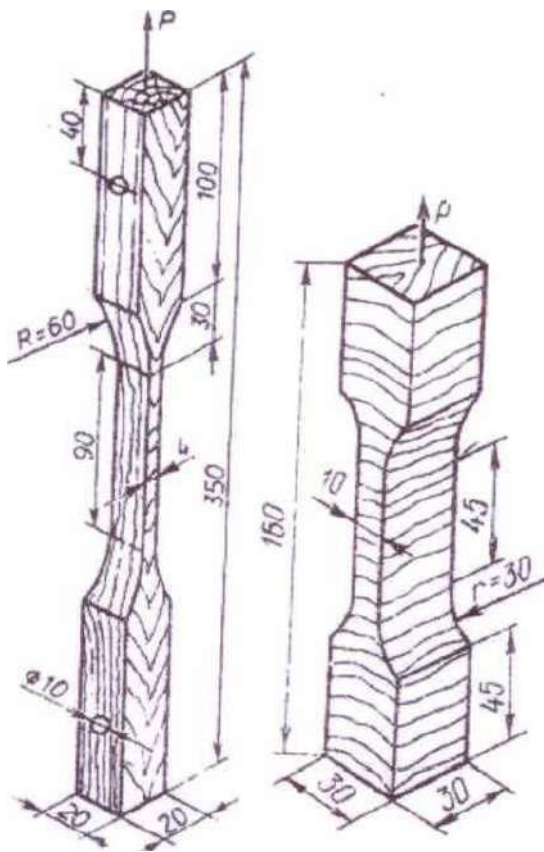


Рисунок 4.4. Определение плотности жидкости ареометром (денсиметром): 1 – цилиндр с изучаемой жидкостью; 2 – балласт; 3 – шкала плотности; 4 – уровень жидкости и деление шкалы, соответствующее ее плотности

4.4. Методики исследования механических характеристик древесины

Растяжение

Испытание на растяжение проводится на образцах сечением 0,4x2 см (рис. 4.5) [1, 3, 35]. Сопротивление чистой древесины растяжению вдоль волокон весьма велико. Средняя величина предела прочности при растяжении вдоль волокон для всех пород составляет 1300 кгс/см². На прочность при



растяжении вдоль волокон оказывает большое влияние строение древесины. Древесина при растяжении вдоль волокон работает подобно хрупким материалам, т.е. без развития пластических деформаций. Так как прочность древесины поперек волокон при растяжении в 25-30 раз меньше, чем вдоль волокон, при проектировании конструкций необходимо избегать приложения усилий, действующих поперек волокон. Прочность древесины на растяжение поперек волокон имеет значение при разработке режимов резания и режимов сушки древесины [157].

Рисунок 4.5. Испытание на прочность древесины при растяжении

Смятие

Под смятием понимается напряженное состояние элемента по поверхности, воспринимающей нагрузку. Различают смятие вдоль волокон, поперек волокон и под углом к ним (рис. 4.6) [1, 3, 35]. Прочность древесины на смятие вдоль волокон мало отличается от прочности древесины на сжатие вдоль волокон. Смятие древесины поперек волокон слабее, чем вдоль волокон,

и зависит от размеров сминаемой площади и отношения ее ко всей плоскости смятия. При смятии древесины поперек волокон по всей поверхности сминаемого элемента деформации будут больше, чем при смятии части поверхности, т.е. наличии незагруженной части сминаемого элемента. В целом работа древесины на смятие происходит с сильным развитием деформаций и постепенным разрушением.

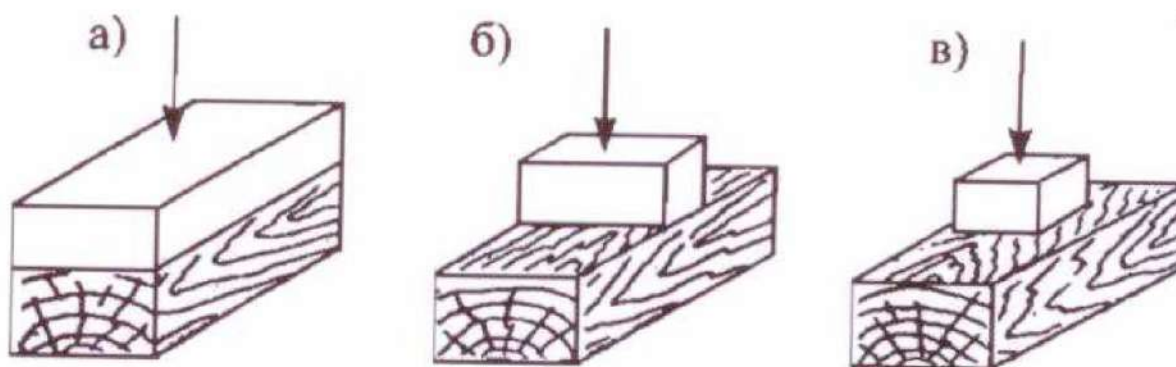


Рисунок 4.6. Смятие древесины поперек волокон: а – по всей поверхности; б – на части длины; в – на части длины и части ширины

Сжатие

Испытание на сжатие проводится на образцах в форме призм размером 2x2x3 см [1, 3, 35]. Различают сжатие вдоль и поперек волокон (рис. 4.7). При сжатии вдоль волокон деформация выражается в небольшом укорочении образца. Разрушение при сжатии начинается с продольного изгиба отдельных волокон, которое во влажных образцах из мягких и вязких пород проявляется как смятие торцов и выпучивание боков, а в сухих образцах и в твердой древесине вызывает сдвиг одной части образца относительно другой. Предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон в 2-2,5 раза меньше, чем при растяжении. Прочность древесины при сжатии поперек волокон ниже, чем вдоль волокон, примерно в 8 раз. При сжатии поперек волокон не всегда можно точно установить момент разрушения древесины и определить величину разрушающей нагрузки. Древесину испытывают на сжатие поперек волокон и в радиальном и тангенциальном направлениях. У лиственных пород с широкими сердцевинными лучами (дуб, бук) прочность при радиальном сжатии в 1,5 раза выше, чем при тангенциальном. У хвойных пород, наоборот,

прочность выше при тангенциальном сжатии. В среднем для сосны и ели предел прочности при сжатии составляет 40-50 МПа. Влияние пороков при сжатии меньше, чем при растяжении. В целом работа сжатых элементов в конструкциях является более надежной, чем при растяжении, благодаря пластическим деформациям.

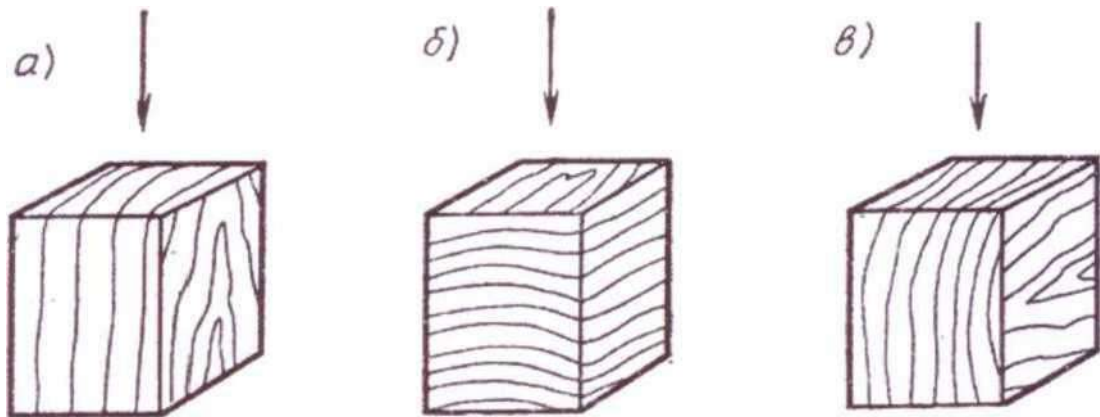


Рисунок 4.7. Испытание механических свойств древесины на сжатие: а – вдоль волокон;
б – поперек волокон в радиальном направлении; в – поперек волокон в тангенциальном направлении

Изгиб

При изгибе верхние слои древесины испытывают напряжение сжатия, а нижние – напряжение растяжения вдоль волокон (рис. 4.8) [1, 3, 35]. Примерно посередине высоты элемента проходит плоскость, в которой нет ни напряжения сжатия, ни напряжения растяжения. Она называется нейтральной. В ней возникают максимальные касательные напряжения. Значение предела прочности при изгибе занимает промежуточное положение между прочностью на сжатие и прочностью на растяжение и составляет в среднем 75-80 МПа. Влияние пороков значительно из-за наличия растянутой зоны. В пределах небольших напряжений наблюдается упругая стадия работы древесины. С увеличением нагрузки усилие сжатия все больше воспринимают волокна, находящиеся ближе к нейтральной оси, а крайние волокна начинают терять устойчивость, т.е. краевое напряжение сжатия меньше, а напряжение растяжения больше.

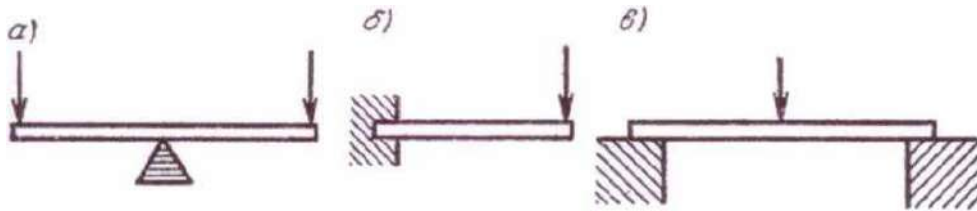


Рисунок 4.8. Испытание механических свойств древесины на изгиб

Сдвиг

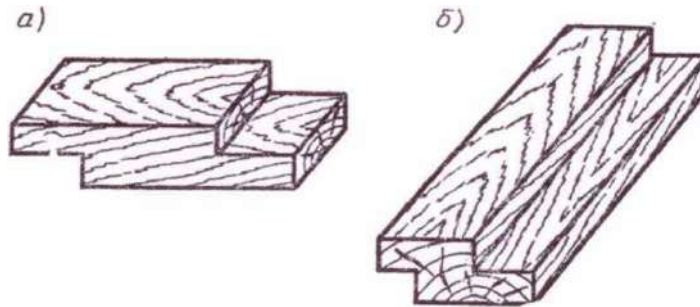


Рисунок 4.9. Сдвиг древесины: а – вдоль волокон; б – перпендикулярно направлению волокон

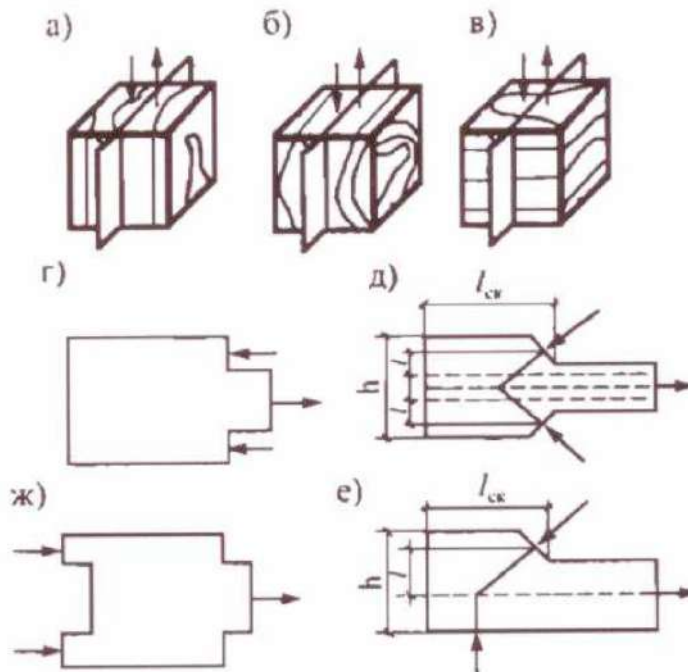


Рисунок 4.10. Виды сдвига: а – сдвиг, вызывающий скалывание древесины вдоль волокон; б – сдвиг, вызывающий скалывание древесины поперек волокон; в – сдвиг, вызывающий перерезание поперек волокон древесины; г, д, е – сдвиг, вызывающий одностороннее скалывание древесины (г – без обжатия по плоскости скалывания); ж – сдвиг, вызывающий двустороннее скалывание древесины без обжатия по плоскости скалывания

Сдвиг – это перемещение одной части детали по отношению к другой, вызванное внешними силами (рис. 4.9) [1, 3, 35]. Различают три типа сдвига древесины (рис. 4.10) [35]:

- скалывание вдоль волокон;

- скалывание поперек волокон;
- перерезание поперек волокон.

Скалывание

Скалывание древесины – это разрушение в результате сдвига одной части материала относительно другой. Предел прочности при скалывании поперек волокон в 2 раза меньше предела прочности при скалывании вдоль волокон. Древесина лиственных пород обладает прочностью при скалывании вдоль волокон в 1,6 раз выше, чем древесина хвойных пород. У лиственных пород, древесина которых обладает широкими сердцевинными лучами (дуб, бук, граб), скалывание в радиальной плоскости на 10-30 % ниже, чем в тангенциальной. На скалывание вдоль волокон древесина работает довольно часто. Например, в соединениях стропильных ферм способом лобовых врубок. На скалывание поперек волокон древесина работает реже (например, в шпонках и шпунтовых соединениях). Существующая методика расчета деревянных элементов на скалывание имеет ряд недостатков. Например, не учитывает наличие изгибающего момента от действия приложенного усилия, вызывающего дополнительные растягивающие напряжения по площадке скалывания.

Испытание на скалывание древесины производится на образце, который не должен иметь сучков и других дефектов (рис. 4.11). Его волокна должны быть расположены вдоль образца, а годичные слои так, чтобы скалывание происходило в радиальном или тангенциальном направлениях с учетом зависимостей, приведенных на рис. 4.12.

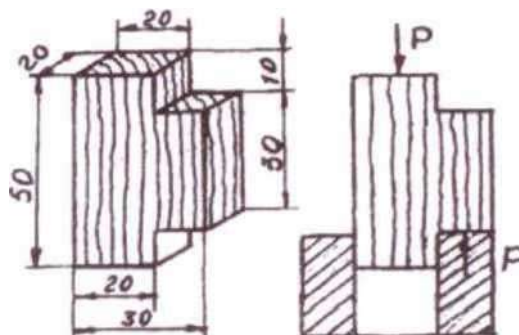


Рисунок 4.11. Схема испытания древесины на скалывание

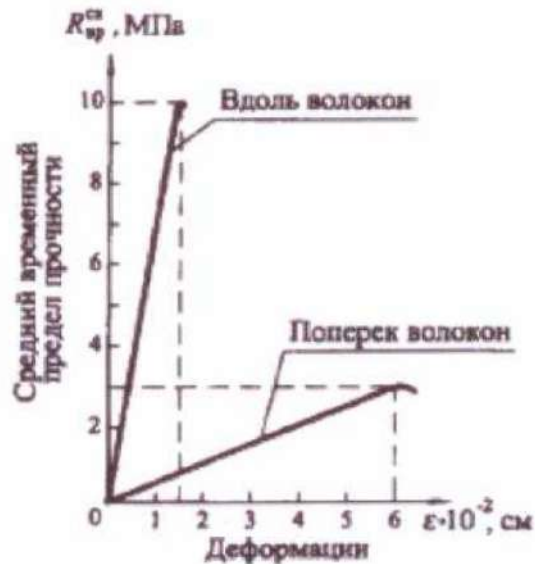


Рисунок 4.12. Диаграмма работы древесины на скалывание вдоль и поперек волокон

Перерезание поперек волокон

Предел прочности древесины при перерезании поперек волокон в 4 раза выше прочности при скалывании вдоль волокон. Так как сопротивление древесины сжатию поперек волокон значительно меньше, чем перерезанию, то разрушение деталей из древесины, работающих на перерезание, обычно происходит от сильного местного смятия. В общем случае при перерезании древесины поперек волокон происходит смятие волокон и изгиб их под действием срезающего усилия. На перерезание поперек волокон древесина работает нечасто, например, в нагельных соединениях. Сопротивление перерезанию в тангенциальном направлении обычно несколько ниже, чем в радиальном направлении.

Образец для испытания древесины при установлении предела прочности при перерезании поперек волокон изготавливают в форме прямоугольной пластинки размерами 20x5 мм (последний размер в радиальном направлении при тангенциальном перерезании) и длиной вдоль волокон 50 мм (рис. 4.13).

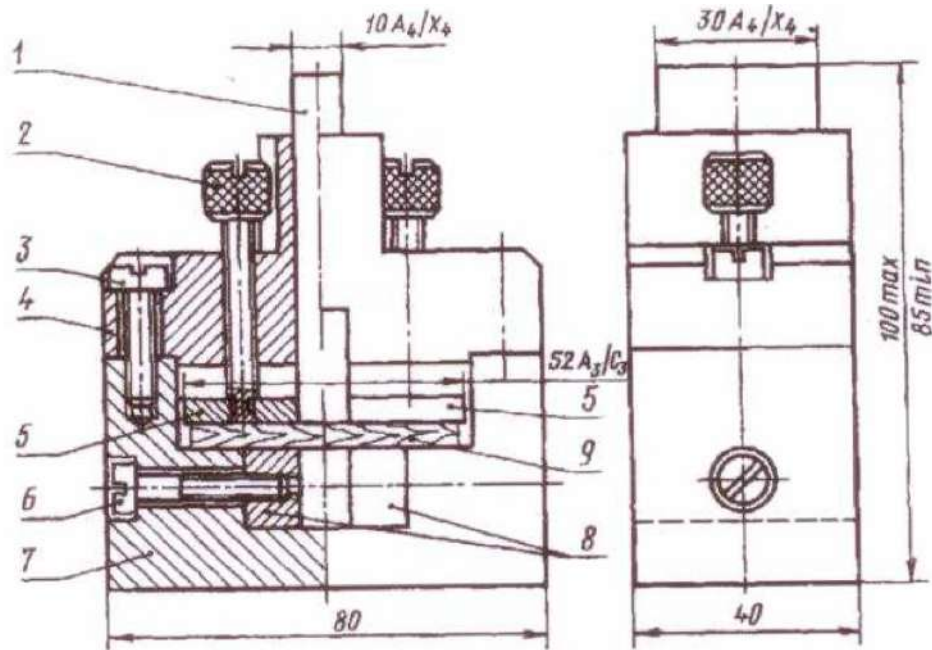


Рисунок 4.13. Приспособление для испытания образца древесины при перерезании поперек волокон: 1 – подвижной нож; 2 – винт зажима образца; 3 – винт крепления крышки; 4 – крышка; 5 – зажимная планка; 6 – винт установки неподвижного ножа; 7 – корпус; 8 – неподвижный нож; 9 – образец

Кручение

Прочность древесины при кручении в значительной мере определяется ее прочностью при скалывании. Прочность при кручении в 1,5 раза выше, чем прочность при скалывании вдоль волокон, что может быть объяснено повышением коэффициента внутреннего трения древесины при кручении стержня. При кручении в материале возникают касательные напряжения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: в плоскости, параллельной оси, и в плоскости, перпендикулярной оси закручиваемого стержня. Эти напряжения возрастают от центра, где они равны нулю, по направлению к периферии, где они достигают максимума. Древесина работает на кручение в валах, осях повозок, в лопастях винта в самолетах, при завинчивании свай и т.д.

4.5. Оборудование и методика исследования циклических процессов тепловлагопереноса в нагельных соединениях

Для экспериментального исследования влияния температуры и влажности на несущую и деформационную способность соединений на металлических зубчатых пластинах (МЗП) и болтовых нагельных соединений [16, 70, 71, 116, 158-164] разработана, изготовлена и налажена лабораторная установка. В качестве такой установки используется специальная камера с рычагом для задания необходимой нагрузки и возможностью создания требуемых параметров температуры и влажности внутри камеры. Конструкция установки схематично представлена на рис. 4.14, где обозначены ее основные элементы.

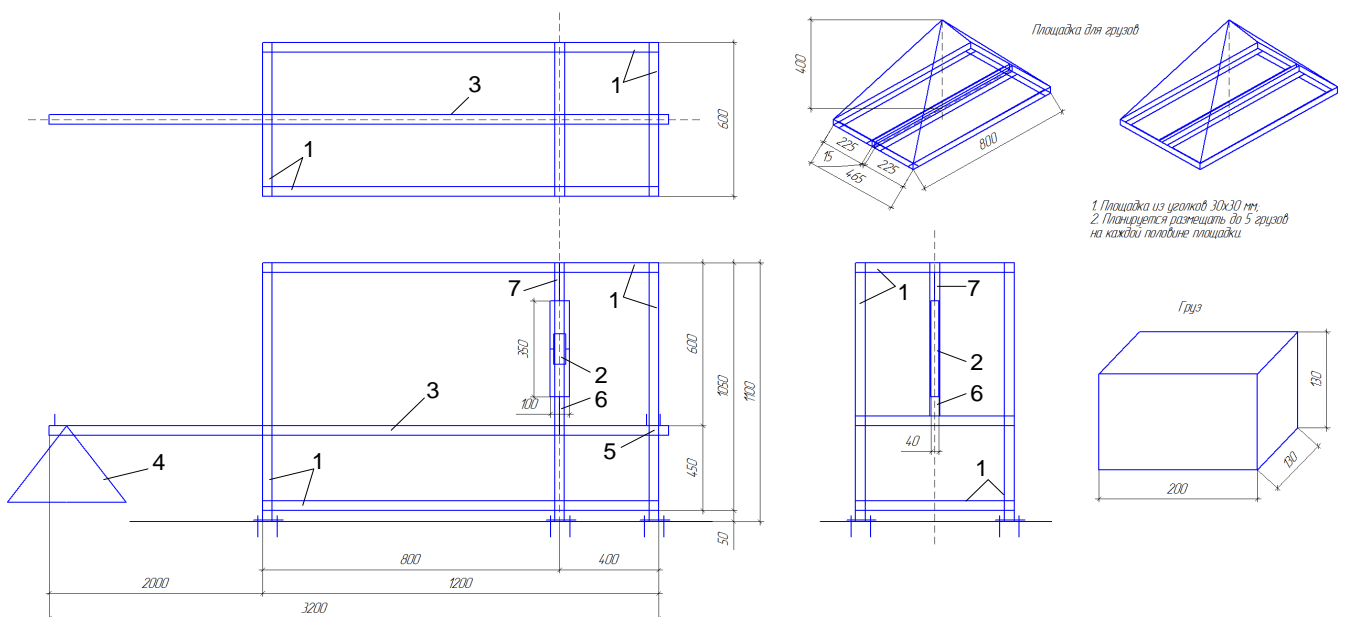


Рисунок 4.14. Конструкция лабораторной установки и ее элементов: 1 – каркас климатической камеры; 2 – испытуемый объект (макет нагельного соединения); 3 – нагрузочный рычаг; 4 – площадка для грузов; 5 – ось вращения нагрузочного рычага; 6 – металлический крепежный элемент для соединения макета нагельного соединения с нагрузочным рычагом; 7 – элемент крепления макета к каркасу климатической камеры

Внешний вид лабораторной установки приведен на рис. 4.15, где, как и на рис. 4.14, показаны ее размеры. На каркасе климатической камеры располагается обшивка (рис. 4.15), выполненная с применением

полупрозрачного водостойкого теплоизоляционного полимерного материала. Нагрузочный рычаг выведен за пределы климатической камеры через отверстие в боковой стенке в обшивке, закрытое изнутри тампоном из эластичного пористого материала (поролон) для устранения взаимодействия среды внутри климатической камеры с окружающей средой.

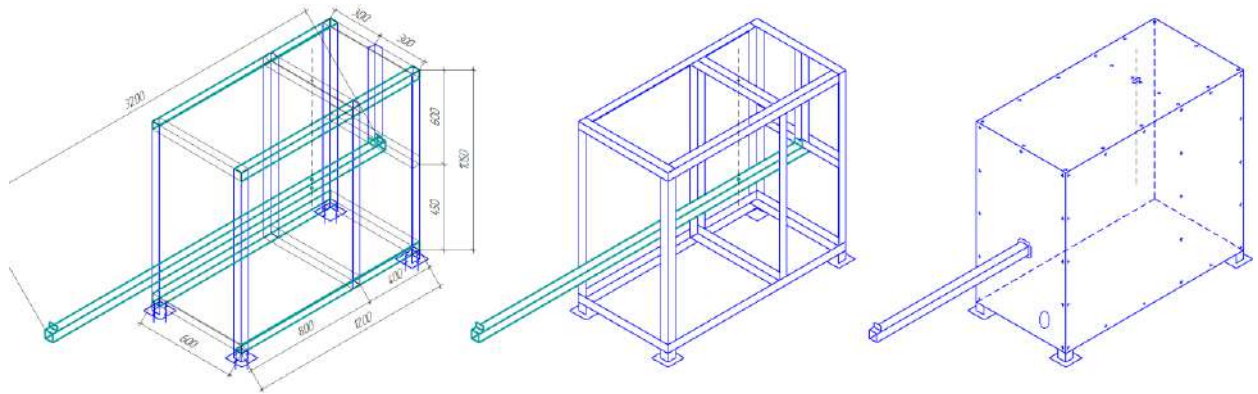


Рисунок 4.15. Внешний вид (схематично) лабораторной экспериментальной установки при отсутствии и при наличии обшивки климатической камеры

Принцип действия экспериментальной установки заключается в следующем. Внутри каркаса климатической камеры 1 (рис. 4.14) с помощью металлического крепежного устройства 7 к верхнему элементу этого каркаса в вертикальном направлении подвешен макет испытуемого нагельного соединения 2. Нижняя часть макета 2 с помощью крепежного элемента 6, аналогичного 7, соединена с нагрузочным рычагом 3, который свободно вращается в вертикальном направлении на оси 5, закрепленной на каркасе 1. Таким образом, нагрузочный рычаг 3 оказывается подвешенным к каркасу 1 камеры через крепежные устройства 6 и 7 и испытуемый образец 2. При установке на нагрузочный рычаг 3 нагрузочной площадки 4 и помещения на эту площадку грузов на испытуемый образец 2 начинает действовать растягивающее усилие, которое значительно превышает силу тяжести, создаваемой грузами из-за существенного различия длины плеч силы тяжести грузов и силы, действующей на испытуемый образец. Нагрузочная площадка 4 может перемещаться по длине рычага 3 и закрепляться в любом положении с помощью фиксирующего приспособления. Благодаря такой конструкции

лабораторной установки обеспечивается моделирование наиболее опасного механического воздействия (длительная работа на растяжение) и величины этого воздействия, соответствующего реальным условиям эксплуатации.

Экспериментальная лабораторная установка (рис. 4.14, 4.15) размещена на ровном бетонном полу и зафиксирована с помощью болтовых креплений с использованием забетонированных в полу анкеров. В качестве грузов используются чугунные блоки, каждый из которых имеет вес 20 кг. Изменением числа грузов на нагрузочной площадке можно изменять усилие, действующее на испытуемый образец. Кроме того, предусмотрена возможность плавного регулирования этого усилия посредством перемещения нагрузочной площадки по длине нагрузочного рычага.

В экспериментальных исследованиях использовались испытуемые образцы двух типов: макеты нагельных соединений на МЗП и болтового нагельного соединения. Конструкция испытуемых образцов представлена на рис. 4.16.

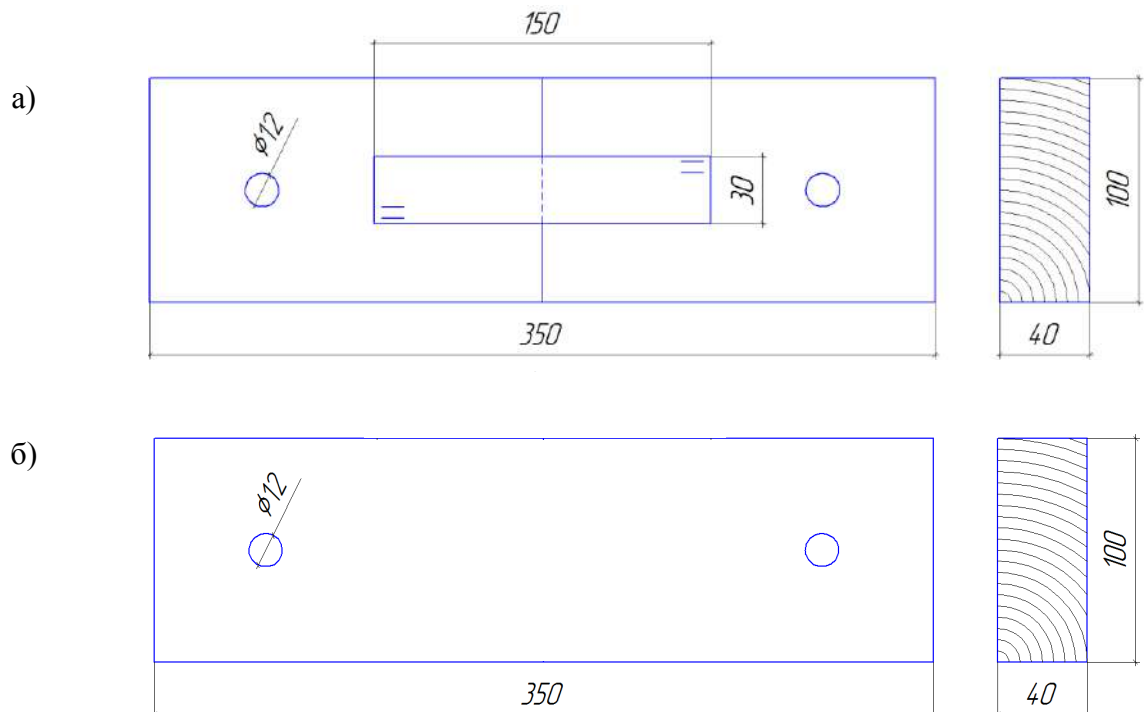


Рисунок 4.16. Конструкция испытуемых образцов: а – нагельное соединение на МЗП; б – болтовое нагельное соединение

Образцы (рис. 4.16) изготавливаются в масштабе реальных конструкций. Материал – сосна, береза. Для изготовления испытательных образцов используются, как минимум, два деревянных бруска соединенных на МЗП или с помощью стального болта. Размеры брусков – 175 x 100 x 40 мм. Влажность 7 %. Размеры МЗП – 150 x 30 x 1 мм. В брусках просверлены отверстия диаметром 12-15 мм для крепежных элементов, используемых в креплениях внутри испытательной камеры. В процессе испытаний на образцы действуют растягивающие усилия, как показано на рис. 4.17.

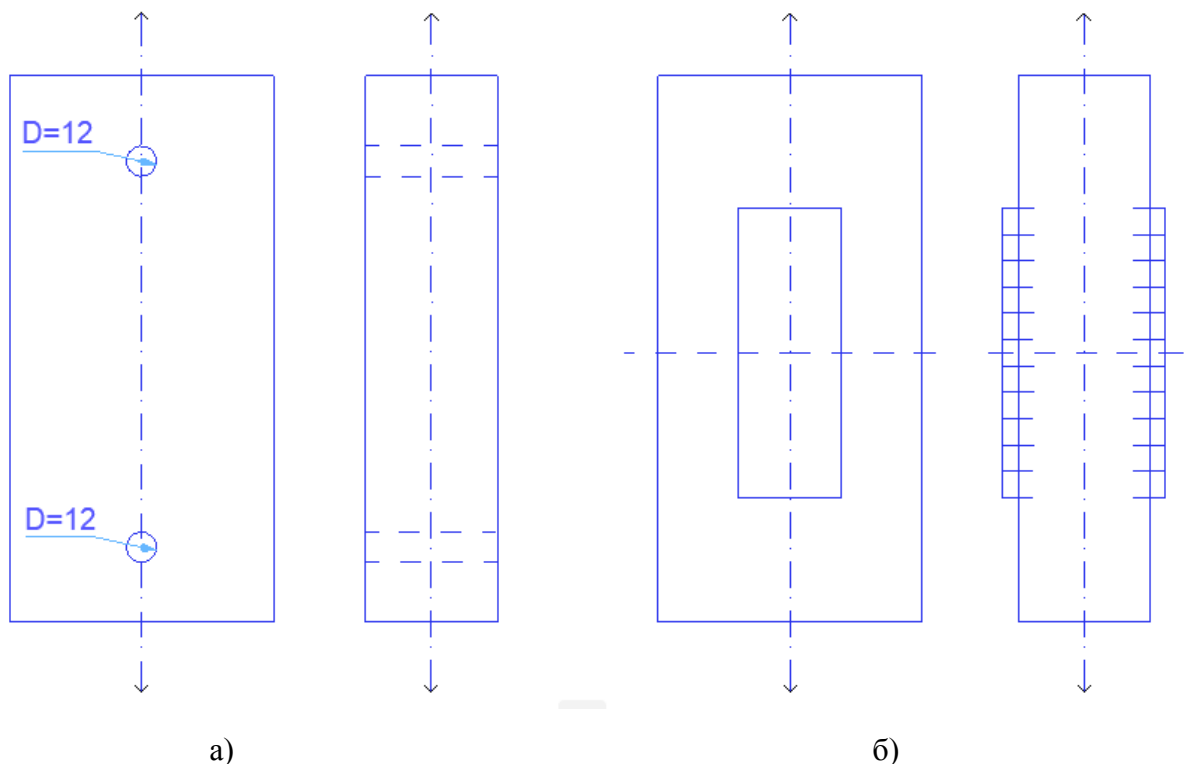


Рисунок 4.17. Схема испытания стыка деревянных конструкций на растяжение
а – болтовое соединение; б – нагельное соединение на МЗП

Для соединения испытуемого образца с каркасом камеры и нагрузочным рычагом используются стальные крепежные приспособления, конструкция которых показана на рис. 4.18.

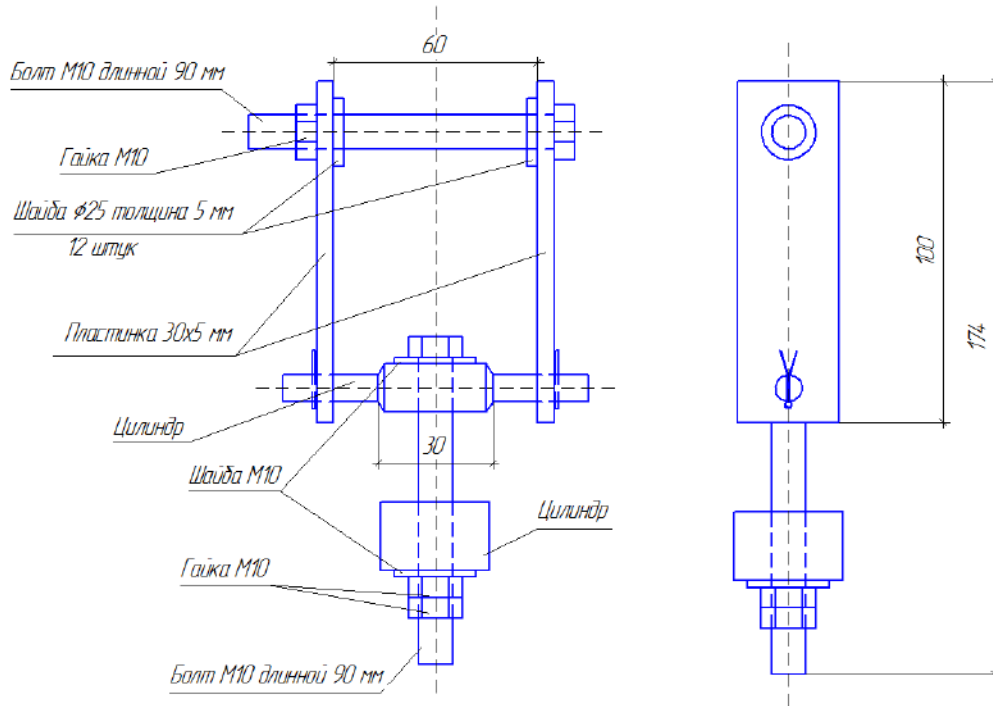


Рисунок 4.18. Конструкция стальных крепежных приспособлений (элементы 6, 7 на рис. 4.14)

Величина нагрузки, т.е. усилия растяжения, действующего на испытуемый образец, определяется из соотношения плеч нагрузочного рычага (рычага Архимеда) в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 4.19.

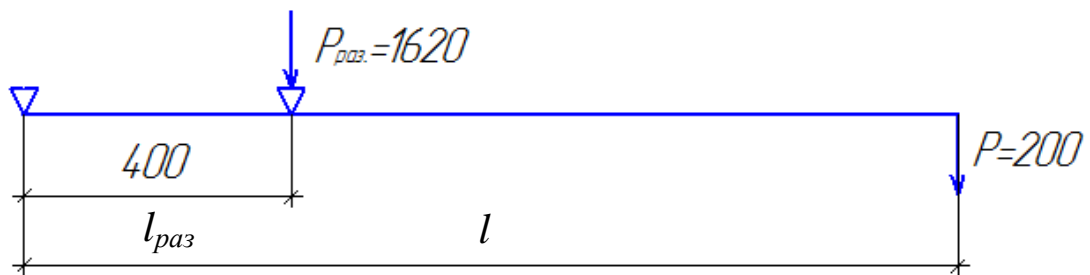


Рисунок 4.19. К определению длины рычага и сил в различных его точках

В качестве примера можно привести следующий расчет. При установке десяти блоков на грузовую площадку (рис. 4.14) вес груза составит $P = 10 \cdot 20 \text{ кг} = 200 \text{ кг}$. Как известно, для схемы, приведенной на рис. 4.19, справедливо следующее уравнение:

$$l_{раз} \cdot P_{раз} = l \cdot P, \quad (4.5)$$

где $P_{раз}$ – сила растяжения, действующая на испытуемый образец, под действием которой в конце концов образец будет разрушен в ходе эксперимента при циклических процессах тепломассопереноса в древесине образца внутри климатической камеры.

Исходя из уравнения (4.5), можно оценить величину этой силы, кгс:

$$P_{раз} = 3 \cdot T_1^{\ominus} = 3 \cdot 538,46 = 1615,38, \quad (4.6)$$

где $T_1^{\ominus} = 538,46$ кгс.

В результате появляется возможность определить длину плеча, м, силы P :

$$l = \frac{l_{раз} \cdot P_{раз}}{P} = \frac{0,4 \cdot 1615,38}{200} = 3,23. \quad (4.7)$$

Вполне очевидно, что, используя уравнение (4.5), можно решать и другие задачи: определять значения сил P и $P_{раз}$ при известных значениях l и $l_{раз}$, что позволяет настраивать необходимые режимы работы лабораторной установки (рис. 4.14, 4.15).

Перед испытанием к образцам должны быть прикреплены индикаторы (датчики) для измерения деформаций, как это показано на рис. 4.20.

Эти датчики имеют соединения с дисплеем за пределами камеры в целях отображения результатов измерений. Кроме датчиков для периодического измерения деформаций в ходе экспериментов можно использовать электронные штангенциркули (рис. 4.21) с точностью 0,01 мм.

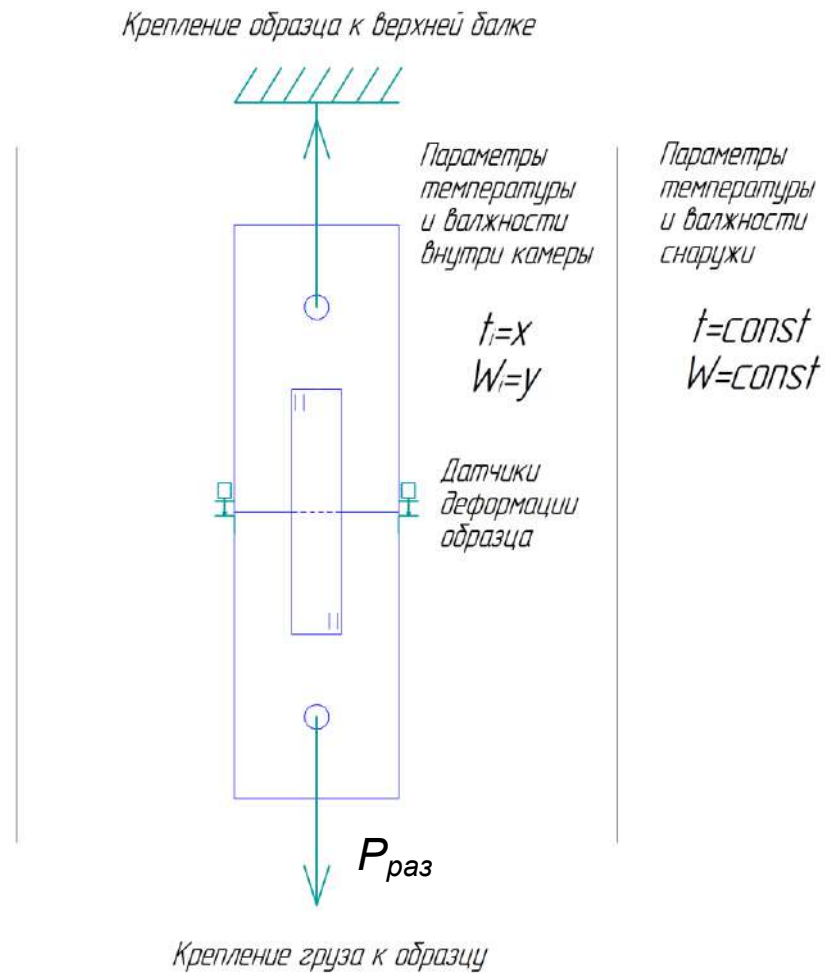


Рисунок 4.20. Расположение образца и датчиков его деформации в испытательной камере (на примере нагельного соединения с МЗП)



Рисунок 4.21. Электронный штангенциркуль

Для контроля параметров среды внутри климатической камеры (рис. 4.14, 4.15) используется метеостанция типа WMR112. Датчики этой станции

способны предоставить данные по влажности, температуре, давлению, скорости и направлению ветра, количеству осадков. Однако для лабораторной установки требуются только датчики влажности и температуры, которые расположены внутри камеры, и база станции снаружи (на нее выводятся все данные по указанным параметрам).

Кроме рассмотренного оборудования в экспериментах с применением климатической камеры используются следующие приборы и устройства:

- влагомер для определения влажности древесины образцов с погрешностью не более $\pm 2\%$;
- секундомер с точностью замера не хуже 1 с;
- тепловая пушка для создания необходимых параметров температуры и влажности внутри испытательной камеры.

Все используемое оборудование и инструменты должны были поверены в соответствующих метрологических центрах.

При проведении экспериментов с использованием лабораторной установки (рис. 4.14, 4.15) применяется следующая методика испытаний образца нагельного соединения.

1. Испытуемый образец устанавливается внутри климатической камеры, как показано выше. На камеру устанавливается обшивка, на грузовую площадку – груз необходимой величины.

2. С помощью тепловой пушки задаются необходимые параметры влажности и температуры внутри климатической камеры и их циклическое изменение во времени.

3. Испытание проводится по упрощенному режиму непрерывного нагружения без разгрузки. Суммарная приложенная нагрузка равняется разрушающей нагрузке $P_{раз}$.

4. В процессе эксперимента с постоянной нагрузкой фиксируют значения и периодически регистрируются параметры температуры и влажности, время испытания и деформации в образце.

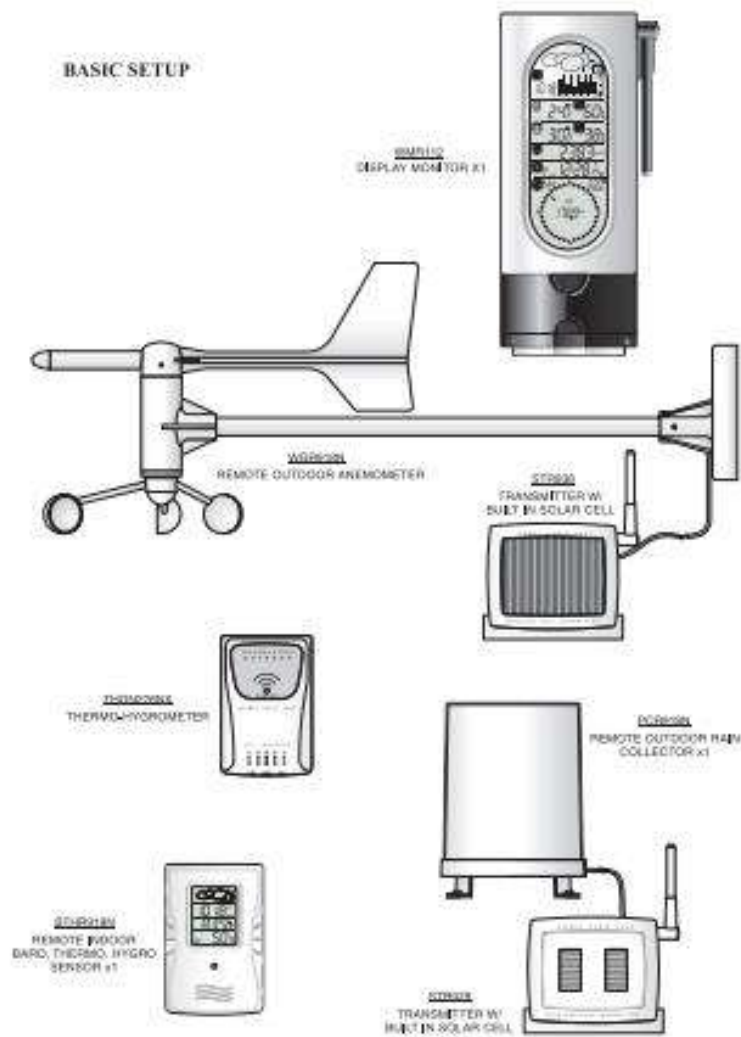


Рисунок 4.22. Комплектация метеостанции WMR112

5. В случае испытаний с непрерывно возрастающей нагрузкой также периодически фиксируется ее значение.

6. После разрушения образцов описывают характер разрушения соединения.

7. Процесс испытаний и характер разрушения следует также фиксировать путем фотосъемки для приложения фотографий к отчету об испытаниях.

8. Результаты эксперимента либо записываются вручную в рабочий журнал, либо регистрируются с помощью ПК. В последнем случае они автоматически обрабатываются и выводятся в виде таблиц и графиков.

При разработке лабораторной установки (рис. 4.14, 4.15 и 4.22) и методики экспериментальных исследований с использованием этой установки также учитывался многолетний опыт обследования и проведения испытаний

деревянных строительных конструкций и их узловых соединений различного назначения и конструктивного исполнения [39, 79, 134, 165-172].

4.6. Выводы по главе 4

На основании анализа сведений, представленных в настоящей главе, можно сделать следующие выводы.

1. Для экспериментов выбраны материалы (древесина), характерные для реальных строительных конструкций с нагельными соединениями. Для изготовления образцов нагельных соединений выбраны стальные элементы промышленного изготовления (МЗП, стальные болты), которые широко используются на практике. Рассмотрены основные характеристики используемых материалов и изделий, которые соответствуют нормативным документам.

2. Образцы нагельных соединений по своей конструкции и размерам соответствуют параметрам узловых элементов реальных строительных деревянных конструкций.

3. Для проведения экспериментальных исследований процессов теплопереноса в древесине нагельных соединений на лабораторной установке выбраны современные средства и оборудование, обеспечивающие высокую точность и достоверность результатов измерений.

4. Наиболее важной и оригинальной частью экспериментальных средств настоящей работы является специально разработанная и изготовленная лабораторная установка, предназначенная для экспериментального исследования характеристик нагельных соединений в условиях, максимально приближенных к реальным. Эта установка обеспечивает одновременное воздействие как механической нагрузки, так циклически меняющихся по заданному графику температурно-влажностных условий, что позволяет воспроизвести любые реальные эксплуатационные воздействия на нагельные соединения.

5. Перечисленные в предыдущих пунктах обстоятельства позволяют сделать вывод, что приняты все меры для получения не только достоверных, но и новых, оригинальных, не имеющих аналогов результатов по определению деформационных характеристик и ресурсных показателей нагельных соединений в процессе их эксплуатации. В частности, такие эксперименты позволят проверить важнейшее предположение теоретических разработок (гл. 2 и 3) о том, что циклические процессы увлажнения и высыхания древесины в сочетании с температурным фактором вызывают постепенное снижение механической прочности нагельного соединения вплоть до его разрушения.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В МАТЕРИАЛАХ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

5.1. Исследование состояний статики в системе «древесина – влажный воздух»

Все исследования выполнены по методике, изложенной в разд. 4.3. Для исследований выбраны образцы из сосны с площадью поверхности 10 см². 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 завершении опыта образцы взвесили, определили относительное изменение массы образцов (табл. 5.1), а растворы кислот оттитровали для определения изменения концентрации по методике, описанной в п. 4.2.3.

Таблица 5.1. 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 разд. 4.3.

Результаты исследований представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. 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. 5.1 показана зависимость увеличения массы образцов (рис. 5.2) от концентрации раствора серной кислоты.

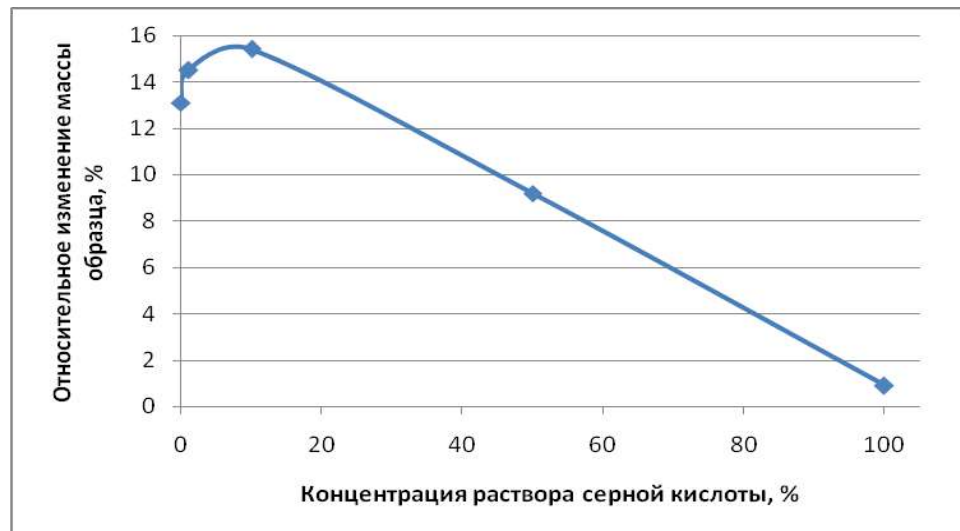
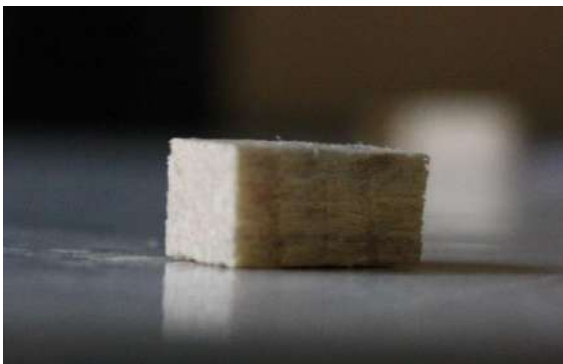


Рисунок 5.1. Изменение массы образца сосны

Очевидно, что в емкостях с более концентрированными растворами кислоты образцы поглощали меньше влаги, поэтому их масса увеличилась незначительно. Аномальное увеличение массы образцов сосны в 1 %-м и 10 %-м растворах серной кислоты объясняется наблюдавшимся на поверхности древесины образованием грибковых микроорганизмов (рис. 5.3), появляющихся вследствие повышенной относительной влажности воздуха.

После проведения испытаний образцы высушивались в сушильном шкафу до постоянной массы. Влажность древесины определяли по методике, описанной в разд. 4.3.

а)



б)



в)

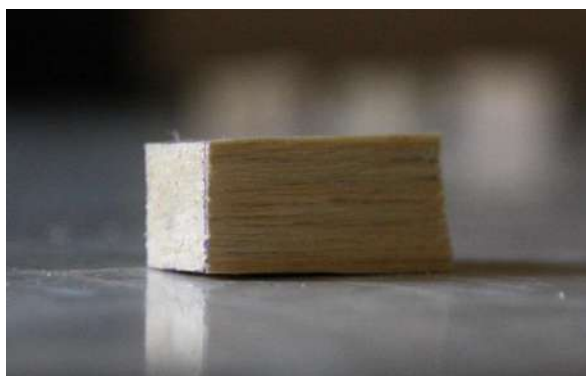


Рисунок 5.2. Снимки образцов из сосны после выдержки в атмосфере растворов серной кислоты с концентрацией: а - 10 %; б - 50 %; в - 100 %

Результаты расчетов занесены в табл. 5.3, а на рис. 5.4 приведены адсорбционные кривые образцов из сосны.



Рис. 5.3 Внешний вид образца из сосны после выдержки в атмосфере раствора серной кислоты с концентрацией 1 %

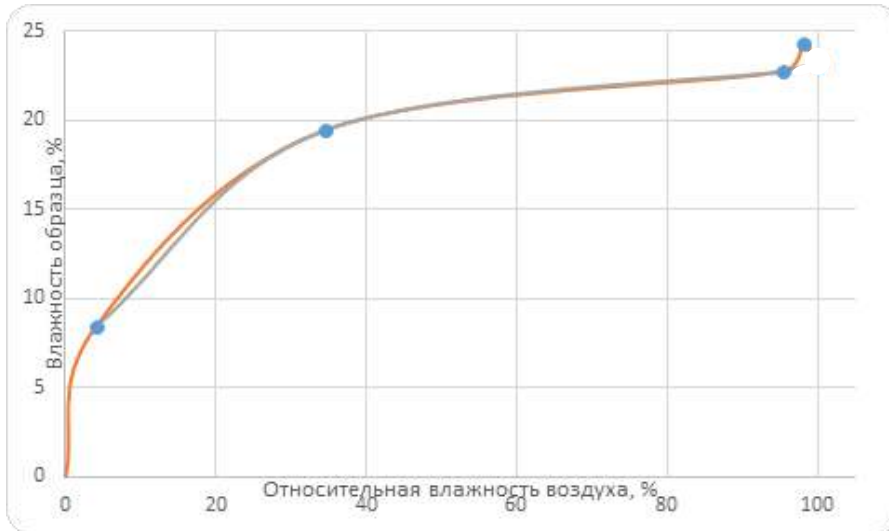


Рисунок 5.4. Абсорбционная кривая образца из сосны при температуре 20 °С

Таблица 5.3. 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

Влажность воздуха над растворами серной кислоты определялась по табл. 5.4 при температуре 20 °С [173].

На рис. 5.5 представлены абсорбционные кривые древесины при температурах 20 °С, 40 °С и 60 °С, построенные по данным диаграммы равновесной влажности древесины И.Н. Чулицкого (рис. 5.6) [46].

Анализ абсорбционных кривых, представленных на рис. 5.3 и рис. 5.5, показал, что полученные экспериментально значения влажности образцов из сосны больше теоретических в 4 и 3 раза для влажности воздуха 4 и 34,5 % соответственно. При значениях влажности выше 95 % разница в значениях теоретических и экспериментальных данных не превышает 1 %.

Сопоставляя результаты, приведенные на рис. 5.5 и 5.6, необходимо отметить ряд принципиальных моментов.

Узкий диапазон расхождения кривых на рис. 5.5 (изменение температуры воздуха с 20 °С до 60 °С, т.е. практически в 3 раза) приводит к изменению влажности образца от 100 % (при $\varphi=5$ %) до 10 % (при $\varphi=95$ %) во всем диапазоне исследования.

Таблица 5.4. Относительная влажность воздуха над водными растворами серной кислоты при температуре от 5 до 50 °С

Концентрация H_2SO_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	83	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

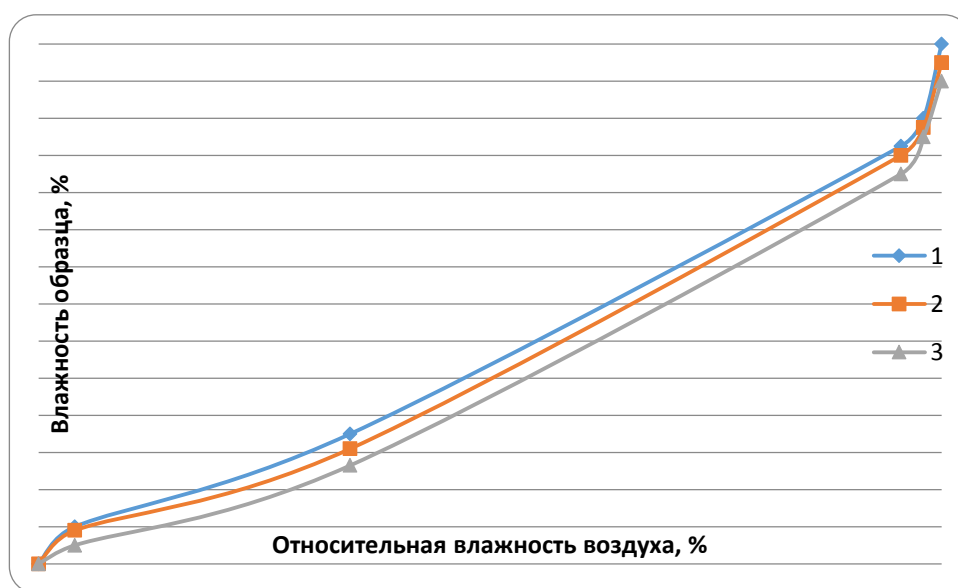


Рисунок 5.5. Адсорбционная кривая древесины по данным расчетов из диаграммы И.Н. Чулицкого при температуре: 1 – 20 °С; 2 – 40 °С; 3 – 60 °С

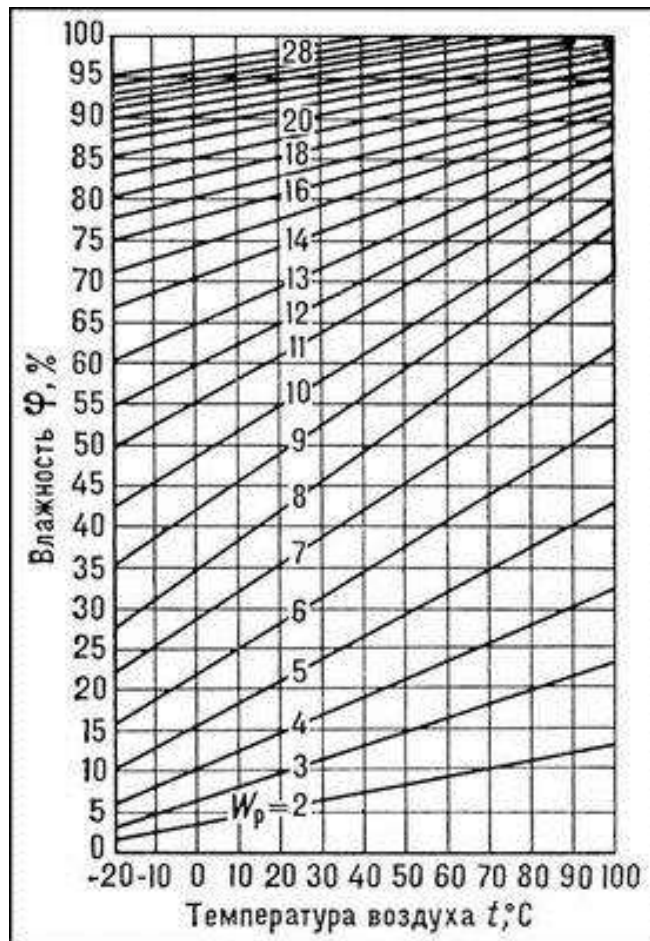


Рисунок 5.6. Диаграмма равновесной влажности древесины И.Н. Чулицкого [46]

Как известно по теории академика П.А. Ребиндера [49], характер адсорбционной кривой дает информацию о формах связи влаги с материалом. Данные рис. 5.5 показывают, что в условиях анализируемого примера в диапазоне $\varphi=0\dots5\%$ в образце из сосны происходит сорбция влаги по механизму мономолекулярной адсорбции. В диапазоне $\varphi\approx 5\dots 30\%$ происходит полимолекулярная адсорбция. А в диапазоне $\varphi\approx 35\dots 95\%$ сорбция влаги осуществляется по механизму капиллярной конденсации. Близкий к линейному характер кривых, представленных на рис. 5.6, указывает на превалирование механизма капиллярной конденсации.

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

5.2. Изучение динамики тепловых процессов с применением тепловизионной техники

Для проверки адекватности полученных решений (2.60) и (2.113), 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 [71, 125, 150, 172-176]. Схема и фотография установки представлены на рис. 5.7.

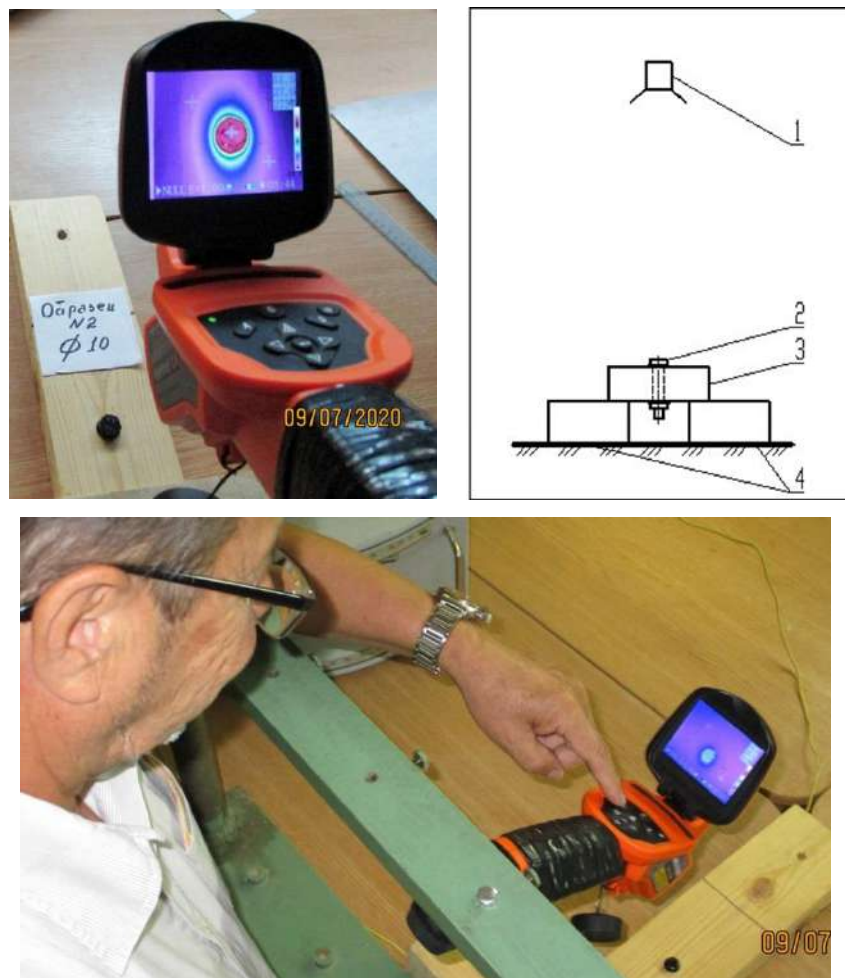


Рисунок 5.7. Экспериментальная установка и порядок работы на ней: 1 – тепловизор; 2 – болт М10; 3 – брусок 150×150×50 из сосны; 4 – опоры

Измерения проводились при температуре воздуха в помещении около 24 °С и относительной влажности воздуха 65 %, измерения полей температур тепловизором осуществлялись с шагом 10 минут. В результате были получены данные о распределении температуры по поверхности древесины (рис. 5.10, 5.11).

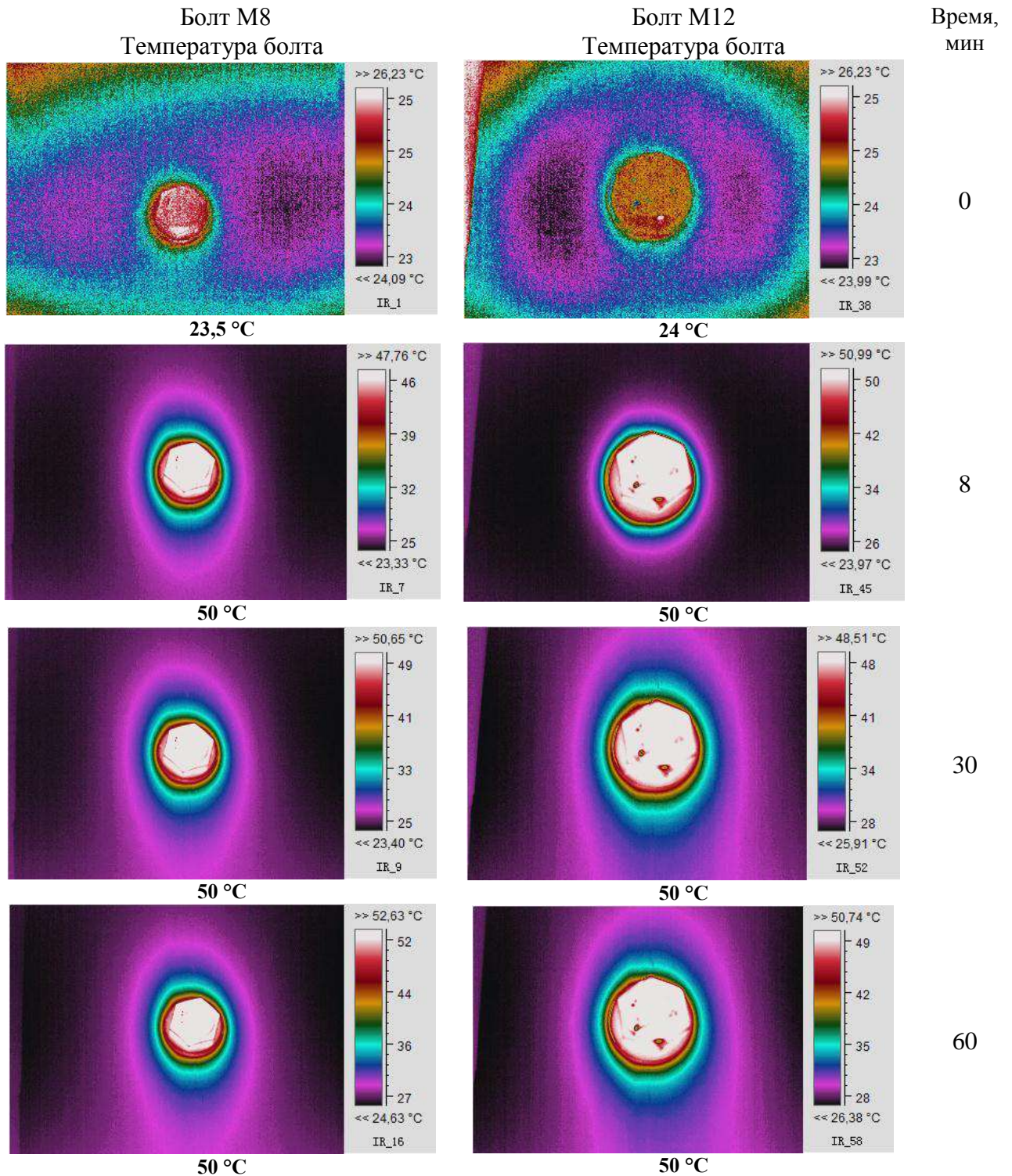


Рисунок 5.8. Инфракрасные изображения нагельного соединения после нагрева болта до постоянного значения температуры в различные моменты времени: волокна древесины направлены вертикально

Интересно отметить, что характер полученных экспериментальных кривых (рис. 5.10) практически точно совпадает с кривыми, полученными на рис. 2.6а, моделирующем физическую картину процессов теплопереноса в древесине нагельного соединения. Очевидно, что падение температуры вблизи болта сопровождается прогревом внутренних слоев вследствие действия градиента температурного поля.

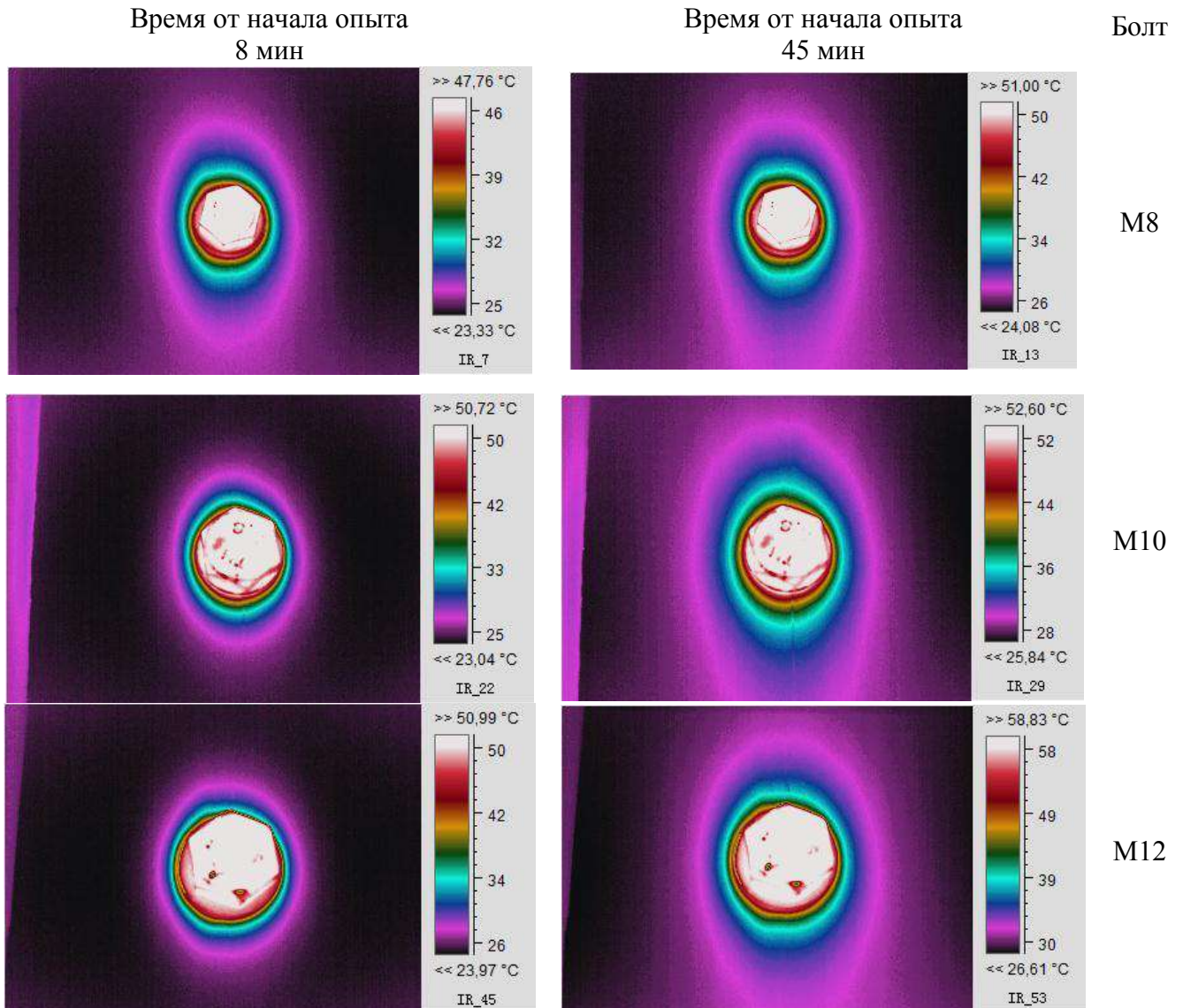


Рисунок 5.9. Влияние диаметра болта на характер температурного поля в характерные моменты времени: температура болта – 50 °C; волокна древесины направлены вертикально

В работе [102] приведены результаты численного расчета полей температуры в прилегающих к болту слоях древесины при повышении температуры болта на 1,5 К/ч (рис. 5.10).

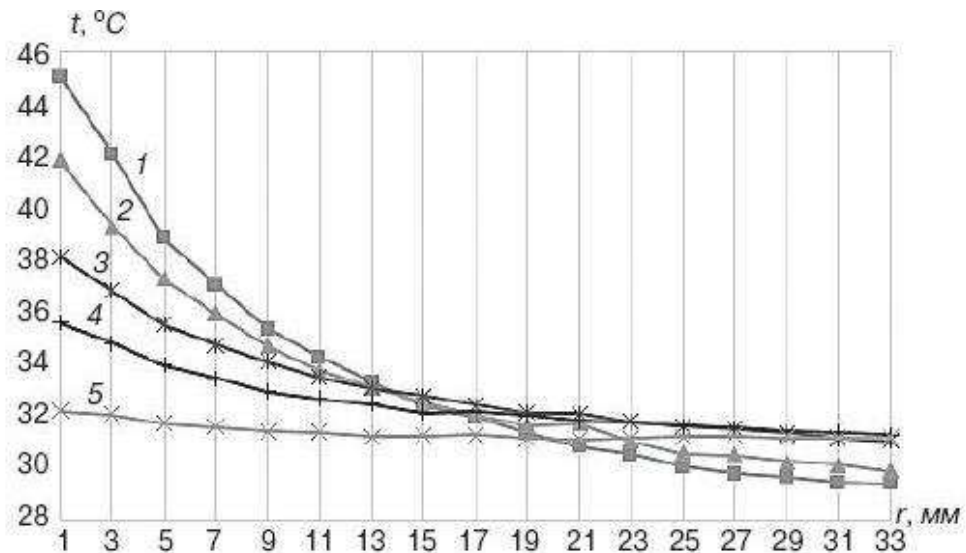


Рисунок 5.10. Кривые нагрева древесины по направлению волокон: 1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 20 мин; 4 – 30 мин; 5 – 60 мин

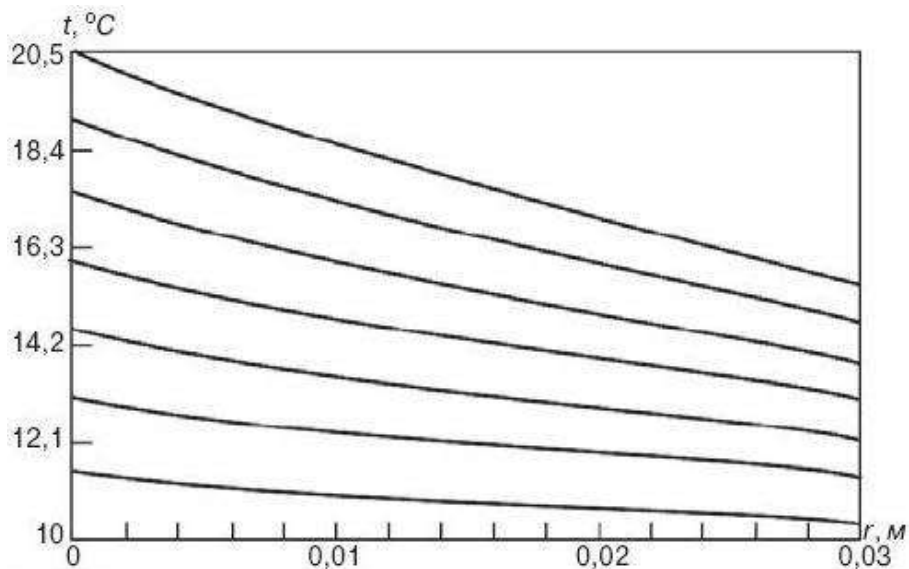


Рисунок 5.11. Результаты расчетов теплопереноса в нагельном соединении в физических переменных

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

Кроме того, с помощью фотографий, представленных на рис. 5.8 и 5.9, были получены зависимости изменения во времени температуры древесины на различном удалении от оси болта при постоянной температуре болта 50 °С, которые приведены на рис. 5.12. Расчетные кривые (рис. 5.12) построены с использованием расчетных зависимостей, приведенных на рис. 2.9 и 2.10.

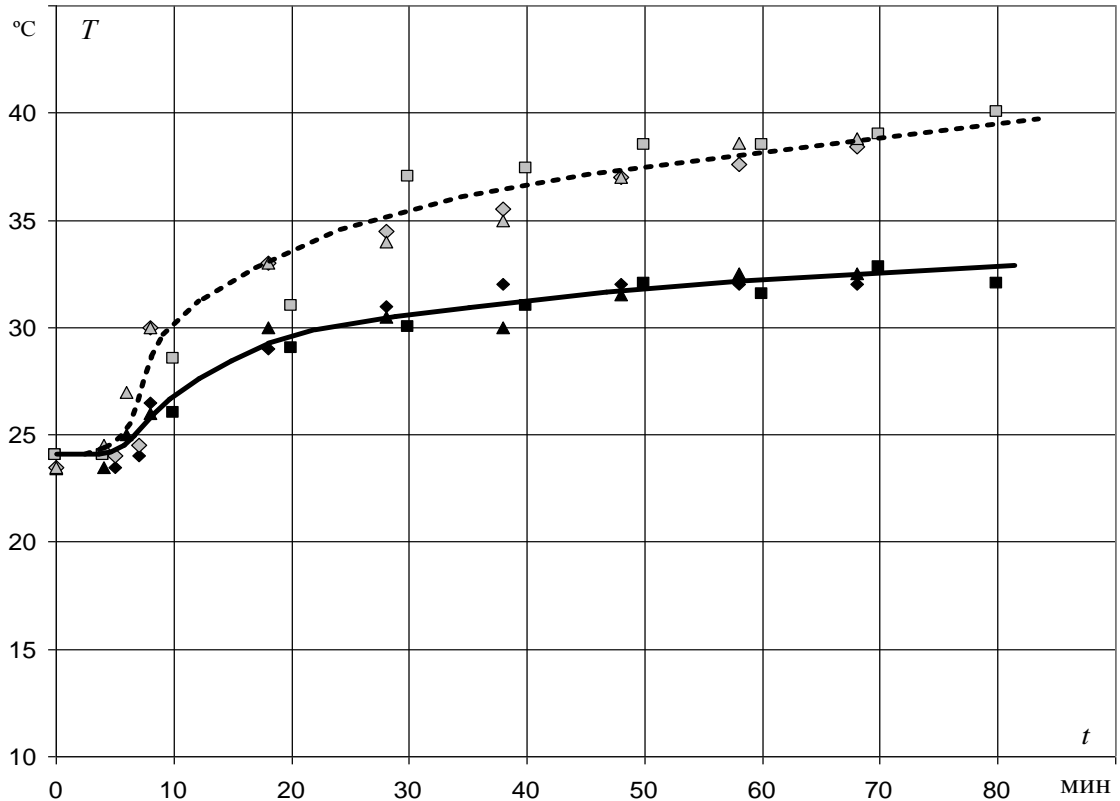


Рисунок 5.12. Изменение температуры на поверхности древесины образца нагельного соединения на расстоянии 1,5 диаметра болта от его оси: точки – эксперимент; линии – расчет для случая болта M12; сплошная линия и темные точки – в направлении поперек волокон древесины; пунктирная линия и светлые точки – вдоль волокон; форма точек: ромбы – болт M8; квадраты – болт M10; треугольники – M12

Как следует из рис. 5.12, для тех условий, которым соответствуют эти результаты, величина диаметра болта практически не оказывает влияния на характер изменения температуры: можно считать, что для всех трех значений этого параметра получены общие зависимости. Одновременно следует отметить хорошее согласование результатов расчета и эксперимента, что служит подтверждением достоверности математической модели теплопереноса в болтовых нагельных соединениях (гл. 2). Кроме того, полученные результаты являются подтверждением значительной анизотропии древесины, о наличии которой отмечается в гл. 1. Действительно, прогрев материала вдоль волокон протекает значительно более высокими темпами, о чем свидетельствует взаимное расположение пунктирной и сплошной линий (рис. 5.12).



Рисунок 5.13. Внешний вид экспериментальной установки, экспериментальных образцов для изучения динамики температурных полей в нагельных соединениях на МЗП

Аналогичные исследования были проведены также с использованием нагельного соединения на МЗП [125,127,128,143,150,167,170,177], внешний вид установки во время опыта и конструкция образца представлены на рис. 5.13. В процессе опыта температура МЗП также поддерживалась на неизменном уровне $+ 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

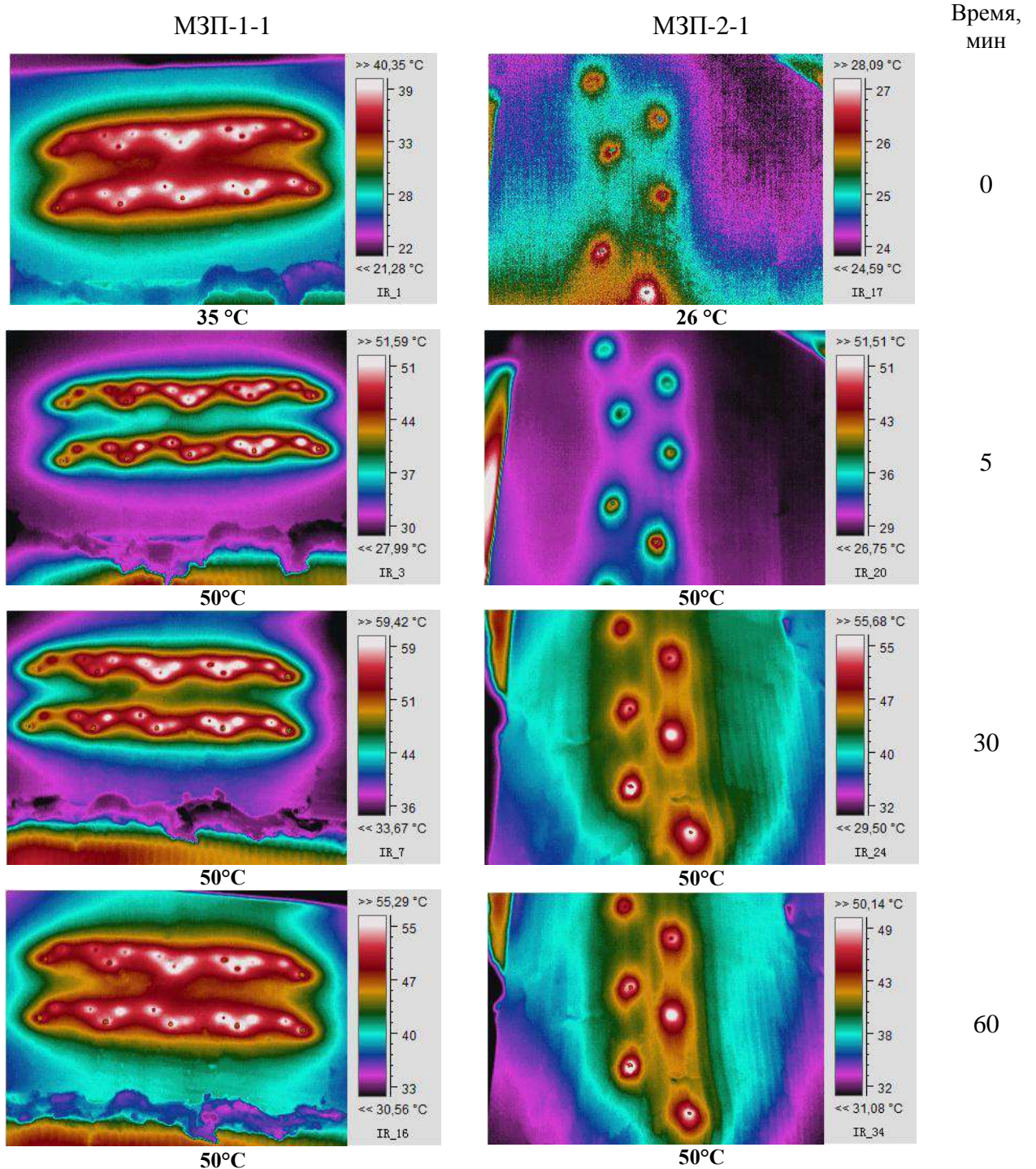


Рисунок 5.14. Динамика температурного поля в нагельных соединениях с МЗП во времени при постоянном значении температуры пластины

Регистрация температурного поля с помощью тепловизора производилась со стороны, противоположной расположению пластины, т.е. с той стороны деревянной детали, где кончики зубьев МЗП достигли поверхности (рис. 5.13).

Характерные фотографии температурных полей, полученные в опытах, представлены на рис. 5.14.

На рис. 5.15 представлены результаты эксперимента, полученные в опыте и путем расчета с использованием зависимостей, представленных на рис. 3.9÷3.11, по изменению температуры древесины во времени в характерной точке: посередине прямой между кончиками двух соседних зубьев.

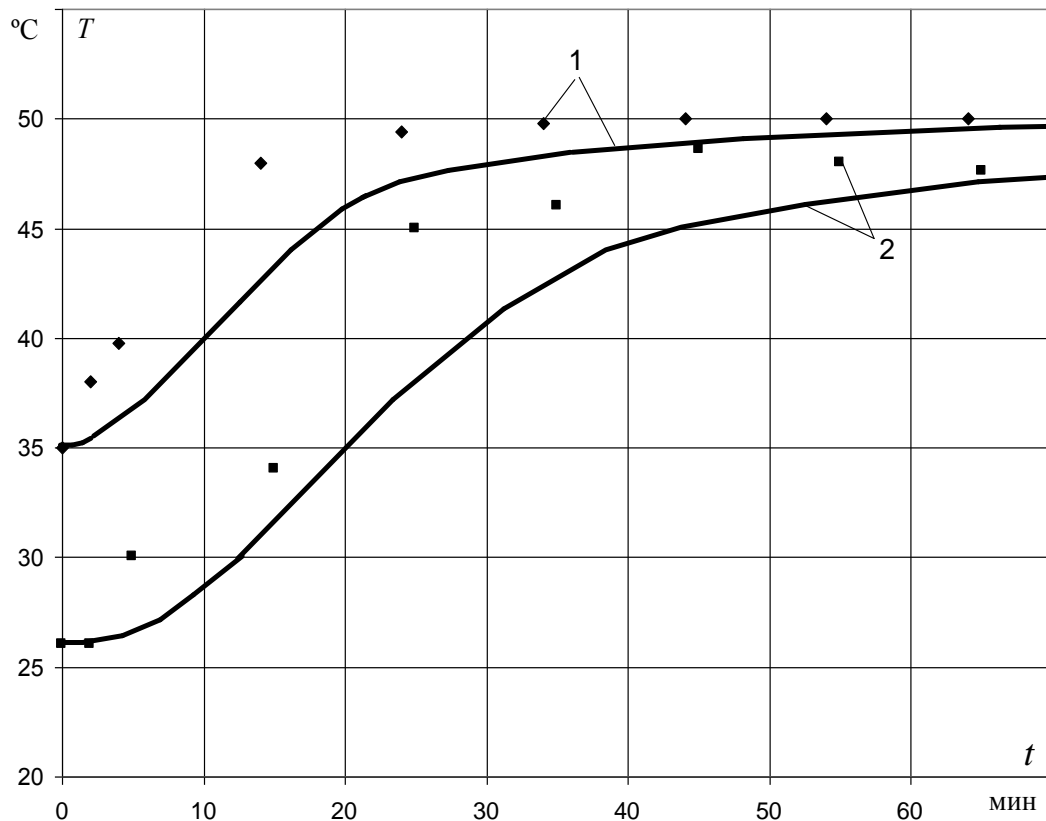


Рисунок 5.15. Зависимость температуры от времени в характерной точке образцов нагельных соединений на МЗП (посередине прямой между кончиками двух соседних зубьев): 1 – МЗП-1-1; 2 – МЗП-2-1; точки – эксперимент, линии – расчет

Как можно заключить из рис. 5.15, изменение температуры в эксперименте имеет качественно одинаковый вид с расчетными кривыми, что служит подтверждением адекватности математической модели (гл. 3) реальным физическим процессам. Однако в эксперименте температура нарастает более высокими темпами. Это можно объяснить тем, что опытные образцы (рис. 5.13) не полностью соответствуют реальной конструкции нагельного соединения. Они представляют собой лишь часть реальной детали, в которой удалена часть древесины по уровню расположения кончиков зубьев МЗП и фактически заменена воздухом. Поскольку теплоотдача в воздух

меньше, чем в древесину, материал (древесина) в опытном образце прогревается быстрее, что нашло отражение на рис. 5.15. Следует отметить, что с течением времени экспериментальные и расчетные зависимости сходятся и практически совпадают.

Вместе с тем для проведения эксперимента, приближенного к реальным процессам, происходящим в нагельном соединении строительной деревянной конструкции, необходимо знать, как изменяется температурно-влажностный режим ее эксплуатации. Это можно отнести, например, к чердачным помещениям, где также необходимо знать температуру поверхности кровельного листа, которая в летние месяцы может существенно превышать температуру окружающего воздуха, а зимой практически равна ей.

За рубежом проводились эксперименты по изучению температурно-влажностного режима чердачного помещения в натуральных условиях в течение длительного периода. В качестве примера можно привести работы [178, 179]. В отечественной научной литературе такие экспериментальные данные не представлены. Для изучения реальных условий эксплуатации нагельных соединений в климатических условиях Российской Федерации требуется проведение натурного эксперимента по изучению изменения температурно-влажностного режима различных строительных конструкций и их элементов в течение всего года [38, 60, 77, 127, 136, 139, 165, 180, 181]. Для решения этой задачи необходимо наличие автоматизированных систем регистрации таких характеристик [182], один из вариантов которой рассмотрен в гл. 6.

5.3. Исследование динамики и кинетики процессов влагопереноса

Как уже отмечалось ранее, древесина представляет собой экологически чистый волокнистый материал органического происхождения, стойкий к воздействию химически агрессивных сред и обладающий хорошими теплоизоляционными свойствами [1, 2, 4, 33, 35, 57, 183]. 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 [52, 15, 37, 43, 45, 48, 50, 51, 52, 93].

Для определения влажности обычно используют метод высушивания, описанный в п. 4.2. 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 [184].

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 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 экспериментальной установки показана на рис. 5.16. 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 (рис. 5.17÷5.19). Результаты экспериментальных исследований измерения влажности древесины показаны на рис. 5.20 в виде кинетических кривых увлажнения образца.

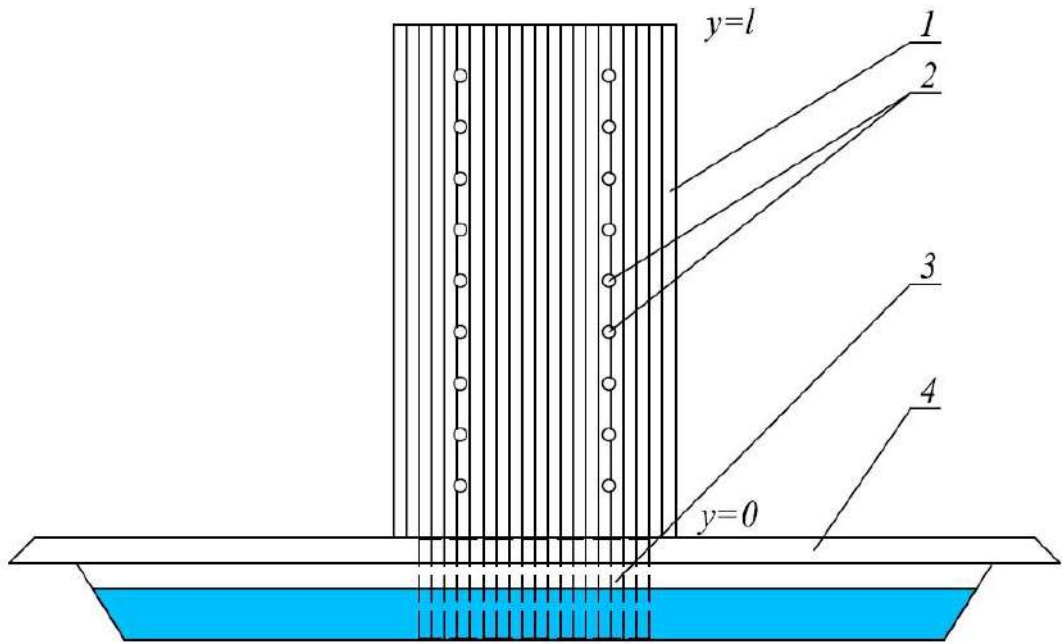


Рисунок. 5.16. Схема экспериментальной установки: 1 – исследуемый образец; 2 – места установки игл влагомера; 3 – влажный образец; 4 – ёмкость с водой

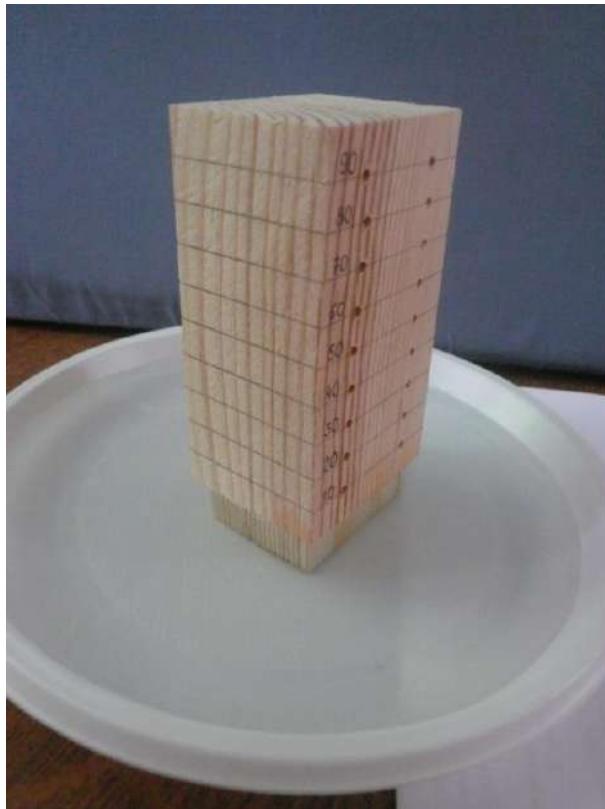


Рисунок 5.17. Начало испытания образца



Рисунок 5.18. Образец через 1 час после начала проведения эксперимента



Рисунок 5.19. Образец № 1 через 96 часов после начала проведения эксперимента

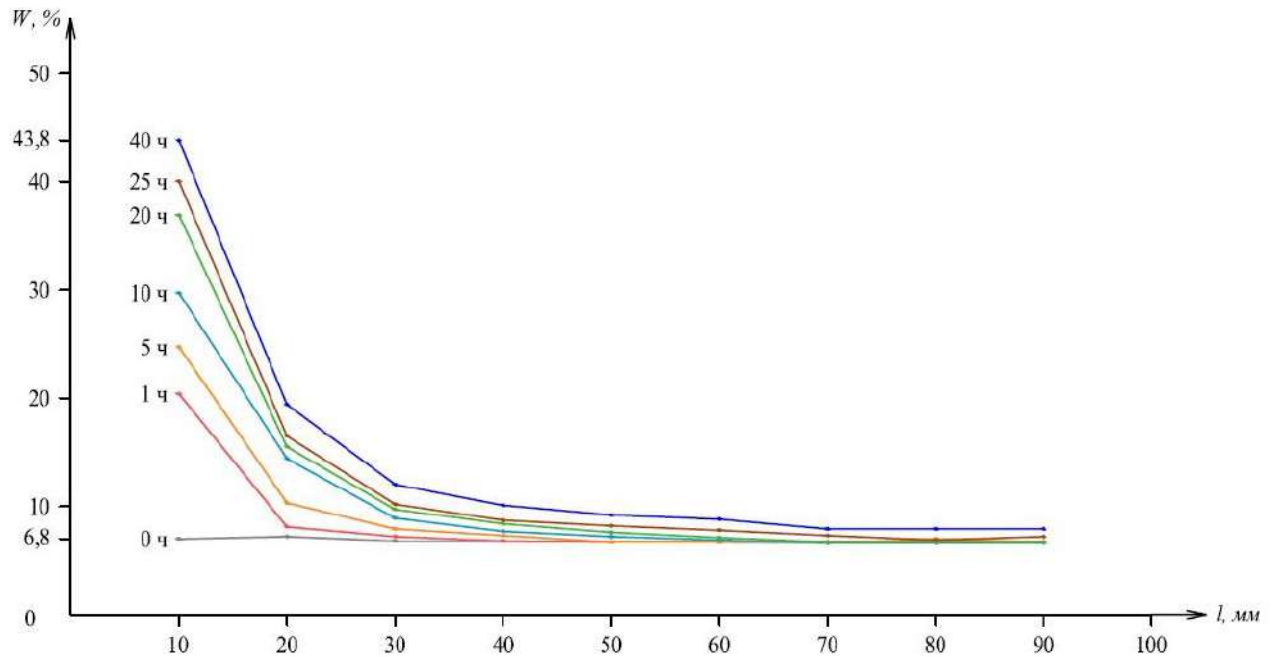


Рисунок 5.20. Влажность древесины на расстояниях 10÷90 мм от нижнего края образца

На основании показаний температуры и относительной влажности воздуха внутри помещения определили равновесную влажность образца по диаграмме Н.Н. Чулицкого [46], которая составила 9,2 %. Первоначальная влажность образца, определенная с помощью влагомера, была ниже данного значения, что, в принципе, возможно, учитывая размеры образца [185]. Это значение составило: $W_p = 6,8 \%$.

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 [184], 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 [46]. Из 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, через 40 часов после начала проведения испытания. Дальнейшие показатели влажности были существенно ниже. Это значение и было принято в качестве максимального гигроскопического – $W_{мг}$.

Некоторые результаты расчета по выражению (2.138) для рассматриваемого образца древесины приведены на рис. 5.21. Кривые рисунка иллюстрируют изменение влажности по координате \bar{y} в безразмерном виде.

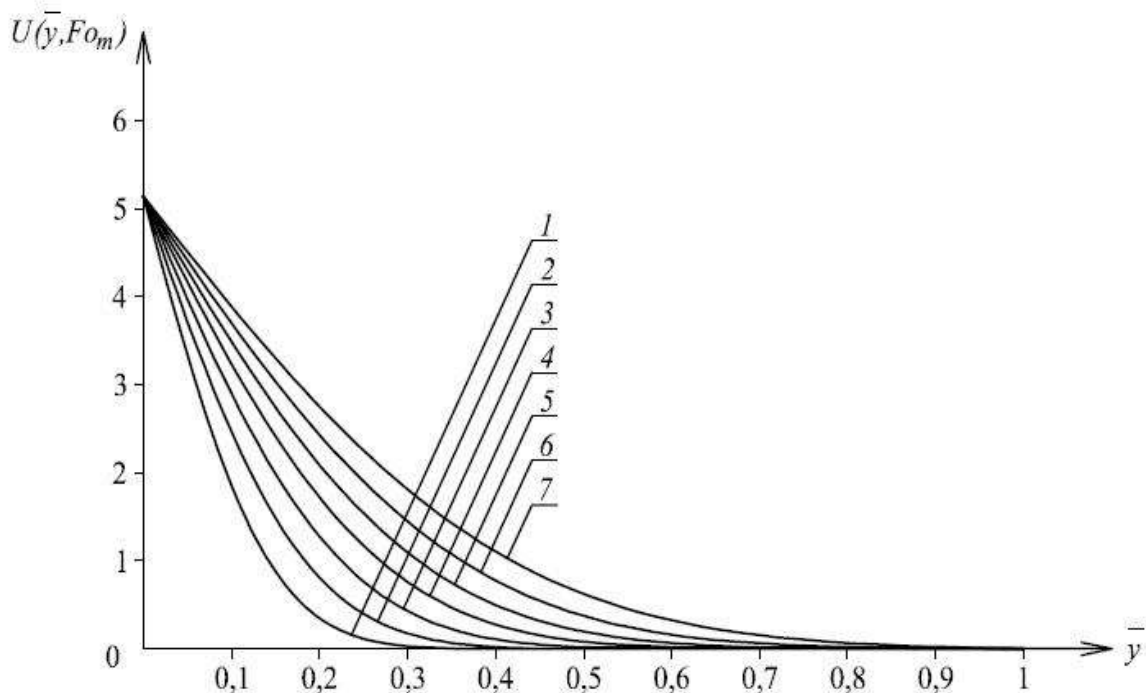


Рисунок 5.21. Динамика полей безразмерных влагосодержаний при значениях массообменного критерия Фурье F_{Om} : 1 – 0,006; 2 – 0,01; 3 – 0,015; 4 – 0,0215; 5 – 0,029; 6 – 0,0388; 7 – 0,052

По разработанной выше математической модели методом решения обратной задачи массопроводности было определено значение коэффициента влагопроводности древесины по следующей формуле [38, 101-104, 149, 150]:

$$k = \frac{Fo_m \cdot l^2}{\tau} \quad (5.1)$$

В формуле (5.1) 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-волокнистых материалов (максимальной гигроскопической и равновесной влажности, коэффициента влагопроводности). Принципы методики могут быть использованы для исследования массопроводных характеристик волокнистых, тканых и нетканых материалов не только для текстильной и легкой промышленности, но также пищевой, строительной и других отраслей [101-104, 149, 186].

5.4. Исследование деформационных характеристик нагельных соединений при циклических процессах увлажнения и высыхания древесины в условиях напряженно-деформированного состояния

Как было показано в гл. 4, наибольший научный и практический интерес представляют результаты испытания образцов нагельных соединений с использованием разработанной и изготовленной оригинальной лабораторной установки (разд. 4.5). Действительно, она позволяет изучать характеристики этих узлов при воздействии реальных эксплуатационных воздействий: циклическое изменение климатических факторов при наличии постоянных механических нагрузок [113, 127, 139, 172, 180, 181, 187]. Среди этих характеристик важное место занимают показатели деформации нагельных соединений, поскольку они могут быть использованы как показатели их

состояния и возможности дальнейшей эксплуатации [66, 70, 71, 120, 161, 162, 167, 184, 188, 189].

В целях получения таких характеристик выполнено несколько серий испытаний нагельных соединений на МЗП. На рис. 5.22 показаны образцы нагельного соединения такого типа, использованные в экспериментах.



Рисунок 5.22. Образцы нагельных соединений на МЗП типа МЗП-1,0, подготовленные для проведения экспериментов

Эти образцы поочередно устанавливались в климатическую камеру испытательной установки (разд. 4.5), с которой предварительно была снята часть обшивки для удобной работы. Верхняя часть образца с помощью стального крепежного устройства присоединялась к раме климатической камеры, а нижняя таким же способом соединялась с нагрузочным рычагом. Внешний вид образца, установленного в камере, представлен на рис. 5.23.

Затем на образец крепились датчики для регистрации деформации образца в процессе испытаний. После этого восстанавливалась обшивка климатической камеры, а на грузовую площадку нагрузочного рычага устанавливался груз необходимой величины для получения испытательной разрушающей нагрузки $T_1^{\partial} = 538,46$ кгс (разд. 4.5). Внешний вид

лабораторной установки представлен на рис. 5.24. Рядом с климатической кабиной расположен рабочий стол с установленным на нем компьютером, на который поступает информация от датчиков, находящихся в кабине.

Некоторые сведения вносились вручную, и вся информация обрабатывалась и представлялась в виде таблиц и графиков.

Основной способ проведения экспериментов заключался в том, что в климатической камере поддерживалась постоянная температура и циклически изменялась влажность воздуха: на первом этапе она повышалась до 100 %. Естественно, на данном этапе влажность древесины образца в месте расположения МЗП достигала наибольшего значения. Затем наступал период снижения влажности, т.е. высыхания древесины, после чего циклы увлажнения и высыхания повторялись при неизменной температуре среды внутри климатической камеры. Такое циклическое изменение влажностных условий повторялось до тех пор, пока не происходило разрушение нагельного соединения. В экспериментах использовали три значения температуры внутри камеры: 20, 40 и 60 °С. Характерный внешний вид образцов, разрушенных к концу таких экспериментов, представлен на рис. 5.25.



Рисунок 5.23. Внешний вид установленного в рабочее положение образца нагельного соединения на МЗП с расположенными на нем датчиками деформации перед началом эксперимента



Рисунок 5.24. Внешний вид лабораторной установки с различных позиций

Все разрушения происходили в результате вырывания зубьев МЗП из толщи древесины либо верхней части образца, либо нижней, а иногда из обеих частей одновременно. С другой стороны, их ресурсные показатели в реальных условиях эксплуатации изучены недостаточно [29, 141]. Для исследования болтовых нагельных соединений был проведен лишь один эксперимент по такой же методике, как и в случае изучения нагельных соединений на МЗП. Как показал анализ полученных результатов, этого оказалось вполне достаточно для того, чтобы сделать необходимые теоретические и практические выводы.

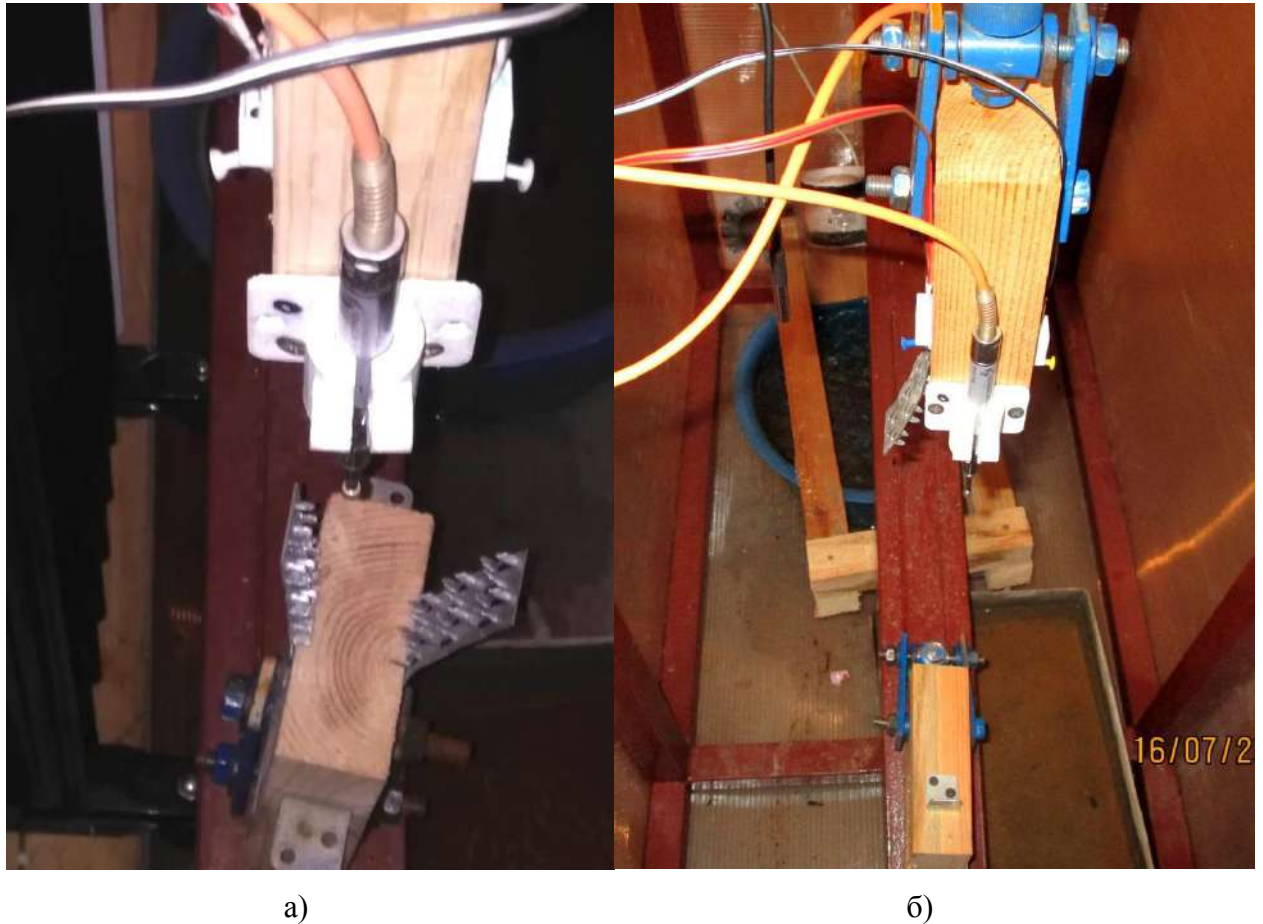


Рисунок 5.25. Характерные разрушения образцов нагельных соединений на МЗП:
 а – разрушение в результате вырывания зубьев МЗП из древесины верхней части образца, б – разрушение в результате вырывания зубьев МЗП из нижней части (левая пластина) и одновременного вырывания из верхней и нижней частей (правая пластина)

На рис. 5.26 показаны крепление образца болтового нагельного соединения и внешний вид этого образца после разрушения. Разрушение древесины произошло в результате напряжения скалывания. Причем это скалывание имеет двухсторонний характер, в результате чего был вырван кусочек древесины, толщина которого приблизительно равна диаметру болта. В результате этого болт практически свободно вышел из своего отверстия и нагельное соединение перестало функционировать.



а)

б)

Рисунок 5.26. Внешний вид образца болтового нагельного соединения в собранном виде перед установкой в климатическую камеру для проведения испытаний (а) и характер разрушения этого образца в ходе эксперимента (б)

В ходе экспериментов наряду с упомянутыми параметрами регулярно производились измерения влажности древесины W , %, испытываемых образцов с помощью прибора Hydromette НТ 85 Т (разд. 4.2), как показано на рис. 5.27. При этом результат определялся как среднее значение нескольких измерений в различных точках поверхности.

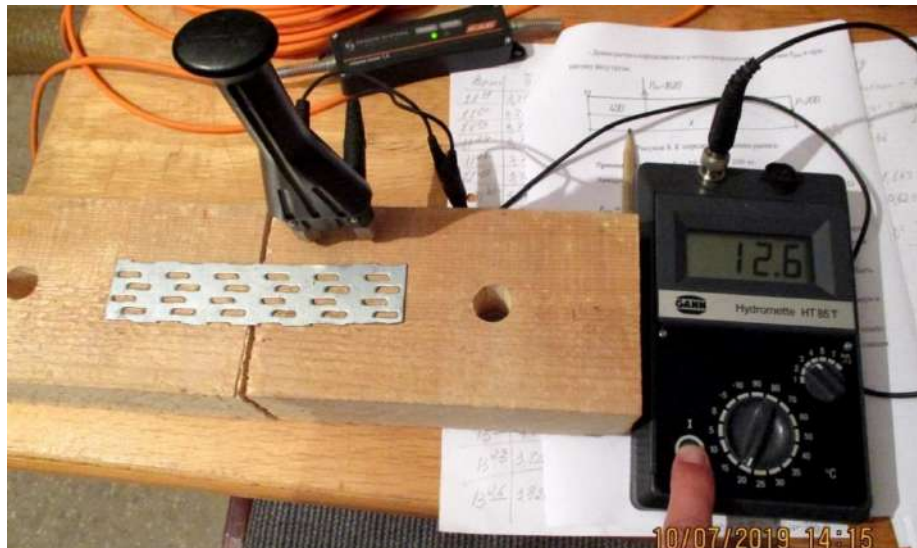


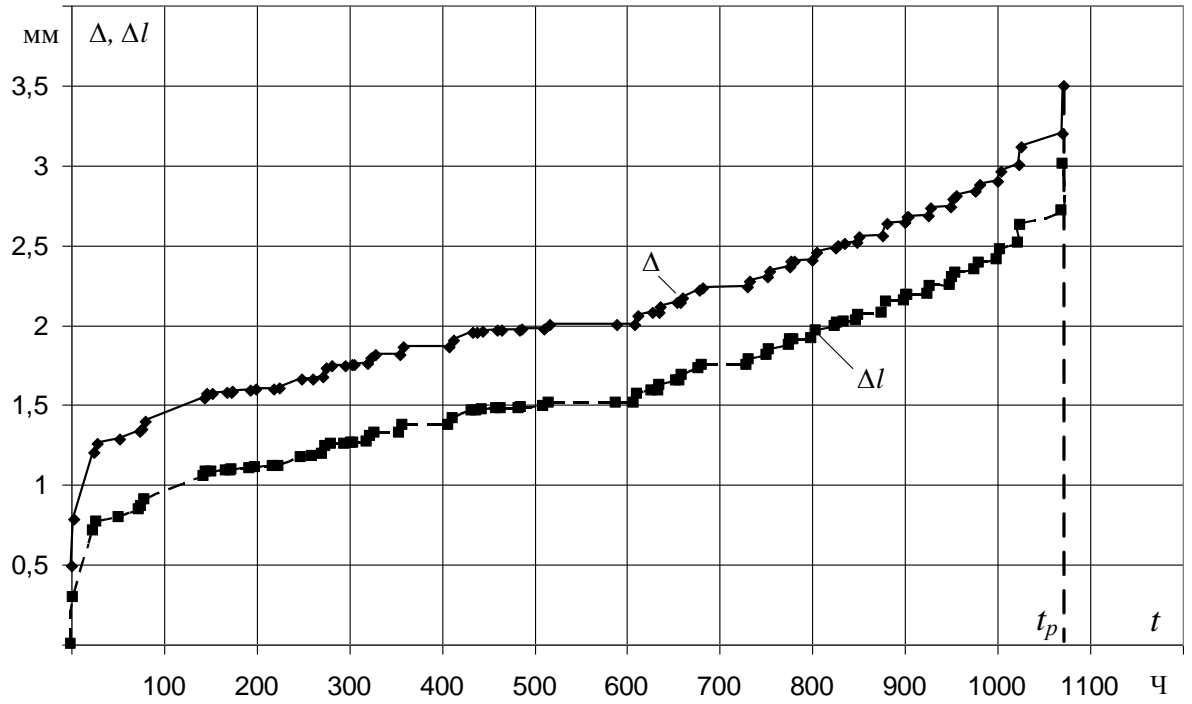
Рисунок 5.27. Измерение влажности W , %, древесины испытуемого образца прибором Hydromette HT 85 T. На фото показан момент времени, когда производится измерение влажности древесины образца нагельного соединения на МЗП перед установкой его в климатическую камеру для последующих испытаний

Таким образом, окончательное значение влажности представляет собой усредненную величину по поверхности и в глубину на 1 см.

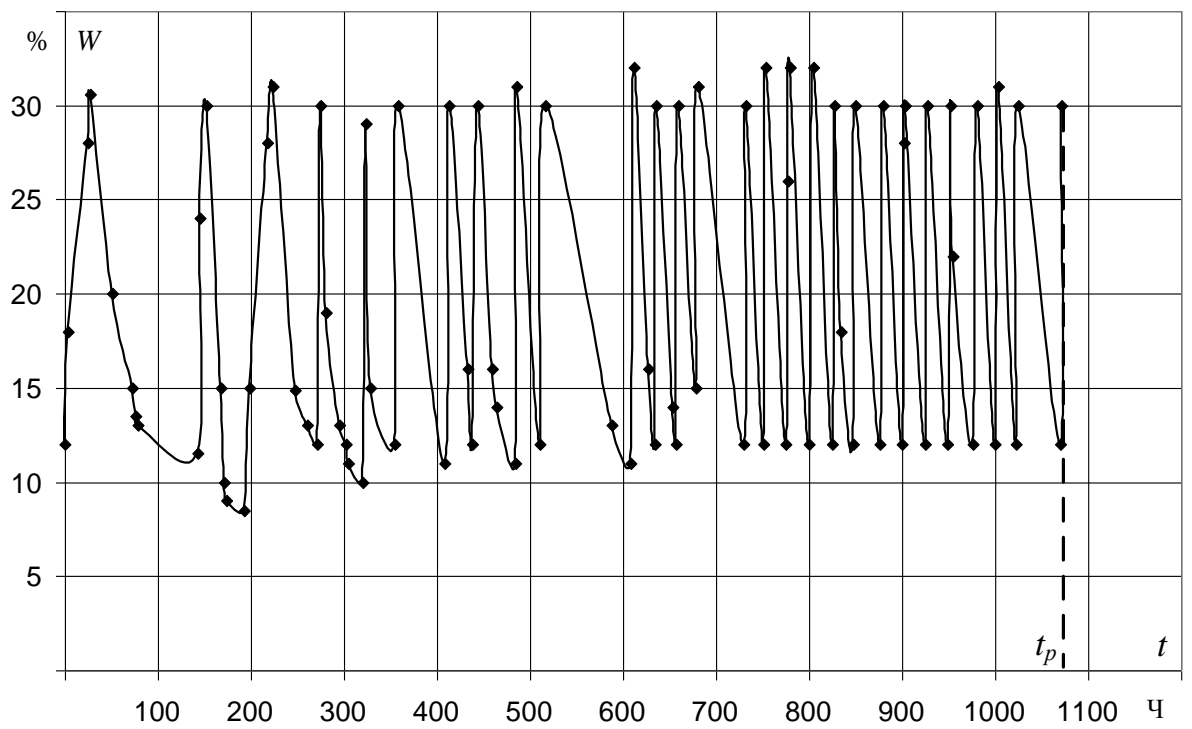
Все результаты выполненных экспериментов представлены в табличном виде и приведены в ПРИЛОЖЕНИИ А.

Анализ этих сведений позволяет сделать вывод, что во всех сериях испытаний образцов нагельных соединений наблюдалась их постепенная деформация, которая заключалась в том, что под действием растягивающей нагрузки происходило увеличение зазора между деревянными частями соединения, скрепленными между собой МЗП.

На рис. 5.28 представлены характерные деформационные зависимости испытанных образцов нагельных соединений на МЗП, полученные в опыте при температуре 20 °С. Там же показана кривая колебания влажности древесины, полученная в этом опыте. На рис. 5.29 приведены аналогичные зависимости для случая, когда температура в климатической камере уже имела величину 60 °С.



а)



б)

Рисунок 5.28. Динамика: а) абсолютной деформации Δ и приращения деформации $\Delta l = \Delta - \Delta_{\text{нач}}$, где $\Delta_{\text{нач}}$ – абсолютная деформация в начальный момент времени $t = 0$; б) относительной влажности древесины W в процессе попеременного увлажнения и высушивания древесины при 20 °С; t_p – момент разрушения образца нагельного соединения (его «время жизни»)

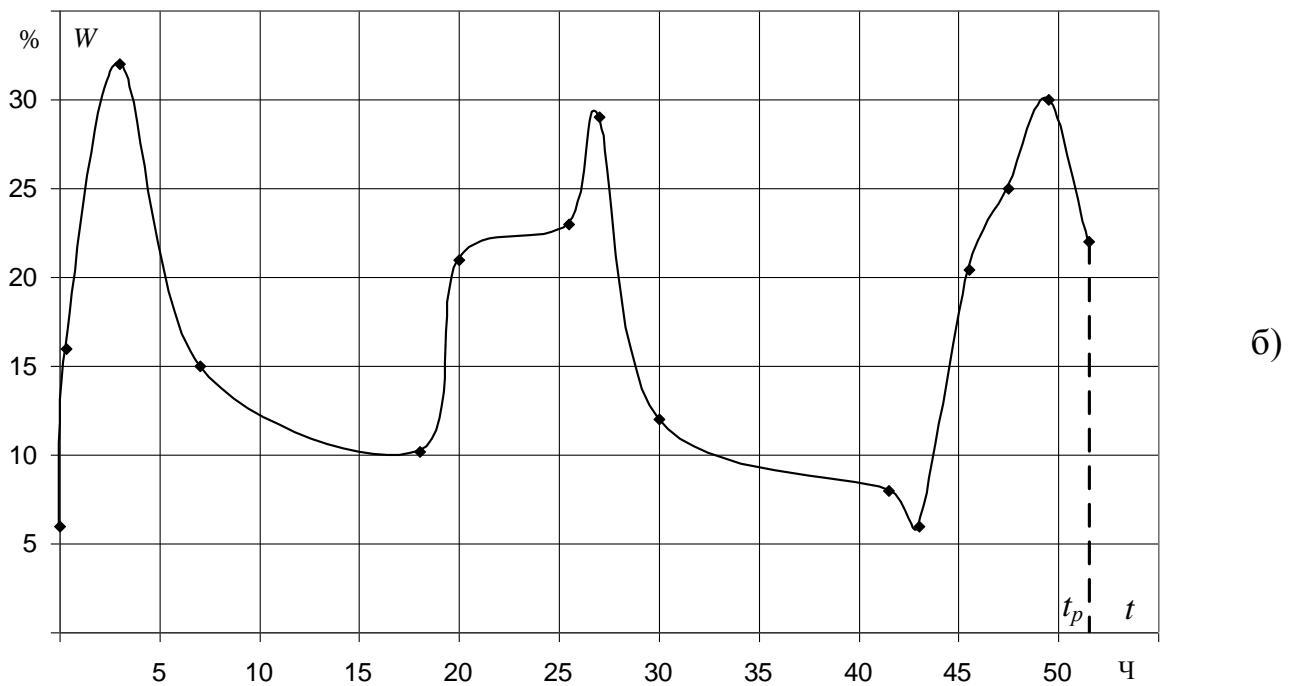
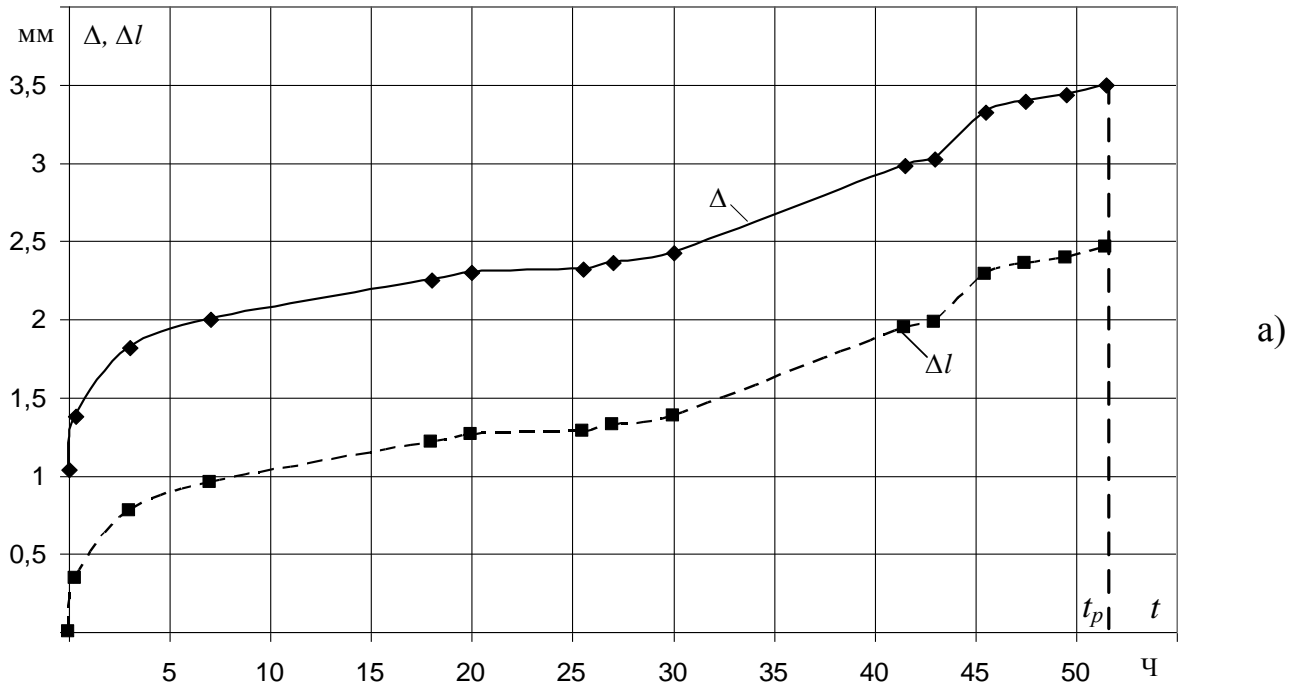


Рисунок 5.29. Динамика: а) абсолютной деформации Δ и приращения деформации $\Delta l = \Delta - \Delta_{\text{нач}}$, где $\Delta_{\text{нач}}$ – абсолютная деформация в начальный момент времени $t = 0$; б) относительной влажности древесины W в процессе попеременного увлажнения и высушивания древесины при 60°C ; t_p – момент разрушения образца нагельного соединения (его «время жизни»)

При анализе полученных результатов (рис. 5.28, рис. 5.29, табл. 1П1÷4П1) прежде всего следует сделать вывод, что температура, при которой

происходит воздействие циклов увлажнения и высыхания, оказывает очень сильное влияние на «время жизни» нагельных соединений (промежуток времени от начала эксперимента до момента разрушения образца t_p). Например, увеличение температуры с 20 °С до 60 °С приводит к снижению этого параметра более чем в 20 раз. Соответственно, сокращается и число циклов увлажнения и высыхания, приводящих к разрушению нагельного соединения.

Этот результат является убедительным доказательством важнейшего предположения настоящей работы о значительном влиянии циклического воздействия температурно-влажностных условий эксплуатации нагельных соединений на срок их службы и на ресурс строительных конструкций из древесины, в которых они используются [127, 139, 151, 172, 175, 181].

Характерно, что уже в начальный момент времени $t = 0$ под действием приложенной нагрузки возникает начальная деформация нагельного соединения $\Delta = 0,43 \div 1,04$ мм, которая затем постоянно нарастает.

При этом в начальный период времени (в период времени от 0 до $2,5 \div 3$ ч) наблюдается быстрый рост деформаций, затем темп их увеличения существенно снижается и достигает некоторого установившегося значения. На динамику деформаций оказывает влияние также температура, при которой проводятся испытания.

Как следует из сравнения, представленного на рис. 5.30, температура испытаний ощутимо влияет на величину абсолютной деформации Δ нагельных соединений. При одной и той же длительности эксперимента наблюдается заметное увеличение абсолютной деформации в зависимости от величины температуры. Например, спустя одни сутки деформация при 20 °С составляет около 1,2 мм, при 40 °С – уже приблизительно 1,8 мм, т.е. в 1,5 раза больше, а при 60 °С она составляет около 2,4 мм, что в 2 раза больше, чем при 20 °С.

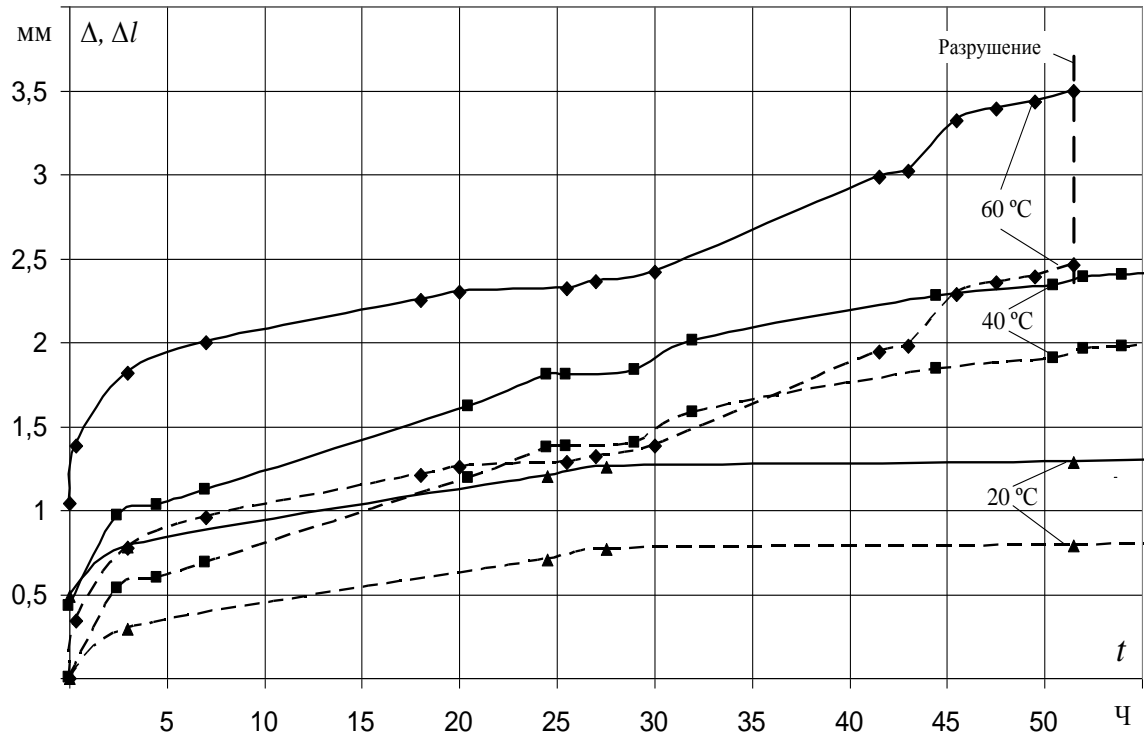


Рисунок 5.30. Сравнение динамики абсолютной деформации Δ (сплошные линии) и приращения деформации Δl (пунктирные линии) образцов нагельного соединения на МЗП при различной температуре в климатической камере (определение Δl см. рис. 5.28 и 5.29)

Однако, что касается приращения деформации Δl , то такая же однозначность отсутствует: при температурах 40 °C и 60 °C значения этого параметра различаются не столь значительно, но заметно выше, чем при температуре 20 °C.

Температура также оказывает значительное влияние на динамику деформаций. Например, если начальная скорость роста деформаций при температуре 60 °C составляет около 1 мм/ч, то при снижении температуры до 20 °C эта скорость уменьшается почти до 0,1 мм/ч, т.е. практически на порядок. Аналогичное влияние температуры наблюдается и в отношении скорости роста деформаций на участке, где этот параметр достигает стабильного значения. Например, при температуре 60 °C этот показатель в среднем имеет величину $0,03 \div 0,04$ мм/ч, а при 20 °C — $0,0025 \div 0,003$ мм/ч.

Как следует из рис. 5.28 б и 5.29 б, в процессе попеременного увлажнения и высушивания влажность древесины претерпевает значительные колебания.

Например, по окончании стадии высушивания влажность древесины составляет $W = 8 \div 12 \%$, а в некоторых случаях достигает $6 \div 7 \%$. Максимальная влажность имеет место в конце стадии увлажнения и составляет $W = 28 \div 32 \%$. Таким образом, в ходе каждого цикла происходит в среднем трехкратное изменение этого параметра. Учитывая сведения гл. 1, такие колебания влажности древесины не могут не оказывать механического воздействия на структуру материала, вызывая ее разрыхление и приводя совместно с химическим фактором, включая коррозию металла, к снижению прочности сцепления зубьев МЗП с древесиной вплоть до окончательного разрушения [60, 66, 70, 139, 141, 151, 175, 181, 193, 194].

Полученные результаты можно рассматривать как подтверждение правильности методики расчета допустимого количества циклов увлажнения и высушивания (разд. 3.5) и полученных для этого формул (3.128) и (3.133).

В целях обобщения результатов экспериментов по изучению деформационных показателей была выполнена обработка сведений табл. А1-А4 методами факторного анализа. Результатом этой обработки являются графики, представленные на рис. 5.31, которые отражают зависимость величины абсолютной деформации от температуры и влажности древесины.

Зависимостям рис. 5.31 соответствует формула [38, 101-102]

$$\Delta = 2,08 + 0,78 X_1 + 0,17 X_2 + 0,37 X_1^2 - 0,03 X_2^2 - 0,17 X_1 X_2, \quad (5.2)$$

где X_1 – параметр, соответствующий температуре древесины согласно рис. 5.31; X_2 – параметр, соответствующий ее влажности согласно рис. 5.31.

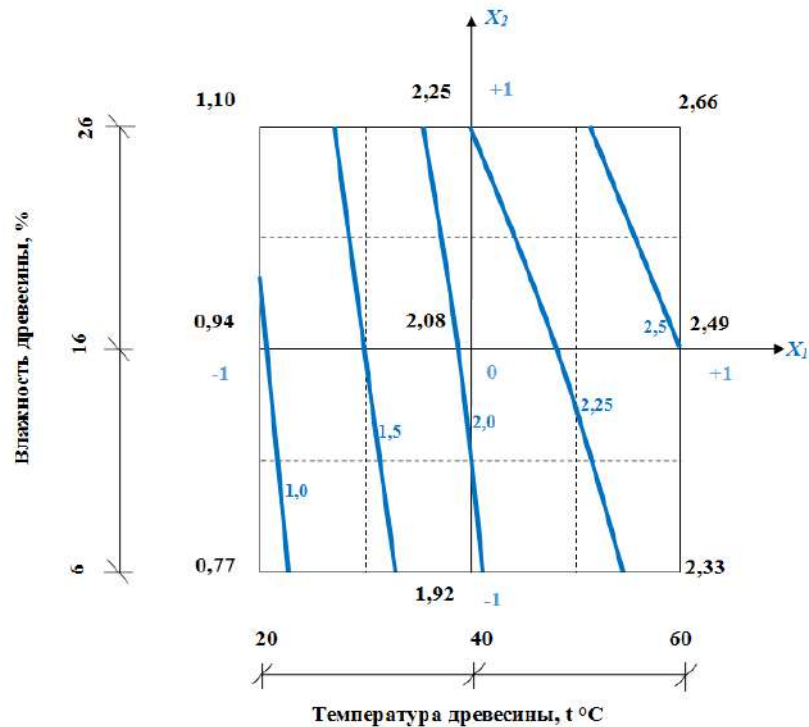


Рисунок 5.31. Зависимость абсолютной деформации Δ нагельного соединения на МЗП, мм, от влажности и температуры древесины

Выражение (5.2) справедливо при изменении температуры в пределах $20 \div 60$ °С и при изменении влажности в пределах $6 \div 32$ %. Эта формула, как и рис. 5.31, может быть использована для решения практических вопросов при проектировании и эксплуатации строительных конструкций из древесины в целях оценки их ресурса [71, 113, 114, 119, 161, 184, 195].

5.5. Характеристики предельных механических и циклически изменяющихся климатических условий работы нагельных соединений

Весьма важной и, возможно, главной особенностью выполненных экспериментальных исследований (табл. А1-А4) нагельных соединений с использованием лабораторной установки является то, что полученные результаты позволяют сделать выводы о предельных условиях работы этих узлов. В этом случае наиболее важным и основным показателем следует считать предельное число циклов увлажнения и высушивания древесины нагельного соединения, приводящее к его разрушению $n_{ур}$. Вполне очевидно,

что такое событие является недопустимым в условиях эксплуатации строительных деревянных конструкций.

Другим, дополнительным или, по-видимому, косвенным показателем предельного состояния нагельного соединения следует рассматривать величину его абсолютной деформации Δ_p , которая достигается в момент разрушения t_p (рис. 5.28 и 5.29).

С использованием результатов экспериментов (табл. А1-А4) была составлена табл. 5.5 предельных показателей (параметров разрушения) испытанных образцов нагельных соединений.

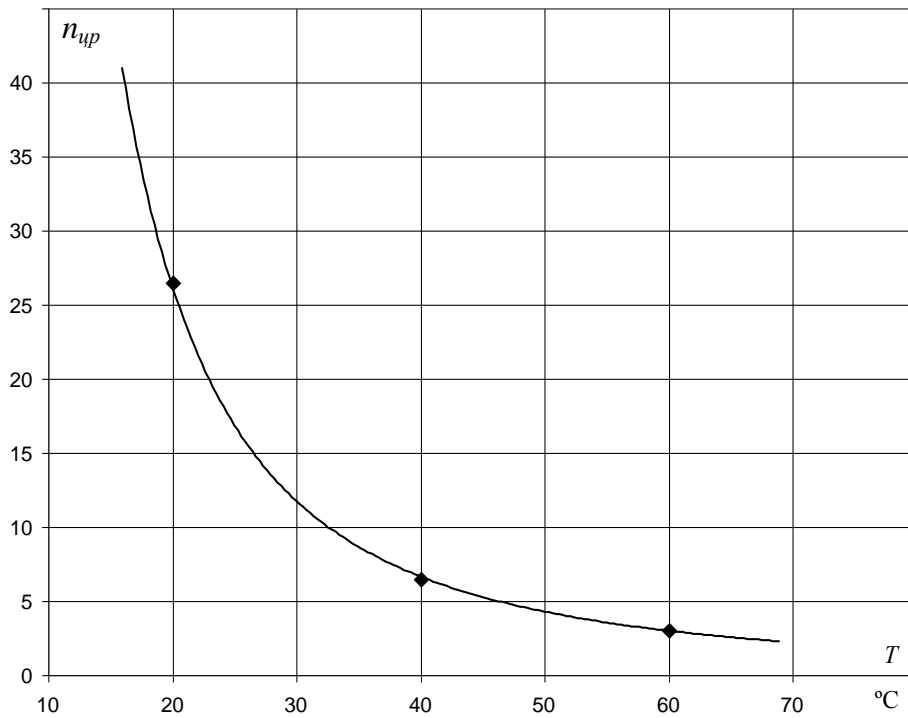
Таблица 5.5. Показатели разрушения образцов нагельных соединений

Температура T	Предельное число циклов n_{up}	Предельная абсолютная деформация Δ_p	Предельное приращение деформации Δl_p	«Время жизни» образца t_p	Средняя продол- жительность цикла увлажнения- высыхания Δt	Тип нагель- ного соедине- ния
°С	ед.	мм	мм	ч	ч	-
20	26,5	3,501	3,008	1071	40,42	На МЗП
40	6,5	4,83	4,4	141	21,69	
60	3	3,5	2,46	51,5	17,17	
40	5	3,521	3,521	103	20,6	Болто- вое

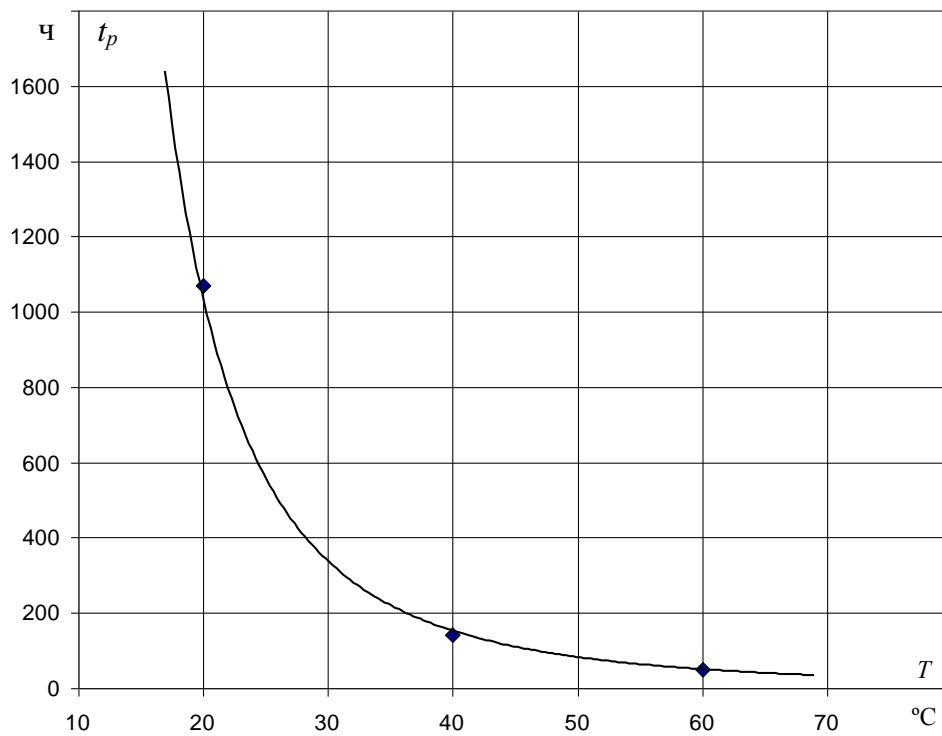
Анализ сведений, представленных в табл. 5.5, позволяет сделать вывод о том, что температура, при которой проводились испытания, оказывает очень сильное влияние на предельное число n_{up} циклов процесса увлажнения и высыхания древесины нагельного соединения, приводящее к его разрушению. На рис. 5.32 графически представлена зависимость этого параметра, а также «времени жизни» t_p нагельного соединения в испытаниях от температуры.

Эти результаты (рис. 5.32), как отмечено выше (разд. 5.4), служат убедительным подтверждением основного предположения настоящей работы о значительном влиянии циклически изменяющихся климатических условий работы нагельных соединений на их ресурс. Действительно, как следует из рис. 5.32, увеличение температуры с 20 °С до 60 °С приводит к почти

девятикратному снижению количества циклов увлажнения и высыхания древесины этих узлов, вызывающих их разрушение.



а)



б)

Рисунок 5.32. Зависимость предельного числа циклов увлажнения и высушивания древесины (а) и «времени жизни» (б) нагельного соединения от температуры

В результате обработки экспериментальных значений (табл. 5.5, рис. 5.31 и 5.32) в среде Excel были получены эмпирические математические выражения линий тренда, описывающие экспериментальные зависимости. Для рис. 5.32,а такая формула при коэффициенте достоверности $R^2 = 0,9997$ имеет вид

$$n_{up} = 10143 \cdot T^{-1,9878}, \quad (5.3)$$

а для случая рис. 5.32,б при коэффициенте $R^2 = 0,998$ получено

$$t_p = 4 \cdot 10^6 \cdot T^{-2,78}. \quad (5.4)$$

Указанные значения коэффициентов достоверности свидетельствуют о высокой точности описания экспериментальных зависимостей и их можно рекомендовать для практического применения. Кроме того, представленные формулы (5.3) и (5.4) рекомендуется использовать для температурного диапазона $T = 20 \div 60$ °С. Выражение (5.3) и зависимость рис. 5.32,а с точки зрения влияния температуры качественно хорошо согласуются с формулой (3.133), которая предназначена для определения фактически такого же показателя теоретическим способом. Это обстоятельство является дополнительным подтверждением достоверности методики расчета и выражения (3.133) для определения допустимого числа циклов увлажнения и высыхания при работе нагельных соединений в условиях циклически изменяющихся климатических параметров. Вместе с тем нельзя не отметить ограниченные возможности выражений (5.3) и (5.4): это фиксированный температурный диапазон и отсутствие учета длительности циклов увлажнения и высыхания. Этого недостатка лишено уже упомянутое выражение (3.133), однако его применение наталкивается на отсутствие сведений о значениях постоянных величин, входящих в эту формулу.

Ценность представленных в табл. 5.5 сведений заключается также в том, что они являются основой для определения постоянных параметров формулы (3.133).

Действительно, используя эту формулу и табл. 5.5, можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} n_1 = \frac{\ln K_3}{A \cdot \Delta t_1} \exp\left(\frac{E}{k \cdot T_1}\right), \\ n_2 = \frac{\ln K_3}{A \cdot \Delta t_2} \exp\left(\frac{E}{k \cdot T_2}\right), \end{cases} \quad (5.5)$$

где $n_1 = n_{up} = n_{дон}$ – число циклов, соответствующее одному значению температуры T_1 ; $n_1 = n_{up} = n_{дон}$ – число циклов, соответствующее другому значению температуры T_2 . Аналогично Δt_1 соответствует T_1 , а Δt_2 соответствует T_2 . Например, согласно табл. 5.5, можно принять $T_1 = 20$ °С, $n_1 = 26,5$, $\Delta t_1 = 40,42$ ч и $T_2 = 60$ °С, $n_2 = 3$, $\Delta t_2 = 17,17$ ч.

Поскольку в системе уравнений (5.5) имеется два неизвестных – A и E , имеющих сведения вполне достаточно для их определения посредством решения системы (5.5). Результаты такого решения представлены в табл. 5.6.

Таблица 5.6. Постоянные величины уравнения (3.133)

Число химических взаимодействий A	Энергия химической связи E	
	Дж	ЭВ
1/с		
$5,76 \cdot 10^6$	$1,23 \cdot 10^{-19}$	0,77

Небезынтересно сравнить полученные результаты (табл. 5.6) с аналогичными показателями из литературных источников. Прежде всего, это касается параметра E , который следует рассматривать в данном случае как энергию разрушения химических связей органических соединений, входящих в состав лигнина, обеспечивающего механическую прочность древесины. Исходя из современной классификации химических связей органических соединений, их энергия разрушения колеблется в пределах $\sim 0,2 \div 10$ ЭВ [144, 196]. Полученное значение E (табл. 5.6) располагается ближе к нижней границе этого диапазона, т.е. можно заключить: разрушению, по-видимому, подвергаются наименее прочные химические связи лигнина, что позволяет древесине оставаться материалом, пригодным к эксплуатации на протяжении достаточно длительного времени. Указанные соображения служат подтверждением адекватности выражения (3.133) реальным физико-химическим процессам в древесине нагельных соединений, завершающихся разрушением этих узлов. Хотя до настоящего времени нет точных знаний о

составе химических соединений лигнина, известно, что спектр их весьма широк и в них присутствуют практически все типы известных химических связей органических веществ при различном долевым содержании, чем и можно объяснить полученный результат для E [196].

Следует также предположить, что значения показателей A и E , приведенные в табл. 5.6, будут справедливы и для выражения (3.135), предназначенного для определения $n_{дон}$ при произвольных параметрах циклических температурно-влажностных условиях работы нагельных соединений. При подстановке значений A и E в формулы (3.133) и (3.135) они приобретают вид

$$n_{дон} = \frac{\ln K_3}{20,74 \cdot 10^9 \cdot \Delta t} \exp\left(\frac{1,23 \cdot 10^{-19}}{k \cdot T}\right). \quad (5.6)$$

и

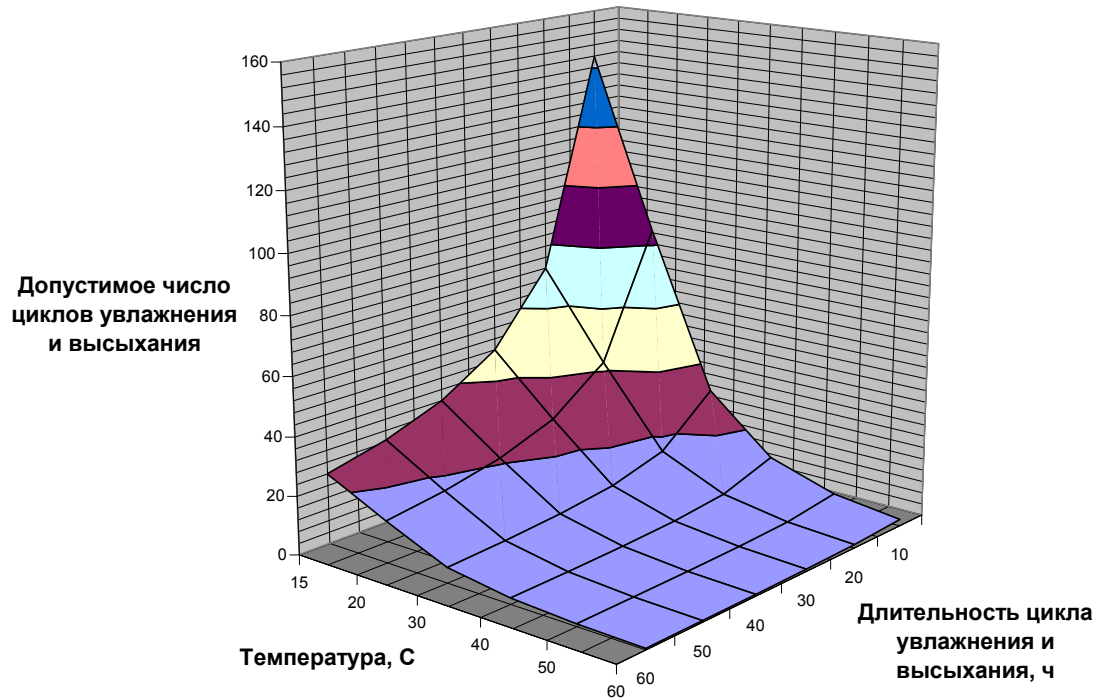
$$\ln K_3 = 5,76 \cdot 10^6 \cdot \sum_{i=1}^{n_{дон}} \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{1,23 \cdot 10^{-19}}{k \cdot T_i}\right). \quad (3.135)$$

Таким образом, эти важные с практической точки зрения выражения готовы для практического применения.

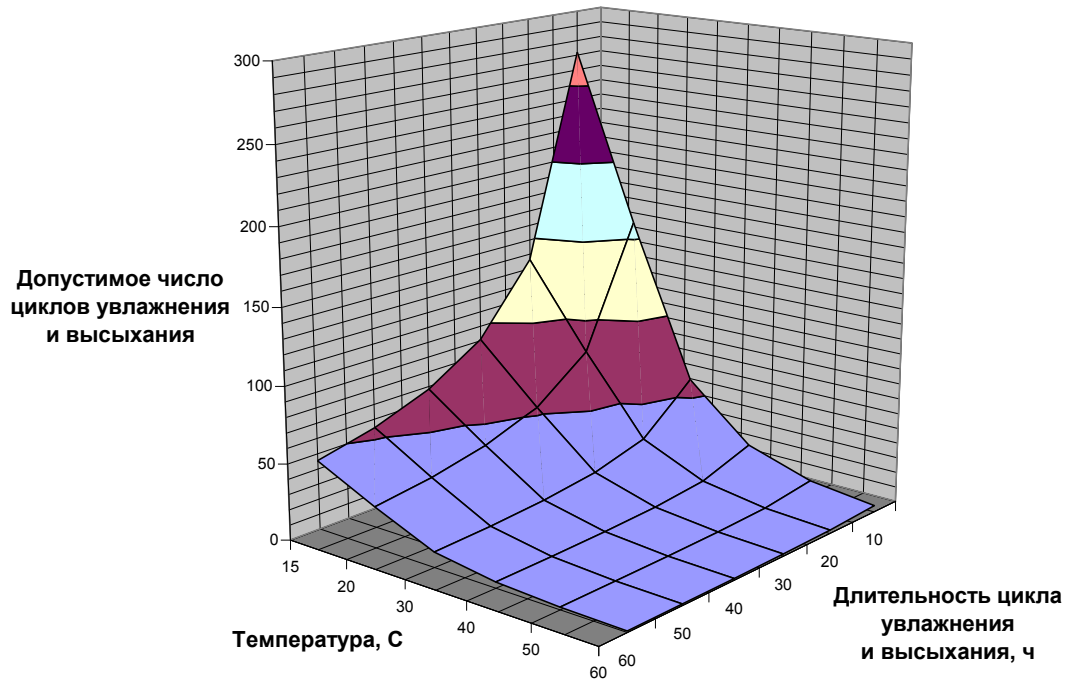
Для примера их использования были выполнены вычисления с помощью выражения (5.6), результаты которых в виде 3-мерной диаграммы представлены на рис. 5.33. Из полученных зависимостей (рис. 5.33) следует, что связь между параметрами формулы (5.6) имеет крайне нелинейный характер, а наиболее сильное влияние на величину $n_{дон}$ оказывает температура. Причем наиболее тяжелые условия для эксплуатации нагельных соединений, вызывающие снижение их ресурса, возникают при температуре свыше 30÷35 °С.

Сокращение длительности цикла увлажнения и высыхания позволяет несколько ослабить негативное влияние этого фактора. Таким образом, можно рекомендовать создание на практике, по возможности, благоприятных условий для вентиляции нагельных соединений в целях ускорения процесса их высыхания и сокращения длительности всего цикла. Нельзя не отметить

ощутимое влияние на n_{don} величины коэффициента запаса K_3 . Увеличением этого параметра можно эффективно повышать надежность и долговечность нагельных соединений и всей строительной деревянной конструкции, в которой они используются.



$$K_3 = 3$$



$$K_3 = 8$$

Рисунок 5.33. Расчетные зависимости допустимого числа циклов увлажнения и высыхания древесины нагельного соединения от температуры и длительности такого цикла при различных значениях коэффициента запаса K_3

Как показано выше, в качестве параметров разрушения нагельных образцов можно также рассматривать предельную абсолютную деформацию Δ_p или предельное приращение деформации Δl_p (табл. 5.5). По-видимому, удобнее использовать первый из них, так как он учитывает и начальную деформацию образцов нагельного соединения, и величину этого параметра в процессе испытаний. Из сведений табл. 5.5 можно заключить, что не просматривается влияние температуры на эти показатели, и, по-видимому, следует предположить, что они подвержены статистическому разбросу. Очевидно, то же самое можно сказать и в отношении рассмотренного выше показателя $n_{цр}$.

Поэтому для оценки состояния и работоспособности нагельных соединений целесообразно использовать методы теории вероятностей и математической статистики. Порядок решения этой задачи будет представлен в гл. 6.

5.6. Выводы по главе 5

1. Выполнен большой объем экспериментальных исследований, посвященных изучению процессов тепломассопереноса в древесине нагельных соединений различного типа: болтовых и на МЗП в целях проверки достоверности теоретических разработок, подтверждения выдвинутых гипотез настоящей работы и уточнения (определения) некоторых постоянных величин предложенных математических моделей.

2. Выполненные экспериментальные исследования статики, динамики и кинетики влагопереноса в образцах древесины, используемой для изготовления строительных деревянных конструкций, полностью подтвердили существующие представления о таких процессах и адекватность математических моделей этих процессов реальным явлениям, а также позволили определить точное численное значение коэффициента

влажностности древесины ($k = 3,85 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$) – важнейшей константы в составе дифференциального уравнения массопереноса (гл. 1÷3), без знания которой невозможно точное описание нестационарных процессов влажностпереноса.

3. С использованием современных экспериментальных методик и оборудования (тепловизора типа HotFind-LR) выполнен большой объем экспериментальных исследований процессов теплопереноса в древесине нагельных соединений различного типа: болтовых соединений и соединений на основе МЗП. В эксперименте использовались образцы из сосны по [197]: плотность $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $c = 2510 \text{ Дж/(кг·К)}$, теплопроводность $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(мК)}$. Проведенные эксперименты показали адекватность разработанных математических моделей расчета реальным физическим процессам. Кроме того, показано, что в древесине нагельных соединений из-за существенной разницы в теплофизических показателях с их металлическими элементами могут возникать весьма неоднородные температурные поля, что неизбежно должно отрицательно сказываться на механических показателях материала.

4. Наиболее важными, интересными и информативными как с теоретической, так и с практической точки зрения являются, безусловно, результаты экспериментов, полученные с использованием оригинальной лабораторной установки, снабженной климатической камерой для испытания образцов нагельных соединений в напряженно-деформированном состоянии и в среде с управляемыми температурно-влажностными условиями. Наличие такой установки позволило в сравнительно короткие сроки выполнить достаточно большой объем сложных и трудоемких экспериментальных исследований характеристик и показателей нагельных соединений в условиях, максимально приближенных к реальным циклически изменяющимся климатическим воздействиям.

5. Результаты экспериментов убедительно доказали справедливость основной гипотезы настоящей работы о значительном влиянии циклически

изменяющихся климатических условий работы нагельных соединений на их ресурс. Например, увеличение температуры с 20 °С до 60 °С приводит к почти девятикратному снижению количества циклов увлажнения и высыхания древесины этих узлов, вызывающих их разрушение. Кроме того, полученные результаты с точки зрения влияния температуры качественно хорошо согласуются с формулой (3.133), полученной в гл. 3, которая предназначена для определения допустимого числа таких циклов теоретическим способом.

6. На основании полученных результатов определены численные значения постоянных величин (постоянных уравнения Аррениуса), присутствующих в теоретических выражениях для определения допустимого числа циклов увлажнения и высыхания древесины нагельных соединений в процессе эксплуатации в целях устранения опасности их разрушения. Эти численные значения хорошо согласуются со сведениями из литературных источников, что служит дополнительным подтверждением достоверности теоретических представлений и разработок настоящего диссертационного исследования.

7. Исследования, выполненные посредством лабораторной установки с климатической камерой, показали, что в процессе эксплуатации нагельных соединений наблюдается постепенное нарастание их абсолютной деформации вплоть до полного разрушения. Показано, что этот параметр может быть использован на практике в качестве показателя состояния и прогнозирования ресурса нагельных соединений.

8. Результаты исследований также позволяют сделать заключение, что показатели разрушения образцов нагельных соединений подвержены статистическому разбросу, что соответствует опыту применения разнообразных технических элементов и устройств. Поэтому оценку состояния и прогнозирование ресурса нагельных соединений целесообразно выполнять с применением теории вероятностей и математической статистики. В целях получения дополнительного статистического материала по показателям разрушения нагельных соединений и совершенствования

методики прогнозирования их надежности и ресурса необходимо продолжение экспериментальных исследований с использованием созданной лабораторной установки.

ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

6.1. Автоматизированная система мониторинга климатических, температурно-влажностных и механических показателей эксплуатации строительных конструкций из древесины

Как было показано в главе 2, обязательной составной частью методологии создания и применения строительных конструкций из древесины является мониторинг климатических, температурно-влажностных и механических показателей их эксплуатации (рис. 2.2). Поэтому отдельной задачей настоящей работы стала разработка автоматизированной системы мониторинга климатических, температурно-влажностных и механических показателей эксплуатации строительных конструкций из древесины [198-201].

При разработке автоматизированной установки основной целью ставилось проведение непрерывного мониторинга параметров окружающей среды и эксплуатируемой строительной конструкции в различных ее точках. Необходимость обеспечения непрерывности контроля параметров в течение длительного периода времени потребовала решения ряда технических задач.

Решаемой технической задачей является измерение наружных климатических параметров, влажности, скорости и направления ветра, атмосферного давления, ультрафиолетового излучения, температуры наружного воздуха, а также непрерывный температурный мониторинг эксплуатируемой строительной деревянной конструкции круглосуточно, непрерывно в течение одного и более лет. Кроме того, контролируются показатели деформации элементов строительной конструкции, например нагельных соединений, строительных деталей и др. Одновременно с контролем и регистрацией указанных параметров выполняется обработка полученных результатов, например вычисляются характеристики

тепловлагопереноса в древесине нагельных соединений с помощью предложенных в настоящей работе математических моделей и методик. Проведение таких вычислений являются составной частью программного обеспечения автоматизированной системы. Обработка результатов эксперимента производится в режиме on-line с выходом в Интернет [38].

Данная техническая задача решается тем, что с наружной стороны строительной конструкции устанавливается метеостанция DAVIS instruments Vantage Pro2, а внутри на элементах конструкции установлены различные датчики и измерители. Автоматизированная система включает в себя метеостанцию с различными датчиками для измерения климатических параметров и объект мониторинга – строительную конструкцию, в различных точках которой установлены термопары, возможно расположенные по всей толщине элементов конструкции, тензодатчики (а также датчики других параметров) и тепломеры, закрепленные на поверхности элементов строительной конструкции и нагельных узлов. Проводники, идущие от тепломера и термопар, подсоединены к устройству контроля температуры. Через адаптер интерфейса соединены с ПК. С помощью разработанной программы данные сортируются и обрабатываются, после чего передаются в Интернет. Конструкция автоматизированной системы поясняется чертежом, приведенным на рис. 6.1 [202, 203].

Основные элементы автоматизированной системы наглядно представлены на рис. 6.2. Метеостанция DAVIS instruments Vantage Pro 2 включает в себя различные датчики. На наружной поверхности устанавливается блок с датчиками и флюгером. Внутри цифровая консоль, регистрирующая данные и передающая их на компьютер. Применение метеостанции расширяет возможности теплофизических исследований строительных конструкций из древесины, позволяет решить ряд проблем, связанных с получением дополнительных расчетных данных.

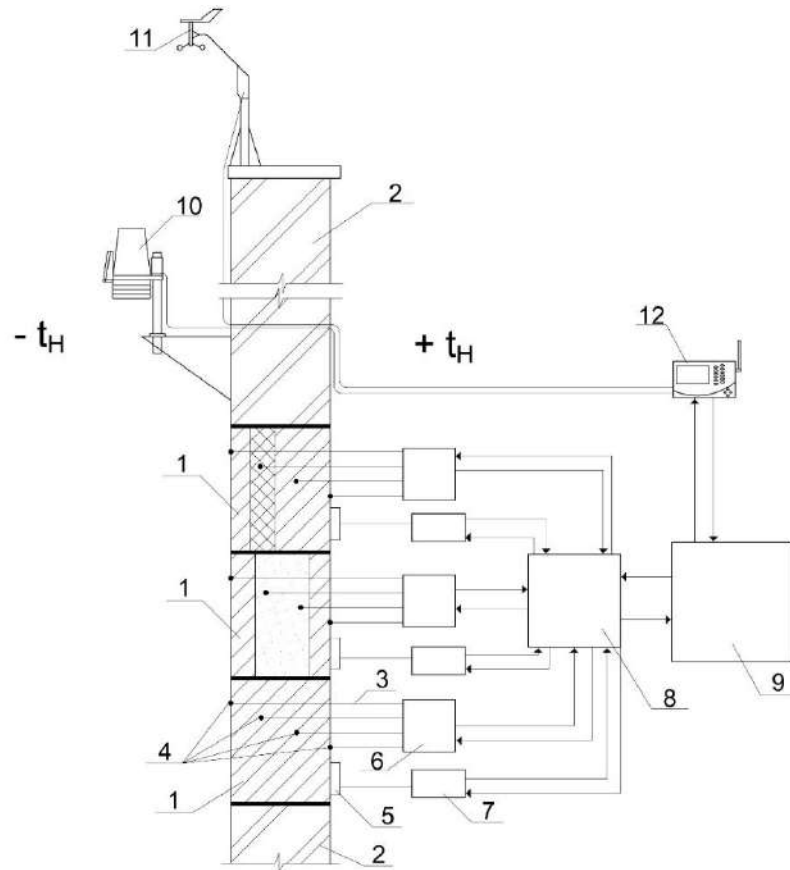


Рисунок 6.1. Схема автоматизированной системы: 1 – исследуемый образец наружного ограждения; 2 – наружная стена здания; 3 – термопарный кабель ХК (хромель-капель); 4 – сваренные концы термопар ХК; 5 – тепломер; 6 – устройство для измерения температур УКТ 38-Щ4; 7 – потенциометр; 8 – адаптер интерфейса RS-232; 9 – компьютер; 10 – метеостанция кабельная DAVIS instruments Vantage Pro2; 11 – флюгер анемометра; 12 – консоль Vantage Pro2

Термопары и тепломер подсоединены к устройству для измерения температур УКТ38-Щ4 (рис. 6.1). Этот 8-канальный измеритель с аварийной сигнализацией предназначен для контроля температуры, давления, влажности, уровня или другой физической величины в нескольких зонах одновременно (до 8-ми) и аварийной сигнализации о выходе любого из контролируемых параметров за заданные пределы.

Для передачи данных, получаемых с приборов УКТ38-Щ4 на компьютер, установлен адаптер интерфейса RS - 232 (рис. 6.2), который использует в телекоммуникациях стандарт последовательной асинхронной передачи двоичных данных между терминалом и коммуникационным устройством.

Предназначен для передачи информации между двумя устройствами на расстояние до 15 метров.

Все получаемые данные поступают на компьютер (рис. 6.2) [203], где они сохраняются в базе данных. После этого данные можно обрабатывать и анализировать. На начальном этапе это делалось вручную, но в дальнейшем на их основе алгоритма обработки данных, была написана компьютерная программа, которая автоматически фиксирует и обрабатывает непрерывно поступающую информацию, формирует таблицы и строит графики, которые можно просматривать в режиме реального времени. Кроме того, система при необходимости (например, при возникновении опасности) выдает соответствующие оповещения, напоминания, предупреждения, сигналы опасности и т.д.

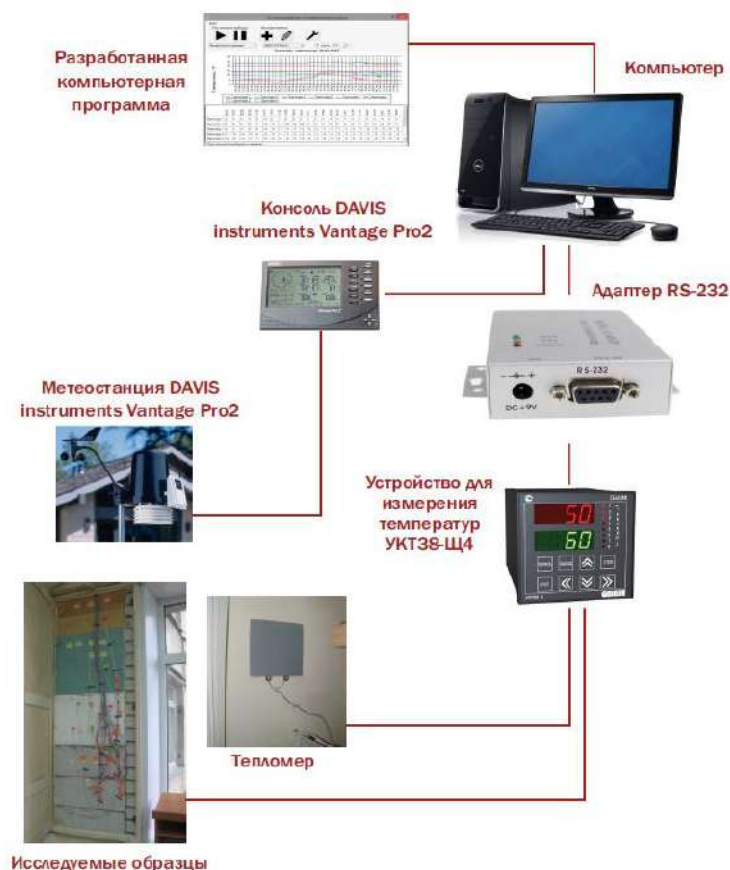


Рисунок 6.2. Внешний вид основных элементов автоматизированной системы для мониторинга климатических, температурно-влажностных и механических параметров при эксплуатации строительной конструкции из древесины

Разработанная, изготовленная и испытанная автоматизированная система (рис. 6.1 и 6.2) показала себя работоспособной и эффективной установкой. Она обладает широкой универсальностью, в частности позволяет определять теплотехнические характеристики ограждающих конструкций при длительных режимах испытаний (год и более) в натуральных условиях [204-209] и решать задачи повышения энергоэффективности жилых, общественных и промышленных зданий [210, 211], а также стойкости деревянных строительных конструкций при воздействии огня [212].

Несмотря на положительные результаты практического применения такой системы, продолжает оставаться актуальной задача совершенствования ее структурной схемы, процесса работы, программного обеспечения [24].

6.2. Оценка работоспособности нагельных соединений на основе статистических показателей их деформации

Вполне очевидно, что описанная в разд. 6.1 автоматизированная система контроля (мониторинга) состояния нагельных соединений позволит своевременно обнаруживать опасность их выхода из строя. Как показано в гл. 1, любая деревянная строительная конструкция всегда в своем составе содержит не одно, а достаточно большое количество нагельных соединений [4, 11, 14, 29, 31, 32, 47, 72, 76, 112, 113, 116, 141, 142, 183, 190, 192, 213-216]. При этом разрушение одного такого соединения, как правило, не может вызвать разрушения всей строительной конструкции. Однако такое событие следует считать недопустимым, требующим немедленного вмешательства в виде ремонта, замены или усиления узла, котором произошло разрушение. Поэтому, учитывая статистический характер параметров разрушения нагельных соединений в экспериментах (гл. 5) в качестве важнейшего показателя оценки состояния этих узлов следует принять вероятность их разрушения [152, 217-219]. Важнейшей задачей мониторинга нагельных соединений является выявление ситуации, когда этот параметр достигает

определенного допустимого значения, после чего принимается решение о снижении этого показателя.

Как следует из табл. 5.5, в качестве показателей, подлежащих мониторингу в процессе эксплуатации, следует принять число циклов увлажнения и высыхания нагельного соединения $n_{ц}$ и величину абсолютной деформации Δ . К сожалению, из-за высокой трудоемкости и сложности экспериментов не удалось получить достаточный материал по статистическому разбросу параметра $n_{ц}$ при неизменных условиях испытаний, а его предельное значение $n_{цр}$, приводящее к разрушению нагельного соединения, в сильной степени зависит от температурных условий. Однако второй параметр Δ_p не обнаруживает связи с температурой и проявляет себя как величина, подверженная статистическому разбросу, независимо от температурно-влажностных условий эксперимента. Несмотря на весьма ограниченный объем выборки, имеющиеся результаты (табл. 5.5) позволяют выполнить необходимые оценки.

Прежде всего, исходя из физической картины рассматриваемых явлений (гл. 5), можно предположить, что статистический параметр Δ_p имеет нормальный закон распределения. Действительно, нормальный закон широко распространен на практике, и в данном случае нет каких-либо соображений противоречащих такому предположению. Результаты оценки параметров распределения: математического ожидания (среднее значение), среднеквадратичного отклонения, на основании табл. 5.5 приведены в табл. 6.1 [220, 221].

Таблица 6.1 – Параметры функции распределения абсолютного значения деформации разрушения

Объем выборки n	Математическое ожидание (среднее значение) абсолютной деформации разрушения Δ_{cp} , мм	Среднеквадратичное отклонение абсолютной деформации разрушения σ_p , мм
4	3,838	0,66

Как показано в [220, 221], при малых объемах выборки (табл. 6.1) использование нормального закона может привести в грубым ошибкам. В

таких случаях более предпочтительным является применение распределения Стьюдента, достоинством которого является то, что оно определяется объемом выборки и не зависит от конкретных значений математического ожидания и среднеквадратичного отклонения [220, 221]. Используя распределение Стьюдента, можно записать выражение для определения вероятности (т.е. надежности γ) нахождения истинного значения математического значения Δ_{cp} в диапазоне $\Delta_{min} \div \Delta_{max}$ [220, 221]:

$$P(\Delta_{min} < \Delta_{cp} < \Delta_{max}) = \gamma, \quad (6.1)$$

где

$$\Delta_{min} = \Delta_{cp} - \frac{t_{\gamma} \sigma_p}{\sqrt{n}}; \quad \Delta_{max} = \Delta_{cp} + \frac{t_{\gamma} \sigma_p}{\sqrt{n}}, \quad (6.2)$$

– минимальная и максимальная границы диапазона; t_{γ} – безразмерный коэффициент, определяемый по таблице распределения Стьюдента, исходя из известных значений n и γ .

В этом случае представляет интерес вероятность того, что разрушение нагельного соединения произойдет при значениях абсолютной деформации Δ_p меньше или равной Δ_{min} . Учитывая, что плотность распределения Стьюдента – функция четная и, исходя из того, вероятность полной группы событий равна единице, искомую вероятность можно определить по формуле

$$P_I = P(\Delta_p \leq \Delta_{min}) = (1 - \gamma)/2. \quad (6.3)$$

С использованием формул (6.2) и (6.1), а также таблицы распределения Стьюдента [220, 221] была получена зависимость P_I от Δ_{min} , которая представлена на рис. 6.3. Расчеты выполнены в среде Excel с использованием встроенной функции СТЬЮДЕНТ.ОБР.

Однако на практике любая деревянная строительная конструкция всегда содержит большое количество нагельных соединений и это обстоятельство неизбежно сказывается на вероятности появления разрушенного соединения, что обусловлено законами сложения и умножения вероятностей [220, 221]. Центральной задачей количественного учета влияния этого фактора является

решение вопроса о независимости событий, так как наиболее удобно оперировать вероятностями независимых случайных событий. В рассматриваемом случае возможны только два противоположных события: разрушение нагельного соединения и его неразрушение.

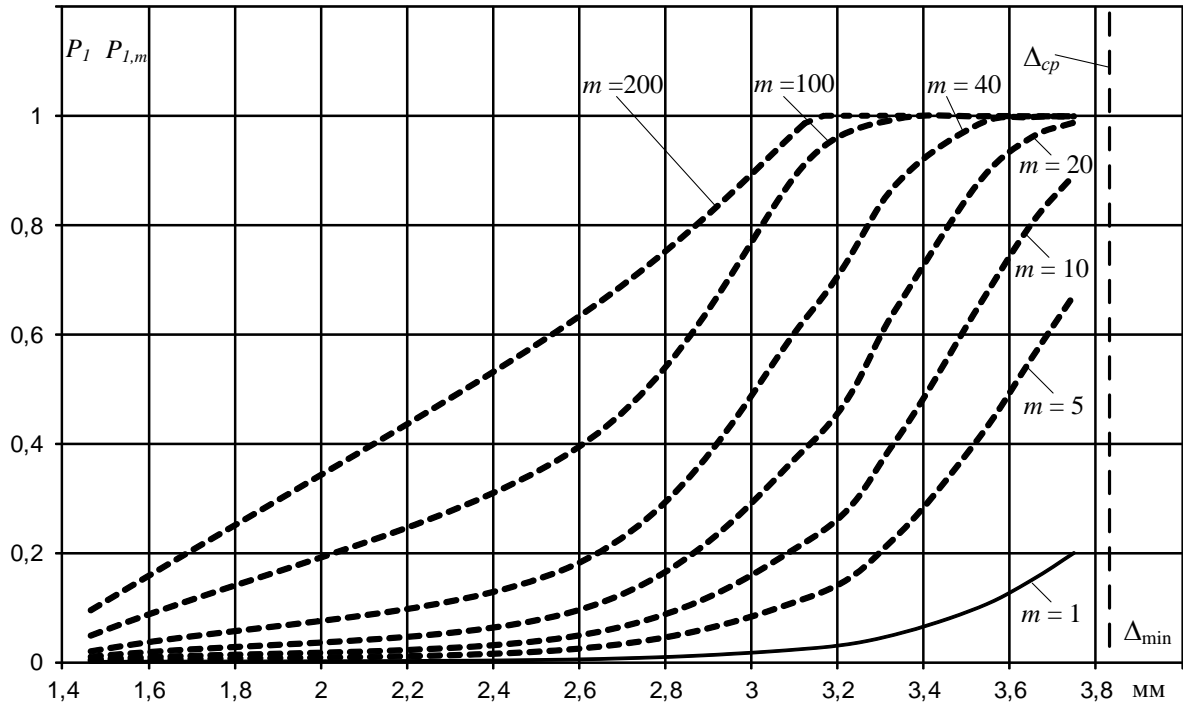


Рисунок 6.3. Зависимость вероятности разрушения нагельного соединения от минимально допустимого значения абсолютной деформации: сплошная линия — зависимость для P_I ; пунктирные линии — зависимости для $P_{I,m}$ при различных значениях m

Если предположить, что произошло разрушение одного из нагельных соединений, обязательно произойдет перераспределение механических нагрузок между оставшимися в работе нагельными соединениями. Это приведет к изменению вероятности разрушения этих узлов по сравнению с предшествующими значениями. Причем учет такого изменения этих вероятностей представляет собой очень сложную задачу. Поэтому событие разрушения какого-либо нагельного соединения строительной конструкции нельзя считать независимым.

С другой стороны, нетрудно видеть, что событие неразрушения можно считать независимым, так как в случае, если ни в одном из нагельных узлов

разрушение не наступает, конструкция работает в штатном режиме и вероятность неразрушения в других нагельных соединениях остается неизменной. Вероятность неразрушения одного нагельного соединения может быть найдена из следующего соотношения [220, 221]:

$$q_1 = 1 - P_1 . \quad (6.4)$$

Учитывая, что при проектировании для всех нагельных узлов, как правило, закладываются одинаковые запасы прочности, можно предположить, что все они имеют одинаковую величину вероятности разрушения и неразрушения:

$$P_i = P_1 ; \quad q_i = q_1 = 1 - P_i, \quad (6.5)$$

где $i = 1 \div m$ – номер нагельного соединения строительной конструкции, содержащей m таких узлов.

Представленные соображения позволяют определить вероятность неразрушения всех m нагельных соединений строительной конструкции как вероятность совместного появления независимых событий посредством перемножения их вероятностей [220, 221]:

$$q_m = \prod_{i=1}^m q_i = q_1^m = (1 - P_1)^m . \quad (6.6)$$

Выражение (6.5) позволяет определить вероятность разрушения хотя бы одного нагельного соединения по формуле вероятности противоположного события (из двух возможных) [218, 219]:

$$P_{1,m} = 1 - q_m = 1 - (1 - P_1)^m . \quad (6.7)$$

С использованием формулы (6.7) были выполнены расчеты величины $P_{1,m}$ для различных значений m , результаты которых приведены также на рис. 6.3.

Из полученных зависимостей нетрудно сделать вывод, что увеличение числа нагельных соединений m в составе строительной конструкции из древесины приводит к значительному росту вероятности появления в процессе эксплуатации поврежденных (разрушенных) узлов такого типа. Пренебрегать

этим фактором при разработке и эксплуатации строительных конструкций – недопустимо.

Зависимости, представленные на рис. 6.3, являются основой для выбора допустимых значений абсолютной деформации нагельных соединений, исходя из заданного значения вероятности разрушения такого узла как при использовании автоматизированной системы мониторинга (разд. 6.1), так и при выполнении ручной проверки состояния строительной конструкции и ее элементов.

Для обоснованного выбора допустимого значения абсолютной деформации Δ_{\min} требуется знание нормативного значения вероятности отказа (разрушения) нагельного соединения P_H . Если известно значение такого параметра и количество нагельных соединений m , то по рис. 6.3 можно без труда определить значение Δ_{\min} . Следует заметить, что в литературных источниках часто используется другой параметр – нормативная вероятность безотказной работы $P_{H\text{бр}}$, который связан с предыдущим показателем простым соотношением

$$P_{H\text{бр}} = 1 - P_H. \quad (6.7)$$

В настоящее время существуют научно-теоретические разработки, посвященные применению методов теории вероятностей для оценки вероятности отказа (разрушения) строительных конструкций, т.е. вероятности безотказной работы [217-219]. Однако задача обоснованного определения нормативных значений P_H ($P_{H\text{бр}}$) для строительных конструкций различного типа и назначения (в том числе конструкций из древесины) еще не нашла своего окончательного решения. По-видимому, для ответа на этот вопрос требуется проведение в дальнейшем отдельного научного исследования.

Вместе с тем в [218] имеются на это счет некоторые рекомендации ориентировочного характера. Например, для случая нагельных соединений, которые, по классификации автора, можно отнести к числу неотчетственных элементов (т.е. элементов, разрушение одного из которых не приводит к

разрушению всей конструкции), можно принять $P_{Нбр} = 0,85 \div 0,9$ ($P_H = 0,1 \div 0,15$). С использованием этих нормативных значений и кривых, представленных на рис. 6.3 была получена зависимость допустимого значения абсолютной деформации $\Delta_{доп} = \Delta_{min}(P_H)$ от величины m в виде области значений с учетом диапазона колебания P_H , которая приведена на рис. 6.4.

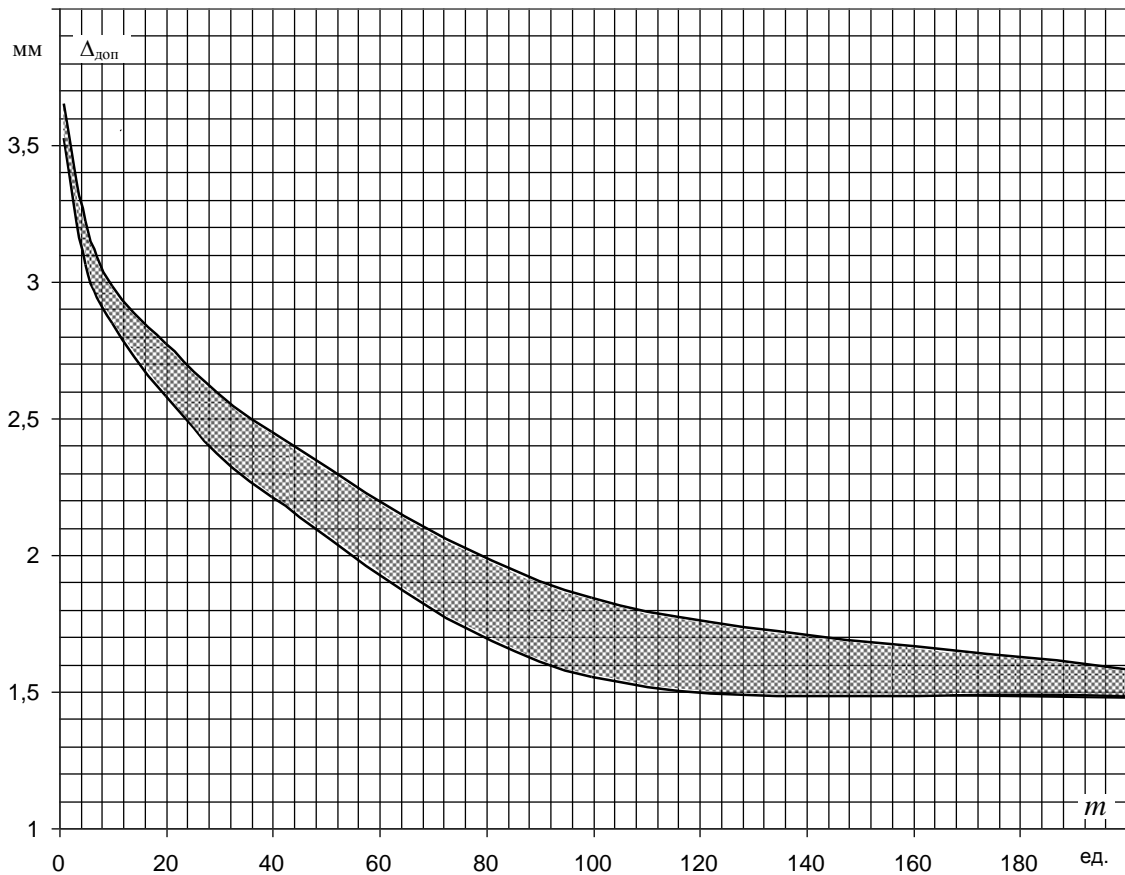


Рисунок 6.4. Зависимость области допустимых значений абсолютной деформации нагельного соединения при $P_{Нбр} = 0,85 \div 0,9$ ($P_H = 0,1 \div 0,15$) от количества таких узлов в составе строительной деревянной конструкции

Полученная зависимость (рис. 6.4) является основой для выбора допустимых значений абсолютной деформации, на которые должна реагировать автоматизированная система (разд. 6.1) или с которыми надо сравнивать измеренные (фактические) значения при оценке состояния вручную. При этом необязательно иметь одно единственное допустимое значение, возможно любое количество таких параметров, например два: одно из них соответствует нижней границе области второе – верхней (рис. 6.4). При

достижении и превышении фактическим значением абсолютной деформации Δ каждого из допустимых значений, т.е. $\Delta \geq \Delta_{\text{доп}}$, можно будет рекомендовать определенный набор действий с учетом того, что для оценки эксплуатационного состояния строительной конструкции из древесины наряду с рассматриваемым параметром используется ряд других показателей и характеристик [64, 222]. Вполне очевидно, что по мере продолжения представленных в настоящей работе исследований и накопления опыта те количественные оценки, которые приведены в этом разделе, будут уточняться и корректироваться.

6.3. Порядок определения работоспособности нагельных соединений по количеству циклов увлажнения и высыхания древесины

Принципиальная особенность рассмотренного в предыдущем разделе показателя – абсолютной деформации нагельного соединения Δ – заключается в том, что он пригоден только для оценки состояния нагельных соединений, находящихся в эксплуатации. Его невозможно применить на стадии разработки и проектирования строительной конструкции, так как в настоящее время пока отсутствуют математические модели, позволяющие прогнозировать изменение Δ во времени вплоть до Δ_p в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

Что касается другого показателя – числа циклов увлажнения и высушивания древесины нагельного соединения $n_{ц}$, то этот параметр пригоден для оценки состояния и работоспособности нагельных соединений как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации строительных деревянных конструкций. Однако у этого показателя есть свой серьезный недостаток – очень сильная зависимость его предельного значения $n_{цр}$ от температуры (рис. 5.26) в отличие от Δ_p , который не зависит от этого фактора (разд. 6.2).

Преодолеть этот недостаток можно посредством приведения значения $n_{цр}$ к одинаковому значению температуры, в качестве которой целесообразно принять 20 °С. Действительно, во-первых, это значение близко к наиболее вероятному температурному режиму, соответствующему реальным условиям эксплуатации деревянных строительных конструкций; во-вторых, при этой температуре в экспериментах получена наибольшая длительность испытаний (табл. 5.5), и можно предположить, что в этом случае наиболее точно определены параметры разрушения нагельного соединения. Поэтому эти условия целесообразно принять в качестве базовых для определения состояния нагельных соединений (табл. 5.5).

Вполне очевидно, что предельно допустимую величину циклов увлажнения и высыхания $n_{доп}$ необходимо по аналогии с $\Delta_{доп}$ определять с учетом вероятностных показателей отказа (разрушения), т.е. вероятности безотказной работы нагельных соединений с учетом числа таких узлов m в составе строительной конструкции (разд. 6.2). Для этого согласно значениям $\Delta_{доп}$, взятом из рис. 6.4, по рис. 5.22 определяется длительность испытаний t_u для каждого значения $P_{Нбр} = 0,85 \div 0,9$ ($P_H = 0,1 \div 0,15$), а затем вычисляются допустимые значения $n_{0,1}$ и $n_{0,15}$ по формуле

$$n_{P_H} = \frac{t_u}{\Delta t}, \quad (6.8)$$

где $\Delta t_0 = 40,42$ ч согласно табл. 5.5 при 20 °С ($T_0 = 293$ К).

Результаты таких расчетов представлены графически на рис. 6.5.

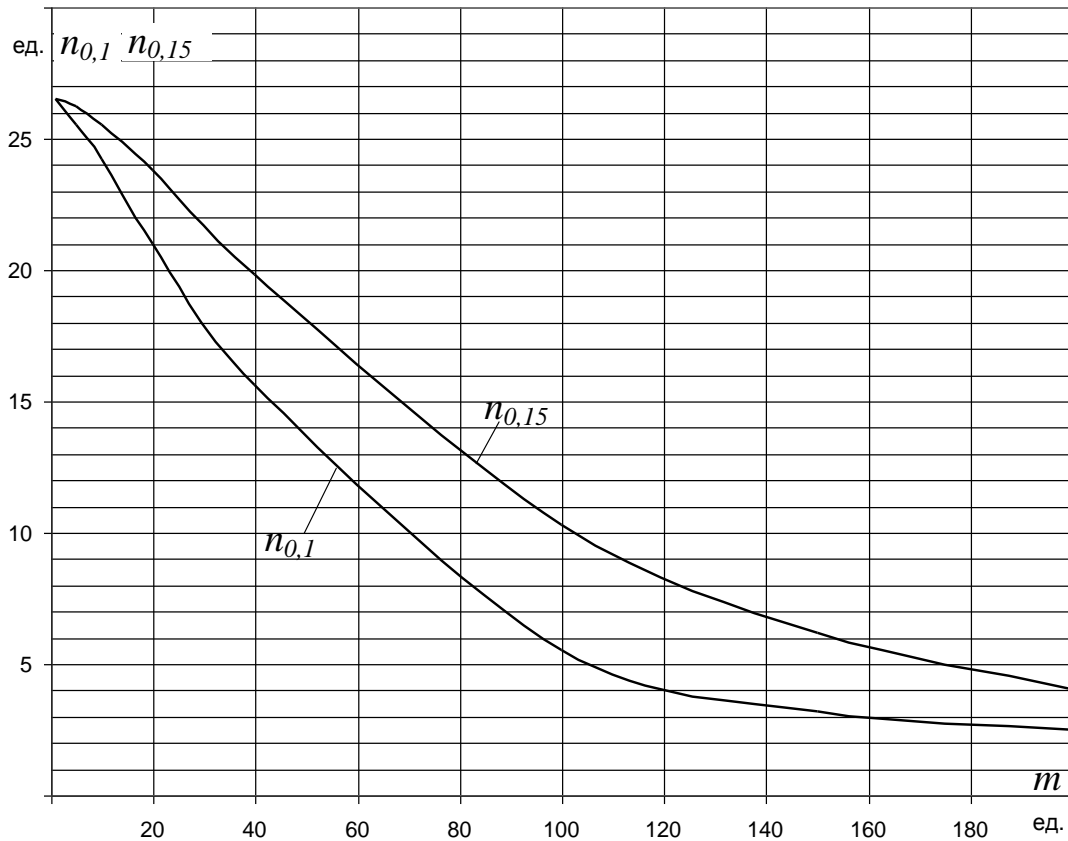


Рисунок 6.5. Зависимость допустимых значений числа увлажнения и высыхания древесины нагельных соединений $n_{0,1}$ и $n_{0,15}$ при $P_{Нбр} = 0,85 \pm 0,9$ ($P_H = 0,1 \pm 0,15$) от количества таких узлов в составе строительной деревянной конструкции при $20\text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 = 293\text{ K}$)

Однако зависимости, приведенные на рис. 6.5, справедливы только для одного, базового, значения температуры ($T_0 = 293\text{ K}$), а в реальных условиях процессы увлажнения и высушивания древесины нагельных соединений при различной температуре могут иметь продолжительность, отличающуюся от базовой ($\Delta t_0 = 40,42\text{ ч}$), что явилось причиной получения выражения (3.135) применительно к такой ситуации.

В этом случае целесообразно разработать и применять процедуру приведения реального циклического температурно-влажностного воздействия к эквивалентным параметрам, соответствующим базовым условиям. После такого приведения эти эквивалентные значения можно сравнивать с допустимыми (рис. 6.5) и делать практические выводы. Для решения такой задачи необходимо выражения (3.132) и (3.134) записать с следующим виде:

$$\frac{1}{K_3} = e^{-A \cdot n_3 \cdot \Delta t_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_0}\right)},$$

$$\frac{1}{K_3} = e^{-A \cdot \sum_{i=1}^{n_\phi} \Delta t_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_i}\right)},$$
(6.9)

где n_3 – эквивалентное число увлажнения и высушивания древесины нагельных соединений, соответствующее базовым условиям; n_ϕ – фактическое число таких циклов с реальными значениями Δt_i и T_i .

Вполне очевидно, что левые части уравнений (6.9) представляют собой одну и ту же величину, поэтому правые части этих уравнений можно приравнять, а составленное уравнение решить относительно n_3 . В результате таких действий получено следующее выражение

$$n_3 = \sum_{i=1}^{n_\phi} \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} \cdot \exp\left[\frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0}\right)\right] = \sum_{i=1}^{n_\phi} \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} \cdot \exp\left[8,91 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0}\right)\right],$$
(6.10)

где E принято согласно табл. 5.6.

Однако выражение (6.10) еще нельзя признать окончательным. Если обратиться к результатам эксперимента, при котором были получены параметры, принятые в качестве базовых (гл. 5), то можно видеть, что эти параметры получены при циклическом изменении влажности древесины W нагельных изменений в среднем от 10 до 30 % в каждом цикле увлажнения и высушивания. Вместе с тем в реальных условиях это изменение в отдельных циклах может быть меньше (а иногда и больше). Учет этого фактора можно выполнить посредством введения весового коэффициента $g_i = 0 \div 1$ для каждого цикла увлажнения и высыхания в реальных условиях, т.е. для каждого слагаемого формулы (6.10), в результате чего она приобретает вид

$$n_3 = \sum_{i=1}^{n_\phi} g_i \cdot \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} \cdot \exp \left[\frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0} \right) \right] = \sum_{i=1}^{n_\phi} g_i \cdot \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} \cdot \exp \left[8,91 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (6.11)$$

где

$$g_i = \frac{\Delta W_i}{\Delta W_0}, \text{ если } \Delta W_i \leq \Delta W_0, \quad (6.12)$$

$$g_i = 1, \text{ если } \Delta W_i \geq \Delta W_0,$$

где $\Delta W_i = W_{max} - W_{min}$ – диапазон изменения влажности древесины в процессе цикла увлажнения и высыхания; W_{max} и W_{min} – наибольшее и наименьшее значения влажности древесины в рассматриваемом i -м, цикле; $\Delta W_0 = 20\%$ – базовое значение диапазона изменения влажности в цикле увлажнения и высыхания.

Следует отметить, что величину ΔW_i можно определить только путем расчета процессов тепловлагопереноса с помощью предложенных в настоящей работе (гл. 2,3), например, с использованием зависимостей вида рис. 2.10, 2.11, 2.13, 2.14, 3.7–3.11, что нашло свое отражение в общей методологии создания и обеспечения в эксплуатации надежных и долговечных строительных конструкций из древесины (рис. 2.1).

Анализ формулы (6.11) позволяет сделать вывод, что приведение реальных условий эксплуатации к эквивалентному базовому показателю не составляет больших трудностей и существенно упрощает оценку или прогнозирование состояния нагельных соединений. Исходными сведениями для вычислений с помощью формулы (6.11) являются зависимости изменения во времени климатических параметров, представленные на рис. 2.2 (показания сухого и влажного термометров, влажности воздуха). При использовании автоматизированной системы (разд. 6.1) регистрация таких параметров и все вычисления производятся в автоматическом режиме. На стадии проектирования применяются сведения, полученные на основании многолетних метеонаблюдений соответствующих государственных служб. Вполне очевидно, если оказывается, что $n_3 \geq n_{0,1} \div n_{0,15}$, то с учетом значений

других контролируемых параметров будут рекомендованы определенные действия, как это предусмотрено упомянутой выше методологией (рис. 2.1). Как и в случае рис. 6.4, зависимости, представленные на рис. 6.5, будут в дальнейшем уточняться и корректироваться по мере накопления опыта, а также с учетом того, что имеет место постоянное совершенствование нагельных соединений с использованием МЗП, а также строительных конструкций с применением таких нагельных соединений [24, 112, 113, 223-232].

Для того, чтобы окончательно разработать рекомендации и четкий порядок действий при контроле состояния нагельных соединений по величине их абсолютной деформации (разд. 6.2) и числу увлажнений и высушиваний древесины нагельных соединений, как показано этом разделе, с учетом контроля других показателей строительной конструкции требуется проведение, по-видимому, достаточно обширных научно-технических разработок на основе результатов настоящей работы.

6.4. Экономическая эффективность учета процессов тепломассопереноса в древесине нагельных соединений

Вполне очевидно, что применение методик оценки состояния строительной конструкции из древесины (разд. 6.2, 6.3) будет иметь смысл прежде всего только при наличии экономического эффекта [113, 232-234].

В условиях рыночной экономики любое техническое или технологическое решение обязательно должно быть обосновано с экономической точки зрения. Такое положение объясняется стремлением хозяйствующего субъекта максимизировать свою прибыль за счет снижения затрат. Конечные затраты напрямую зависят от сметной стоимости объекта.

Особенностями формирования затрат в строительстве являются следующие положения:

- уникальность и разнообразие проектов (привязка к местности, используемые материалы и пр., поэтому даже типовые проекты в конечном итоге будут иметь разную стоимость);

- продолжительность производственного цикла (зависимость от инфляции и несоответствие проектной и фактической стоимости);

- материалоемкость (зависимость от стоимости исходного сырья и материалов);

- длительный цикл формирования стоимости конечной продукции.

Основой определения капитальных вложений является сметная стоимость. Основу нормативной базы составляют элементные сметные нормы в натуральных величинах, а расценки являются производными от норм. По уровню применения нормы и расценки делятся на государственные (ГЭСН и ФЕР); территориальные (ТЭСН и ТЕР); отраслевые (ведомственные); производственные (фирменные).

Наиболее часто при составлении сметной документации применяются федеральные и территориальные расценки. Приоритет отдается территориальным единичным расценкам, учитывающим особенности строительного производства и уровня цен на строительную продукцию регионов.

Современная классификация сметных нормативов предусматривает три типа классификации:

- в зависимости от объекта нормирования (на виды ресурсов или работ);

- по степени детализации (элементные или укрупненные, натуральные или стоимостные);

- в зависимости от уровня применения (государственные федеральные (ГФСН), производственно-отраслевые (ПОСН), территориальные (ТСН), фирменные (ФСН)).

Государственные федеральные сметные нормативы вводятся в действие Госстроем России и применяются при определении стоимости строительства, осуществляемого в различных отраслях народного хозяйства Российской Федерации. Производственно-отраслевые сметные нормативы вводятся в

действие министерствами и другими органами федерального управления для строительства, осуществляемого в пределах соответствующей отрасли. Территориальные сметные нормативы вводятся в действие органами исполнительной власти субъектов Федерации для строительства, осуществляемого на территории соответствующего региона. ПОСН и ТСН не должны противоречить государственным федеральным сметным нормативам или дублировать их. К фирменным сметным нормативам (собственная нормативная база пользователя) относятся индивидуальные сметные нормативы, учитывающие реальные условия деятельности конкретных организаций.

Нормативно-правовую базу сметного дела в строительстве составляют:

- Федеральный закон Российской Федерации № 44-ФЗ от 5 апреля 2013 г. «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд»;

- Гражданский кодекс Российской Федерации;

- Градостроительный кодекс Российской Федерации;

- Постановление Правительства РФ от 25 мая 2007 года № 145 «О порядке организации и проведения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий»;

- Постановление Правительства РФ от 16 февраля 2008 года № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию»;

- Постановление Правительства РФ от 18 мая 2009 г. № 427 «О порядке проведения проверки достоверности определения сметной стоимости объектов капитального строительства, строительство которых финансируется с привлечением средств федерального бюджета»;

- Приказ Минрегионразвития от 20 августа 2009 года № 353 «Об утверждении классификации сметных нормативов, подлежащих применению при определении сметной стоимости объектов капитального строительства, строительство которых финансируется с привлечением средств федерального бюджета»;

Федеральную нормативную базу составляют МДС (методические документы строительства), ГЭСН (государственные элементарные сметные нормы) и различные нормативные письма, которые поясняют особенности составления смет. К таким относятся:

- МДС 81-33.2004. Методические указания по определению величины накладных расходов;

- МДС 81-25.2001. Методические указания по определению величины сметной прибыли;

- ГЭСН 2001 и ГЭСНр 2001 – сборники государственных элементных сметных нормативов на строительные и специальные строительные работы.

- Письмо Госстроя РФ № НЗ-6292/10 от 06 октября 2003 года «О порядке определения сметной стоимости работ, выполняемых организациями, работающими по упрощенной схеме налогообложения»;

- Письма № 41099-кк/08 от 06 декабря 2010 года и № 3757-кк/08 от 21 февраля 2011 года «О порядке применения нормативов накладных расходов и сметной прибыли в строительстве».

Для обоснования экономической целесообразности ремонта фермы необходимо сопоставить результаты и цели с интересами участников проекта, то есть определить эффективность, которые проявляются в виде экономического, экологического и социального эффекта. Экономические эффекты, как правило, выражаются снижением эксплуатационных затрат или увеличением прибыли; экологические – уменьшением вредных выбросов в атмосферу, использованием экологически чистых материалов; социальные – повышением оплаты труда работников, улучшением условий труда.

Оценка эффективности проекта позволяет определить привлекательность данного проекта для возможных участников и объемы финансирования. Целью такой оценки является проверка реализуемости проекта и заинтересованности в нем всех его участников. Вывод об эффективности проекта дается на основании расчета ряда показателей эффективности, которая бывает общественной (социально-экономической) или коммерческой. При определении общественной

эффективности большое внимание уделяется социально-экономической значимости проекта, то есть результатам и затратам не только проекта, но и затратам и результатам в смежных секторах экономики, экологическим, социальным и иные внеэкономическим эффектам. Финансовые результаты реализации проекта определяются с позиций его осуществления для участника, реализующего проект, в предположении, что он производит все необходимые для реализации проекта затраты и пользуется всеми его результатами.

Показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения.

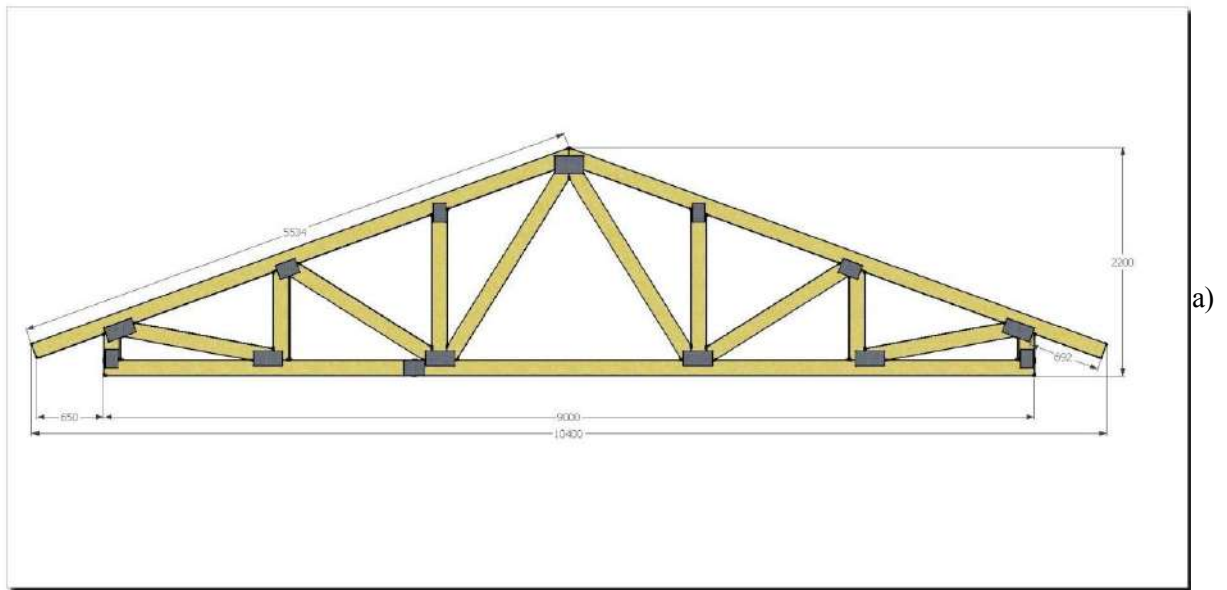
В рамках настоящей работы показатели экономической эффективности удобно рассмотреть на примере строительного деревянного изделия в виде фермы, выполненной из древесины с применением МЗП и предназначенной для устройства кровельных конструкций (рис. 6.6). Такие изделия получили широкое применение на практике.

Срок эксплуатации фермы составляет 50 лет, однако после 30 лет эксплуатации, как правило, происходит провисание балок. Для решения этой проблемы возможны два варианта – строительство новой фермы или ремонт существующей. Необходимо сравнить базовый (строительство новой фермы) и проектируемый (ремонт существующей фермы) варианты технологического решения.

Затраты на строительство новой фермы ($C_{\text{баз}}$) составят 279662,34 руб. (табл. 6.2, 6.3).

Таблица 6.2. Сводная смета строительства чердачного помещения, руб.

Показатель	Значение
1.Стоимость общестроительных работ	133170,52
в т.ч. материалы	20466,16
2. Накладные расходы	10229,13
3. Сметная прибыль	5531,34
Итого:	148930,99



а)

б)
)

Рисунок 6.6. Вариант конструктивного выполнения деревянной фермы (а) на МЗП и расположение деревянных ферм при устройстве кровельной конструкций

Таблица 6.3. Сводная смета строительства кровли, руб.

Показатель	Значение
1. Стоимость общестроительных работ	121944,76
в т.ч. материалы	91356,73
2. Накладные расходы	4796,91
3. Сметная прибыль	2588,40
4. Стоимость металломонтажных работ	1401,28
Итого:	130731,35

Затраты на ремонт фермы приведены в табл. 6.4.

Так как ремонт предполагается после 30 лет эксплуатации объекта, то для сравнения двух вариантов необходимо рассчитать остаточную стоимость объекта.

Таблица 6.4. Сводная смета ремонта фермы, руб.

Показатель	Значение
Прямые затраты всего, в т.ч.:	28756,74
- материалы	9073,18
- механизмы	432,67
- оплата труда	19250,89
Накладные расходы	19123,09
Плановые накопления	14257,87
Итого:	62137,70

Первоначальная стоимость объекта (ПС) составит 279662,34 руб. Так как срок службы составляет 50 лет, то годовая норма амортизации

$$Na = 1 / 50 = 0,02, \text{ или } 2 \%$$

Тогда годовая сумма амортизационных отчислений (Аг) составит

$$Ag = ПС * Na = 279662,34 * 0,02 = 5593,25 \text{ руб.}$$

Для сопоставимости вариантов рассчитаем остаточную стоимость (ОС) объекта с учетом износа после 30 лет эксплуатации, так как ремонтные работы планируется осуществлять именно в этот период времени:

$$ОС = ПС - Ag * 30 = 279662,34 - 5593,25 * 30 = 111864,84 \text{ руб.}$$

Тогда стоимость фермы с учетом затрат на ремонт

$$C_{\text{проект}} = 111864,84 + 62137,70 = 174002,54 \text{ руб.}$$

Таким образом, капитальные вложения (К) по базовому варианту (Кбаз) составят 279662,34 рубля, по проектируемому варианту (Кпроект) – 174002,54 рубля. Рассчитаем экономическую эффективность принятых технологических решений.

Удельные капитальные вложения (Куд), т.е. капитальные вложения на единицу площади, рассчитывают по формуле

$$K_{\text{уд}} = C / Q,$$

где С – затраты на строительство новой фермы или затраты на ремонт стропильной системы с учетом остаточной стоимости конструкции (капитальные вложения), руб.;

Q – годовой объем производства в натуральном измерении (площадь поверхности).

Стоимость строительства новой фермы является капитальными вложениями по базовому варианту, а стоимость фермы с учетом ремонта стропильной системы – капитальными вложениями по проектируемому варианту. С учетом того, что установлено 10 ферм с шагом 3 м, пролет фермы 12 м, площадь помещения, перекрываемая фермами, составит $(12 * 27) = 324 \text{ м}^2$.

Тогда удельные капитальные вложения по вариантам будут следующими:

- строительство новой фермы:

$$K_{уд}^{\text{баз}} = 279662,34 / 324 = 869,16 \text{ руб./м}^2;$$

- стоимость фермы с учетом ремонта стропильной системы:

$$K_{уд}^{\text{проект}} = 174002,54 / 324 = 537,05 \text{ руб./м}^2.$$

При сравнении нескольких вариантов проектных решений может использоваться показатель приведенных затрат (ПЗ), которые определяются по формуле

$$ПЗ = C_{см} + E_n * K_{уд},$$

где $C_{см}$ – сметная стоимость без учета плановых накоплений на единицу площади, руб./м²;

E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности, принимаемый при внедрении нового проекта (0,12).

Сметная стоимость без учета плановых накоплений по вариантам составит 0 руб./м², так как с помощью ремонта стропильной системы предполагается увеличение срока ее эксплуатации и затраты на ремонт будут относиться к капитальным вложениям. Тогда приведенные затраты на 1 м² будут таковы:

- стоимость строительства новой фермы:

$$ПЗ_{\text{баз}} = 0,12 * 869,16 = 104,3 \text{ руб./м}^3;$$

- стоимость фермы с учетом ремонта стропильной системы:

$$ПЗ_{\text{проект}} = 0,12 * 537,05 = 64,45 \text{ руб./м}^3.$$

Годовой экономический эффект определяется с учетом приведенных затрат по формуле

$$\text{Ээ} = (\text{ПЗ}_{\text{баз}} - \text{ПЗ}_{\text{проект}}) * Q.$$

$$\text{Ээ} = (104,3 - 64,45) * 324 = 12911,4 \text{ руб.}$$

Основные экономические показатели по проекту приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5. Техничко-экономические показатели проекта

Показатели	Ед. изм.	Варианты		Изменение	
		Базовый	Проектируемый	Ед. изм.	%
1. Площадь	м ²	324		0	0
2. Стоимость объекта после капитального ремонта	руб.	279662,34	174002,54	-105659,80	-37,78
3. Удельные капитальные вложения	руб./м ²	869,16	537,05	-332,11	-38,21
4. Удельные приведённые затраты	руб./м ²	104,3	64,45	-39,85	-38,21
5. Стоимость общестроительных работ	руб.	255155,3	28756,74	-226398,56	-88,73
6. Стоимость материалов	руб.	111822,9	9073,18	-102749,72	-91,89
5. Годовой экономический эффект	руб./год/м ²	12911,4		-	

Таким образом, проект позволяет снизить затраты на капитальный ремонт объекта на 105659,8 руб. Приведенные затраты по проектируемому варианту меньше по сравнению с базовым на 39,85 руб./м², что доказывает предпочтительность проектируемого варианта. Существенная экономия на стоимости общестроительных работ в размере 226398,56 руб. (в том числе на стоимости материалов на 102749,72 руб.) позволяет получить годовой экономический эффект в размере 12911,4 руб./год/м².

Следует отметить, что представленная оценка экономической эффективности носит предварительный характер, так как в настоящее время отсутствует опыт применения проектируемого варианта. Можно предположить, что эффективность этого варианта окажется выше. В первом варианте изготовление новой фермы, по-видимому, будет сопровождаться выводом всей строительной конструкции из эксплуатации на время проведения работ, что повлечет за собой определенный ущерб для владельца конструкции. Во втором варианте ремонтные работы будут проводиться на отдельных элементах, например, на нагельных соединениях, где достигнуты и превышены предельные

значения контролируемых параметров (разд. 6.2, 6.3). В таком случае указанный ущерб либо будет отсутствовать, либо будет иметь значительно меньшую величину, что пока не учитывается.

6.5. Выводы по главе 6

1. Описанная в настоящей главе (разд. 6.1) автоматизированная система мониторинга состояния строительных конструкций в процессе эксплуатации, которая была изготовлена и испытана в реальных условиях, является эффективным инструментом в деле обеспечения надежной и длительной работы строительных конструкций из древесины при организации процесса работы этой системы и разработке ее программного обеспечения с использованием результатов настоящей работы. По-видимому, в дальнейшем наличие таких систем станет обязательным в составе как существующих деревянных строительных конструкций, так и вновь создаваемых с условием ее связи через Интернет с центральным офисом владельца контролируемого объекта или управляющей компании. Действительно, стоимость такой автоматизированной системы составляет незначительную долю от стоимости строительной конструкции, а эффект от ее применения значителен.

2. Абсолютная деформация нагельного соединения является базовым параметром, характеризующим состояние такого узла и риск выхода его из строя. С учетом статистической природы предельного значения этого показателя была предложена (разд. 6.2) процедура определения его допустимых значений на основе использования методов теории вероятности и математической статистики. На основании рекомендаций литературных источников допустимые значения соответствуют следующим значениям вероятности безотказной работы (вероятности разрушения) нагельного соединения: $P_{Нбр} = 0,85 \div 0,9$ ($P_H = 0,1 \div 0,15$).

3. Недостатком показателя состояния нагельного соединения в виде значения абсолютной деформации является то, что он может быть использован

только в процессе эксплуатации строительной конструкции и его невозможно применить на стадии ее проектирования. В этом отношении более универсальным (т.е. пригодным и для проектирования, и для эксплуатации) является другой показатель – число циклов увлажнения и высушивания древесины нагельных соединений. Этот показатель имеет уже косвенный характер, однако, он очень тесно связан с предыдущим – абсолютной деформацией нагельного соединения (гл. 5). Поэтому при разработке порядка применения числа циклов увлажнения и высушивания для оценки работоспособности нагельного соединения также были использованы вероятностные оценки: допустимые значения этого показателя также соответствуют упомянутым выше значениям $P_{Нбр} = 0,85 \div 0,9$ ($P_H = 0,1 \div 0,15$).

4. Как показывают результаты настоящей главы, на допустимые значения абсолютной деформации и числа циклов увлажнения и высушивания очень сильное влияние оказывает общее количество нагельных соединений m в составе строительной конструкции из древесины. Например, при $m = 100$ допустимое значение абсолютной деформации снижается по сравнению с одиночным нагельным соединением ($m = 1$) в $2 \div 2,2$ раза. В случае допустимого числа циклов увлажнения и высухания это влияние еще сильнее: при тех же условиях уменьшение этого параметра составляет $2,6 \div 4,7$ в зависимости от величины $P_{Нбр}$ (P_H). Этот результат подтверждает необходимость обязательного учета при оценке надежности строительной деревянной конструкции числа m входящих в нее нагельных соединений.

5. Поскольку допустимые значения абсолютной деформации и числа циклов увлажнения и высухания древесины определены только для условий, принятых в качестве базовых: $\Delta t_0 = 40,42$ ч, 20 °С ($T_0 = 293$ К), разработана процедура приведения реальных циклически изменяющихся температурно-влажностных условий эксплуатации к эквивалентным параметрам, соответствующим базовым условиям, что позволяет, сравнивая эти эквивалентные значения с допустимыми, делать практические выводы о надежности нагельных соединений и вырабатывать меры по ее повышению.

6. Анализ содержания настоящей главы позволяет сделать вывод, что она завершает работу по формированию всех элементов (блоков) общей методологии, приведенной на рис. 2.1, которые были представлены к разработке, т.е. все задачи диссертационной работы решены.

7. Представленные в этой главе оценки (разд. 6.4) свидетельствуют о существенном экономическом эффекте от применения результатов настоящей работы на практике. Принципиальной причиной такого результата является то обстоятельство, что при эксплуатации строительной конструкции из древесины ее капитальный ремонт заменяется текущим ремонтом, который практически всегда сопровождается меньшими издержками. Показатели высокой экономической эффективности являются основанием внедрения в практику результатов настоящей работы, что отражено в Приложении Б.

8. Существует потребность в дальнейшем развитии разработок, представленных в настоящей работе, в целях уточнения теории надежности применительно к строительным деревянным конструкциям и конкретизации элементов комплексной системы оценки (обеспечения) надежных и долговечных строительных конструкций из древесины на основе достигнутых результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

5. Разработана инженерная методика расчета ресурса и мониторинга теплообменных процессов в древесине нагельного соединения для определения его эксплуатационных показателей, в которой используется два

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

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

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

8. Изучены закономерности процессов тепломассопереноса и их воздействия на показатели и характеристики нагельных соединений. На основании полученных результатов полностью подтвердилось предположение о существенном влиянии на работоспособность таких узлов (вплоть до разрушения) циклических процессов увлажнения и высыхания древесины в

сочетании с температурным фактором. Например, при повышении температуры с 20° С до 60° С число таких циклов, приводящих к разрушению нагельного соединения, снижается практически 9 раз. Разработаны на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований научно-обоснованные рекомендации по практическому применению результатов работы для создания и обеспечения эксплуатации надежных и долговечных строительных конструкций из древесины. Выполнена оценка показателей технико-экономической эффективности полученных результатов, показавшая высокую эффективность внедрения результатов работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ванин, С.И. Древесиноведение: учебник / С.И. Ванин – Третье издание. – Москва–Ленинград: Гослесбумиздат, 1949. – 472 с.
2. Воронин, Н. Н. Владимир. Боголюбово. Суздаль. Юрьев-Польской / Н. Н. Воронин. – Москва: Искусство, 1983.
3. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. – Москва: Издательство Московского государственного университета леса, 2005. – 340 с.
4. Семенов, К. В. Конструкции из дерева и пластмасс. Деревянные конструкции / К. В. Семенов, М. Ю. Кононова. – Санкт-Петербург : СПбГПУ, 2013. – 132 с.
5. Иванов, В.Ф. Деревянные конструкции гражданских зданий. Часть I / В.Ф. Иванов, – Москва–Ленинград: ГИЗ, 1927. – 224 с.
6. Каган, М.Е. Сопряжения элементов деревянных конструкций на нагелях / М.Е. Каган. – Москва: Издание Военно-инженерной академии Красной Армии, 1940. – С. 10-26.
7. Унифицированные деревянные фермы заводского изготовления с соединительными зубчатыми накладками (Швеция) // Реф. информ. Строительство и архитектура / ЦИНИС. – Серия VIII. – Вып. 15. – С. 16-17.
8. Ahrens, C. Die frühen Holzkirchen Europas / C. Ahrens. – Stuttgart, 2001. – В. II. – S. 290-291.
9. Harryson, Ch. Stångbörwerk av trämed spikplätsförband / Ch. Harryson // Byggmä staren. – 1973. – № 04. – S. 16-20.
10. Карлсен, Г.Г. Деревянные конструкции в военном строительстве / Г.Г. Карлсен. – Москва: ВИА, 1947. – 290 с.
11. Конструкции из дерева и пластмасс / Г.Г. Карлсен и др. – Москва: Стройиздат, 1975. – 668 с.

12. Алпаткина, Р.П. Метод исследования коэффициентов влагопроводности древесины / Р.П. Алпаткина // Изв. вузов. Лесной журнал. – 1968. – № 2. – С. 106-111.
13. Баженов, В.А. Пьезоэлектрические свойства древесины / В.А. Баженов – Москва: Изд-во АН СССР, 1959. – 238 с.
14. **Котлов, В.Г.** Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями: на металлических зубчатых пластинах: дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Котлов. – Казань, 1991. – 191 с.
15. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Лесная промышленность, 1980. – 436 с.
16. Миронов, В. Г. Влияние влажности древесины на ползучесть соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Миронов, В.А. Цепаев, А.В. Авдеев // Деревообрабатывающая промышленность. – 2000. – № 1. – С. 26-28.
17. Наумов, А.К. Исследование соединений легких деревянных несущих конструкций на металлических зубчатых пластинах: дис. ... канд. техн. наук / А.К. Наумов. – Москва: ЦНИИЭПсельстрой, 1975. – 143 с.
18. Перелыгин, Л. М. К вопросу о влиянии влажности на крепость древесины / Л. М. Перелыгин // Изучение и испытание древесины. – Москва, 1935. – С. 34-42.
19. Серговский, П.С. Влагопроводность древесины / П.С. Серговский // Деревообрабатывающая промышленность. – 1955. – № 2. – С. 3-8.
20. Серговский, П.С. Вопросы статики процесса сушки и увлажнения древесины / П.С. Серговский // Научные труды – Москва: МЛТИ, 1955. – № 4. – С. 98-123.
21. 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.

22. Чудинов, Б.С. Теоретические исследования теплофизических свойств и тепловой обработки древесины: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Чудинов Борис Степанович. – Ленинград: ЛТА им. С.М. Кирова, 1967. – 30 с.
23. Шубин, Г.С. О влиянии породы древесины на ее равновесную влажность / Г.С. Шубин, А.В. Чемоданов // Научные труды. – Москва: МЛТИ, 1981. – Вып. 117. – С. 61-66.
24. Травуш, В.И. Современные критерии прочности древесины и возможности программирования расчета комплексных конструкций при сложном напряженном состоянии / В.И. Травуш, К.П. Пятикрестовский, Б.С. Соколов // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. № 3. – С. 125-131.
25. Деревянное зодчество // Большая российская энциклопедия : в 35 т. / гл. ред. Ю. С. Осипов. – Москва: Большая российская энциклопедия, 2004. – 2017.
26. Пермиловская, А. Б. Церковная деревянная архитектура Русского Севера: традиции и православие / А. Б. Пермиловская // Вестник славянских культур. – Москва, 2019. – Т. 53.
27. Лежнин, А.В. Пять лет дружбы // Пожарное дело. – Москва: Информационный центр общероссийской комплексной системы информирования и оповещения населения в местах массового пребывания людей, 2019. – С. 62-63.
28. Ополовников, А. В. Кижы / А. В. Ополовников. – Изд. 2-е. – Москва: Стройиздат, 1976. – 159 с. (Памятники зодчества).
29. Федосов, С.В. Современные конструкции из древесины: историко-региональный, механико-конструкционный, температурно-влажностный аспекты / С.В. Федосов, **В.Г. Котлов** // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-

- летию Института строительства и архитектуры ПГТУ. – Йошкар-Ола, 2019. – С. 6-30.
30. Конструкции из дерева и пластмасс: учебное издание / Г.Н. Зубарев, Ф.А. Бойтемиров, В.М. Головина и др. – Москва: Академия, 2004. – 305 с.
 31. Конструкции из дерева и пластмасс: учебное пособие для студентов вузов / Г.Н. Зубарев, Ф.А. Бойтемиров, В.М. Головина и др.; под ред. Ю.Н. Хромца. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Академия, 2004. – 304 с.
 32. Конструкции из дерева и пластмасс: учебник для вузов / Ю.В. Слицкоухов, В.Д. Буданов, М.М. Гаппоев и др.; Под ред. Г.Г. Карлсена и Ю.В. Слицкоухова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1986. – 543 с.
 33. ГОСТ 23431-79*. Древесина. Строение и физико-механические свойства. Термины и определения. – Москва: Издательство стандартов, 1985. – 15 с.
 34. Справочное руководство по древесине (Лаборатория лесных продуктов США) Москва: Лесная промышленность, 1979. – 544 с.
 35. Боровиков, А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. – Москва: Лесная промышленность, 1989. – 296 с.
 36. Жуков, Е. Б. Технология сжигания древесных отходов с применением многократной циркуляции топлива: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Е.Б. Жуков. – Барнаул, 2005. – 178 с.
 37. Разумов, Е.Ю. Способ обработки термомодифицированной древесины / Е.Ю. Разумов, Р.В. Данилова // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 4. – С. 74-78.
 38. Бочков, М.В. Процессы тепломассопереноса в нагельных соединениях элементов деревянных стропильных конструкций при циклических

- режимах эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук / М.В. Бочков. – Иваново, 2017. – 151 с.
39. Larsen, N. J. Design of bolted joints / N. J. Larsen // Proceedings, CIB-W18 Meeting 1979. – Bordeaux, France 1979. – Pp. 12-72.
40. Aune, P. Lateral load-bearing capacity of nailed joints based on the yield theory: Theoretical development verification / P. Aune, M. Patton-Mallory. US Department of Agriculture, Forest Product Laboratory. Research Papers / FPL, – 1986. – 469 and 470.
41. Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе : сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений (22-23 сентября 2015 года) / РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга». – Курск, 2015. – 485 с.
42. Шмидт, А. Б. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры / А. Б. Шмидт, П. А. Дмитриев. – Москва: АСВ, 2002. – 262 с.
43. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – Москва: Энергия, 1968. – 470с.
44. Серговский, П.С. Исследование влагопроводности и разработка методов расчета процессов сушки и увлажнения древесины: автореф. ... дис. д-ра техн. наук / Серговский Павел Семенович – Москва: МЛТИ, 1953. – 42 с.
45. Серговский, П.С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины / П.С. Серговский. – Москва: Гослесбумиздат, 1952.
46. Чулицкий, Н.Н. Исследование водопроводности и водопоглощаемости древесины различных пород / Н.Н. Чулицкий // Научные труды. – Москва: ЦАГИ, 1932. – 122 с.
47. Мартинец, Д. В. Влияние влажности на прочность древесины /

- Д.В. Мартинец // Исследования по деревянным конструкциям; сборник трудов Моск. инж. строит. ин-т. – Москва, 1953. – № 13. – С. 41-58.
48. Янушевич, Л. В. Влияние влажности на физико-механические свойства древесины лиственницы, сосны и дуба / Л. В. Янушевич. – Киев: Госстройиздат, 1940. – 72 с.
49. Ребиндер, П.А. О формах связи влаги с материалами в процессе сушки / П.А. Ребиндер // Всесоюзное научно-техническое совещание по сушке. – Москва: Профиздат, 1958. – С. 20-33.
50. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С Шубин. – Москва: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.
51. Мартлей, И. Движение влаги в древесине / И. Мартлей // Сушка дерева. – Москва: Сельхозиздат, 1932.
52. 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.
53. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии / С.В. Федосов. – Иваново: ПресСто, 2010. – 364 с.
54. Рыжова, Н.В. Физика древесины: учебное пособие / Н.В. Рыжова, В.В. Шутов. – Кострома: Издательство КГТУ, 2009. – 75 с.
55. Ашкенази, Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е.К.Ашкенази. – Москва: Лесная промышленность, 1978. – 224 с.
56. ГОСТ 16483.33-77. Древесина. Метод определения удельного сопротивления выдергиванию гвоздей и шурупов. – Москва: Издательство стандартов, 1999. – 6 с.
57. Демитрова, И. П. Физика древесины: учебное пособие / И.П. Демитрова, А.Н. Чемоданов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – 160 с.

58. Оценка изменения прочности древесины в условиях повышенной влажности / В.Т. Ерофеев, О.В. Старцев, В.Д. Антошкин, С.С. Гудожников, Е.Г. Самолькина, И.В. Болдина, А.Ю. Махоньков // *Фундаментальные исследования*. – Пенза: Академия Естествознания, – 2014. – С. 2630-2638.
59. Жаксон, А. Современные деревянные конструкции в инженерных сооружениях: пер. с нем. / А. Жаксон; под ред. проф. Н.К.Лахтина. – Москва: ГНТН, 1925. – 84 с.
60. Федосов, С.В. Влияние динамики тепломассопереноса на характеристики эксплуатации нагельного соединения / С.В. Федосов, **В.Г. Котлов**, М.А. Иванова // *Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова*. – Москва, 2015. – С. 262-269.
61. ТУ 1111-002-48314050-98. Металлические зубчатые пластины (МЗП). – Москва, 1998.
62. ГОСТ 14918-80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Технические условия (с Изменениями № 1, 2). – Москва, 1980.
63. ТУ 5389-001-48314050-98. Конструкции деревянные на металлических зубчатых пластинках (ДФМЗП). – Москва, 1998.
64. СП 64.13330.2017. СНиП II-25-80 Деревянные конструкции. – Москва: Минстрой России, 2017. – 97 с.
65. ГОСТ 8486-86. Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия. – Москва: – Стандартиформ, 2006. – 6 с.
66. Цепаев, В.А. Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Цепаев. – Москва, 1982. – 180 с.
67. Рекомендации по проектированию и изготовлению дощатых конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах /

- ВЦНИИ строит. конструкций им. В. А. Кучеренко. – Москва: ЦНИИСК, 1983. – 40 с.: ил. - (Деревянные конструкции – Соединения).
68. Un nouveau procede construction des toits reduit de 50% le coat des materiaux et de 90% le temps necessair au montage // Journal de la Construction de la suisse romande. – 1972. – № 07. – Pp. 103-105.
69. Дурновский, А.М. Разработка и исследование соединений деревянных конструкций металлическими зубчатыми пластинами: дис. ... канд. техн. наук / А.М. Дурновский. – Балобаново, 1981. – 174 с.
70. Лоскутова, Д.В. Прочность и деформативность узловых соединений на металлических зубчатых пластинах в сквозных деревянных конструкциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Д.В. Лоскутова. – Томск, 2009. – 184 с.
71. 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. ... д-ра техн. наук / П.А. Дмитриев. – Новосибирск: НИСИ, 1975.
72. Комиссаров, А.П. Повышение эффективности производства строганного шпона: дис. ... д-ра техн. наук / А.П. Комиссаров. – Воронеж: ВГЛТА, 2002.
73. Комиссаров, А.П. Тепловые коэффициенты древесины лиственницы / А.П. Комиссаров // Деревообрабатывающая промышленность. – 1969. – №6. – С. 9-10.
74. Платонова, Р. М. Деревянные дощатые фермы на металлических зубчатых пластинах в надстройках реконструируемых зданий / Р. М. Платонова, Т. М. Давидович, М. А. Платонова // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Прикладные науки. – 2007. – № 12. – С. 25-29.

75. Коченов, В.М. Экспериментально-теоретические исследования деревянных конструкций / В.М. Коченов. – Москва–Ленинград: ГОНТИ, 1938. – С. 150-196.
76. Иванов, В.А., Конструкции из дерева и пластмасс / В.А. Иванов, В.З. Клименко. – Киев: Вища школа, 1983. – 279 с.
77. Ярцев, В.П. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации: учебное пособие / В.П. Ярцев, О.А. Киселёва. – Тамбов: Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2009. – 124 с.
78. Пузаков В.Е., Зиатдинов Р.Р., Гараева А.Ф., Тимербаева А.Л. Влияние ультрафиолетового излучения на смачивание древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. № 1. С. 15-22.
79. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Минск: Современная школа, 2005. – 608 с.
80. Буданов, В.Д. Вопросы применения болтов и нагелей из пластмассы в конструкциях из дерева и пластмассы / В.Д. Буданов, В.В. Туркин // Сборник трудов МИСИ. № 60. – Москва, 1968. – С. 95-102.
81. Краткая характеристика основных разрушителей древесины – Режим доступа: <http://wood-petr.ru/wood/prichiny-razrusheniya-drevesiny.php>.
82. Савин, В.К. Роль экологических и климатических факторов при застройке территории / В.К. Савин, Н.Г. Волкова, Ю.К. Попова // Жилищное строительство. – 2014. – № 6. – С. 56-59.
83. Трутко, В.В. Абиотические и биологические факторы, влияющие на разрушение древесины в период эксплуатации / В.В. Трутко, И.К. Божелко, В.Б. Снопков // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – № 2 (175). – С. 152-157.
84. Факторы, влияющие на свойства древесины – Режим доступа: <https://tree-forest.ru/property-trees/>.

85. СП 28.13330.2017. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии. – Москва: Минстрой России, 2017. – 110 с.
86. Конструкции из дерева и пластмасс: учебник для технических вузов / Д.К. Арленинов, Ю.Н. Буслаев, В.П. Игнатьев, П.Г. Романов, Д.К. Чахов. – Москва: АСВ, 2002. – 280 с.
87. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – Москва: Центр проектной продукции в строительстве, 2004. – 140 с.
88. Алпаткина, Р.П. О влагопроводности древесины главнейших отечественных пород / Р.П. Алпаткина // Деревообрабатывающая промышленность. – 1967. – № 9. – С.12-14.
89. Киселева, О.А. Влияние структуры и состава на прочность, долговечность и водостойкость древесных материалов в строительных изделиях и конструкциях / О.А. Киселева, В.П. Ярцев // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2008. – № 4. – С. 91-100.
90. Ломакин, А.Д. Защита большепролетных несущих клееных деревянных конструкций / А.Д. Ломакин // Строительные материалы. – 2015. – № 7. – С. 55-59.
91. Ломакин, А.Д. Защита деревянных конструкций в местах опирания на каменные стены и при их пересечении / А.Д. Ломакин // Жилищное строительство. – 2013. – № 10. – С. 23-27.
92. Рипачек, В. Биология разрушающих грибов / В. Рипачек. – Москва: Лесная промышленность, 1967. – 277 с.
93. Коперин, Ф.И. Защита древесины от гниения / Ф.И. Коперин. – Архангельск: Архангельское книжное издательство, 1961. – 192 с.
94. Горшин, С.Н. Консервирование древесины / С.Н. Горшин. – Москва: Лесная промышленность, 1977. – 336 с.
95. Миронова, С.И. Использование акустического детектора и СВЧ-нагрева для борьбы с жуками-древоточцами в деревянных

- строительных конструкциях / С.И. Миронова, С.С. Миронов // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2 (55). – С. 47-51.
96. Сморчков, А.А. Дефекты и повреждения деревянных конструкций от силовых и средовых факторов. Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций / А.А. Сморчков, С.А. Кереб, С.В. Дубраков // Сборник научных статей XXI научно-методической конференции ВИТУ, посвященной 90-летию со дня рождения профессора В.Т. Гроздова. – Санкт-Петербург: ВИТУ, 2017. – С. 152-156.
97. Лыков, А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – Москва: ГИТТЛ, 1954.
98. Методы решения задач тепломассопереноса. Теплопроводность и диффузия в неподвижной среде: учебное пособие / В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов, Н.Ц. Гатапова, А.Н. Колиух. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 80 с.
99. Федосов, С.В. Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного бетона: монография / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, А.М. Соколов. – Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, ИВГПУ, 2016. – 336 с.
100. Рудобашта, С.П. Теплотехника / С.П. Рудобашта. – Москва. КолосС, 2010. – 600 с.
101. Моделирование тепломассопереноса в системе газ-твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 1: Общая физико-математическая постановка задачи / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. – 2014. – №7. – С. 86-91.
102. Моделирование тепломассопереноса в системе газ-твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 2: Динамика полей температуры при произвольном законе изменения

- температуры воздушной среды / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. – 2014. – № 8. – С. 73-79.
103. Моделирование тепломассопереноса в системе газ–твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 3: Динамика и кинетика влагопереноса / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. – 2014. – № 9. – С. 63-69.
104. Моделирование тепломассопереноса в системе газ–твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Часть 4: Моделирование и численная реализация процессов конденсации, испарения и массопроводности влаги / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. – 2014. – № 10. – С. 44-50.
105. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П.Рудобашта. – Москва: Химия, 1980. – 248 с.
106. Лыков, А.В., Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А.Михайлов. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
107. 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.
108. Карташов, Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: учеб. пособие для вузов / Э. М. Карташов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 2001. – 550 с.
109. Аналитические методы теплопроводности : научное издание / В.А.Кудинов [и др.] ; науч. ред. Э.М. Карташов; М-во образования и науки Российской Федерации, Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2004. – 208 с.

110. Рудобашта, С. П. Химическая технология: диффузионные процессы: учебное пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры: в 2 ч. Ч. 1 / С. П. Рудобашта, Э.М. Карташов. – 3-е изд., пер. и доп. Москва: Юрайт, 2018. – 262 с.
111. Травуш, В.И. Устойчивость сжатых стержней из древесины при одновременном проявлении силового и средового воздействия / В.И. Травуш, В.И. Колчунов, К.О. Дмитриева // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – № 2 (265). – С. 50-53.
112. Травуш, В.И. Деревянные конструкции в современном строительстве / В.И. Травуш, Л.М. Ковальчук // Деревообрабатывающая промышленность. – 2007. – № 3. – С. 2-3.
113. Травуш, В.И. Разработка конструкций из цельной древесины для объектов инфраструктуры / В.И. Травуш, К.П. Пятикрестовский, А.А. Погорельцев, А.А. Клюкин // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций, 2018. – Т. 14, № 1. – С. 145-154.
114. Гринь, И. М. Проектирование и расчет деревянных конструкций: справочник / И. М. Гринь. – Киев, 1988. – 248 с.
115. ГОСТ Р 56711-2015. Соединения нагельного типа для деревянных конструкций. Технические условия / ВЦНИИ строит. конструкций им. В. А. Кучеренко. – Москва: ЦНИИСК, 2015.
116. **Котлов В.Г.** Деревянные конструкции с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов, С.Л. Машинова // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – № 3. – С. 53-54.
117. Михайленко, О.А. Напряженно-деформированное состояние древесины под шайбой, установленной на торце стержня прямоугольного сечения, при ударе вдоль волокон / О.А. Михайленко,

- П.А. Дмитриев // Известия вузов. Строительство. – 2013. – № 11-12. – С. 58-65.
118. Зиновьев, В. Б. Исследование напряженного состояния, возникающего в деревянных элементах при забивке в них нагелей огнестрельным способом / В. Б. Зиновьев, В. Н. Шведов // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции (апрель 1994 г.) / НГАС. – Новосибирск, 1994. – 30 с.
119. **Котлов, В.Г.** Некоторые особенности методов расчета стропильных конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах с учетом явлений тепломассопереноса / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Строительные материалы. – 2016. – № 5. – С. 52-58.
120. **Котлов, В.Г.** Динамика процессов тепломассопереноса и напряженно-деформированного состояния нагельных соединений строительных конструкций / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности. Часть I. – Иваново: Ивановская пожаро-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 183-188.
121. ГОСТ 16588-91. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. – Москва: Издательство стандартов, 1992.
122. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва: Наука, 1977. – С. 832.
123. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – Москва: Высшая школа, 1982. – 416 с.
124. Алоян, Р. М. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов : монография / Р.М. Алоян, С. В. Федосов, В. Е. Мизонов ;

М-во образования и науки Российской Федерации, Ивановский гос. архитектурно-строит. ун-т. – Иваново, 2011 г. – 255 с.

125. **Котлов, В. Г.** Динамика тепло- и влагопереноса в деревянных конструкциях, связанных металлическими креплениями [Dynamics of heat and moisture transfer in wooden structures tied with metallic fasteners] / С. В. Федосов, В. Г. Котлов // Технология сушки. Международный журнал, 2019. – С. 1-8; DOI: 10,1080 / 07373937.2019.1604543
126. **Котлов, В.Г.** Тепломассоперенос в древесине стропильных конструкций с нагелем в форме металлической зубчатой пластины / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 3 (50). – С. 179-185.
127. **Котлов В.Г.** Теория тепломассопереноса – основа физики процессов разрушения строительных материалов на примере древесины / С.В. Федосов, В.Г. Котлов // Механика разрушения строительных материалов и конструкций: материалы VIII Академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции. – Казань: КГАСУ, 2014. – С. 344-348.
128. **Котлов В.Г.** Температурные воздействия на строительные конструкции из дерева и пластмасс и их отражение в нормативно-технической документации / С. В. Федосов, С. А. Малбиев, В. Г. Котлов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 3. – С. 45-58.
129. Диткин, В. А. Операционное исчисление: учебное пособие для втузов / В. А. Диткин, А. П. Прудников. – Изд. 2, доп. – Москва: Высшая школа, 1975. – 407 с.
130. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт. – Москва: Лань, 2005.

131. Боровиков, А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. – Москва: Лесная промышленность, 1989. – 296 с.
132. Рамзин, Л.К. Расчёт сушилок в i - d -диаграмме / Л.К. Рамзин // Известия теплотехнического института. – 1927. – № 1(24).
133. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – Москва: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961. – 830 с.
134. Справочник по сушке древесины / под ред. Е.С. Богданова. – Москва: Лесная промышленность, 1990. – 304 с.
135. **Котлов, В.Г.** Характер изменения надмолекулярной структуры целлюлозы в процессе ее увлажнения / Ю.Б. Грунин, Л.Ю. Грунин, Н.Н. Шевелева, Д.С. Масас, С.В. Федосов, В.Г. Котлов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности, 2017. – № 2. – С. 233-236.
136. Чудинов, Б.С. Вода в древесине / Б.С. Чудинов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 270 с.
137. Комиссаров, Ю.А. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Д.П. Вент; под ред. Ю.А. Комиссарова. – Москва: Химия, 2011. – 1229 с.
138. Ерофеев, В.Т. Микробиологическое разрушение материалов: учебное пособие / В.Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов, Е. А. Морозов. – Москва: Ассоц. строит. вузов, 2008. – 124 с.
139. **Котлов, В.Г.** Причины снижения работоспособности деревянных конструкций при эксплуатации в среде с циклически изменяющимися температурно-влажностными условиями / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Жилищное строительство. – 2017. – № 12. – С. 20-25.
140. **Котлов, В.Г.** Влияние тепловлажностных условий эксплуатации на нагельные соединения элементов деревянных конструкций / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Актуальные проблемы и

- перспективы развития лесопромышленного комплекса: сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции. – Кострома: КГТУ, 2015. – С. 165-168.
141. **Котлов, В.Г.** Индустриальные деревянные конструкции на металлических зубчатых пластинах / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, А.А. Актуганов // Известия высших учебных заведений. Строительство, 2013. – № 11-12 (659-660). – С. 39-43.
142. **Котлов В.Г.** Разработка и внедрение пространственных конструкций из деревянных ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов // XXVII съезд КПСС и интенсификация производства: сб. – Йошкар-Ола, 1986. – С. 99-100.
143. **Котлов, В.Г.** Тепломассоперенос в древесине стропильных конструкций, соединенных нагелем в форме металлической зубчатой пластины (двумерная задача) / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. – Москва: МГУДТ, 2016. – Т. 1. – С. 304-308.
144. Химическая энциклопедия / гл.ред. И.Л. Кнунянц – Москва: Советская энциклопедия, 1988. – 625 с.
145. Деревообработка. Практическое руководство / сост.: И.М. Фридман. – Санкт-Петербург: ПРОФИКС, 2007. – С.544.
146. ГОСТ 7798-70. Болты с шестигранной головкой класса точности В. Конструкция и размеры / Министерство черной металлургии СССР. Москва. – 1970.
147. ГОСТ Р ИСО 3506-1-2009. Механические свойства крепежных изделий из коррозионностойкой нержавеющей стали. Часть 1: Болты, винты и шпильки.– Москва: Стандартинформ, 2010.

148. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия. – Москва: Стандартинформ. – 2008.
149. **Котлов, В.Г.** Методика экспериментального исследования массопроводных характеристик волокнистых и древесно-волокнистых материалов / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.М. Алоян, М.В. Бочков, М.А. Иванова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 5 (365). – С. 90-93.
150. **Котлов В.Г.** Результаты экспериментальных исследований образцов древесины при моделировании тепломассопереноса / В.Г. Котлов, М.А. Иванова, Р.А. Макаров // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. Вып. 5. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. – С. 165-168.
151. **Котлов В.Г.** Влияние степени агрессивности среды эксплуатации на работу деревянных конструкций с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции НАСКР. – Чебоксары: Чувашский университет, 2016. – С. 250-254.
152. Травуш, В.И. Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях / В.И. Травуш, Н.В. Федорова // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 5 (81). – С. 73-80.
153. EN 1995-1-1. Eurocode 5 - Design of Timber Structures.
154. ГОСТ 16483.19-72. Древесина. Метод определения влагопоглощения. – Москва: Издательство стандартов, 1999.
155. ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности. – Москва: Стандартинформ, 2006.

156. Johanson, K.W. Theory of timber connections / K.W. Johanson // International Association for Bridge and Structural Engineering. – 1949. № 9. – Pp. 249-262.
157. Соколова, М.Л. Анализ эстетических и технологических свойств древесины экзотических пород, применяемых в производстве светильников / М.Л. Соколова, А.А. Чичёв, А. А. Сукманов // Дизайн. Материалы. Технология. – Санкт-Петербург. – 2012. – № 3(23) – С. 64-68.
158. **Котлов В.Г.** Влияние конструктивных особенностей металлических зубчатых пластин на их несущую способность / В.Г. Котлов, С.С. Муратова // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2014. – № 17. – С. 267-269.
159. **Котлов, В.Г.** Исследование несущей способности нагелей-зубьев металлических зубчатых пластин / С.С. Муратова, В.Г. Котлов, А.К. Наумов // Научному прогрессу – творчество молодых: сборник материалов Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Часть 3. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2012. – С. 115-117.
160. **Котлов, В.Г.** Исследование несущей способности металлической зубчатой пластины типа МЗП-МарГТУ-1,5 / С.Н. Васильев, В.Г. Котлов, А.К. Наумов // Научному прогрессу – творчество молодых: сборник материалов Международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Часть 3. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. – С. 159-160.
161. **Котлов, В.Г.** Учет деформативности соединений на металлических зубчатых пластинах при расчете строительных конструкций / В.А. Цапаев, В.Г. Котлов // Исследование облегченных конструкций из

- древесины, фанеры и пластмасс: сб. – Ленинград: ЛИСИ, 1986. – С. 76-79.
162. **Котлов, В.Г.** Определение податливости узловых соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов // Расчет и испытание металлических и деревянных конструкций: сб. – Казань: КХТИ им. С.М. Кирова, 1986. – С. 95-97.
163. Исследование клевого соединения металлических зубчатых пластин с древесиной / А.В. Карельский, Е.В. Попов, И.Н. Бардин, Д.М. Ляпин, Б.В. Лабудин // Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 2 (1014). – С. 44-45.
164. **Котлов, В.Г.** Металлические зубчатые пластины в пространственных деревянных конструкциях: преимущества и перспективы использования: монография / В.Г. Котлов. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2020. – 190 с.
165. Карельский, А.В. Результаты натурных обследований деревянных клееных несущих конструкций покрытия / А.В. Карельский, Б.В. Лабудин, И.А. Сибирякова, М.С. Ишутина // Инженерные задачи: проблемы и пути решения: сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Высшей инженерной школы САФУ / М.В. Морозова, С.Е. Аксенов, 2019. – С. 7-10.
166. **Котлов, В.Г.** Экспериментальные исследования деревянных балок, усиленных витыми крестообразными стержнями / В.И. Жаданов, М.А. Аркаев, В.Г. Котлов // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 11. – С. 5-11.
167. **Котлов, В.Г.** Разработка модели материала древесины для конечно-элементного анализа строительных конструкций (часть 1) / В.Г. Котлов, Б.Э. Шарынин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 58-63.

168. **Котлов, В.Г.** Модельное испытание деревянных перекрестных ферм с соединением на металлических зубчатых пластинах / А.К. Наумов, В.Г. Котлов // Оптимизация, расчет и испытание металлических конструкций: межвузовский сб. – Казань, 1984. – С. 59-61.
169. **Котлов, В.Г.** Соединительный элемент для крепления деревянных деталей / В.Г. Котлов, А.В. Скобелев, К.В. Котлов // Сборник статей студентов, аспирантов и докторантов по итогам научно-технических конференций МарГТУ в 2003 г. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – С. 263-265.
170. **Котлов, В.Г.** Исследование узлового соединения на металлических зубчатых пластинах нового типа / С.Н. Васильев, С.В. Васильев, А.К. Наумов, В.Г. Котлов // Национальные проекты России как фактор ее безопасности и устойчивого развития в глобальном мире. Одиннадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Часть 2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. – С. 281-282.
171. **Котлов, В.Г.** Исследование кружальных арок из лиственных пород древесины с соединениями на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции НАСКР-2014. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2014. – С. 123-129.
172. Экспериментальные исследования условий эксплуатации стропильных конструкций в летний период / С.В. Федосов, **В.Г. Котлов**, Р.А. Макаров, М.А. Иванова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии, 2017. – № 3. – С. 56-62.

173. ГОСТ 29244-91 Пластмассы. Небольшие контейнеры для кондиционирования и испытания с использованием водных растворов для поддержания постоянного значения относительной влажности. – Москва: Издательство стандартов, 2004.
174. 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.
175. **Котлов, В.Г.** Влияние тепловлажностных условий эксплуатации на нагельные соединения элементов деревянных конструкций / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции. – Кострома: КГТУ, 2015. – С. 165-168.
176. Рудобашта, С.П. Тепломассоперенос при сушке цилиндрического тела в осциллирующем электромагнитном поле / С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, Э.М. Карташов // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 1. – С. 241-251.
177. **Котлов, В.Г.** Предпосылки для создания конечно-элементной модели соединения на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Котлов, Б.Э. Шарынин // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы I Международной (VII Всероссийской) конференции. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2012. – С. 97-100.
178. 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.
179. Roppel, P. Attic ventilation and moisture research study / P. Roppel,

- M. Lawton. – Homeowner Protection Office, Burnaby, BC, Canada, 2014. – 25 p.
180. **Котлов, В.Г.** Эксплуатация деревянных конструкций с соединениями на нагелях с учетом циклически изменяющихся температуры и влажности / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы V международной научно-практической конференции. 17 октября 2014 года. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2014. – С. 14-22.
181. **Котлов, В.Г.** Влияние условий эксплуатации на состояние древесины стропильных конструкций / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, М.А. Иванова // 2-ая Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию юбилею архитектурно-строительного факультета ОГУ «Инновационные строительные технологии. Теория и практика»: материалы конференции. 29-30 октября 2015 г. – Оренбург: Университет, 2015. – С. 371 – 374.
182. **Котлов, В.Г.** Автоматизация расчетов процесса сушки древесины: монография / А.Г. Поздеев, В.Г. Котлов, Ю.А. Кузнецова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. – 140 с.
183. Бойтемиров, Ф.А. Конструкции из дерева и пластмасс / Ф.А. Бойтемиров. – Москва: Академия, 2013. – 288 с.
184. Крицин, А.В. Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дис. ... канд. техн. наук/ А.В. Крицин. – Н.Новгород: Нижегор. гос. архит.-строит. ун-т, 2004. – 180 с.
185. Ващев, Н.В. Влияние влажности воздуха и древесины на прочность клеевых соединений / Н.В. Ващев. – Москва: Лесная промышленность, 1966. – 88 с.

186. Рудобашта, С.П. Кинетический расчет массообменных процессов для систем с твердой фазой (сушка и экстрагирование) / С.П. Рудобашта // Доклады ТСХА. – 2020. – С. 186-190.
187. Травуш, В.И. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований / В.И. Травуш, В.И. Колчунов, Е.В. Леонтьев // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 2. – С. 46-54.
188. **Котлов, В.Г.** Расчёт деревянных конструкций на МЗП с учётом единичной податливости соединений / В.Г. Котлов, А.В. Скобелев, К.В. Котлов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы Четвертой Всероссийской конференции. Ч. 1. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. – С. 94-98.
189. **Котлов В.Г.** Влияние податливости узловых соединений на МЗП на работу пространственного покрытия / В.Г. Котлов, А.В. Скобелев, К.В. Котлов // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – С. 127-130.
190. **Котлов, В.Г.** Пространственные конструкции из дощатых ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах / А.К. Наумов, В.Г. Котлов // Пространственные конструкции в Красноярском крае: сб. – Красноярск, 1987. – С. 110-116.
191. **Котлов, В.Г.** Прогрессивный способ изготовления деревянных конструкций / А.К. Наумов, В.Г. Котлов // Лесная промышленность. – 1992. – № 2. – 27 с.
192. **Котлов, В.Г.** Перспективные направления развития деревянных конструкций / В.Г. Котлов, С.Л. Машинова // Региональные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы межрегиональной

- научно-практической конференции. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. – С. 94-96.
193. Иванова М.А. Коррозия металлических крепежных изделий в древесине / М.А. Иванова, **В.Г. Котлов**, О.В. Филипчук // Модернизирующаяся Россия: культура, техника, человек: материалы Всероссийской (с международным участием) научной конференции студентов и молодых ученых. – Йошкар-Ола: ООО ИПФ «Стринг», 2015. – С. 127-131.
194. **Котлов, В.Г.** Физико-химические представления и математическая модель процесса коррозии металла в нагельном соединении стропильной конструкции / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Р.А. Макаров // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. Т. 1. – Москва: МГУДТ, 2016. – С. 291-295.
195. Varenik, K.A. Wood moisture accounting in creep equations / Varenik A.S., Sanzharovsky R.S., Labudin B.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ISPCIET 2019. – Yaroslav: Yaroslavl-the-Wise Novgorod State University, 2019. С. – 12-54.
196. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Минск: Современная школа, 2005. – 608 с.
197. ГОСТ 24454-80. Пиломатериалы хвойных пород. Размеры. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 4 с.
198. Патент на полезную модель 124395. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Устройство для определения теплофизических качеств ограждающих конструкций зданий и сооружений в натуральных условиях / Муреев П.Н., **Котлов В.Г.**, Феськов А.М., Макаров А.Н., Герасимов Б.Г., Муреев К.П.; заявитель и патентообладатель Поволжский

- государственный технологический университет. – № 2012133073/28; заявл. 01.08.2012; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2. – 2 с.
199. Патент на полезную модель 135420. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Лабораторная установка для определения теплотехнических характеристик образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / Муреев П.Н., Куприянов В.Н., Андрианов Ю.С., **Котлов В.Г.**, Хинканин Л.А., Герасимов Б.Г., Макаров А.Н., Муреев К.П.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2013126263/28; заявл. 07.06.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34. – 2 с.
200. Патент на полезную модель 153276. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Лабораторный комплекс для определения теплотехнических характеристик образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / Муреев П.Н., Куприянов В.Н., Андрианов Ю.С., **Котлов В.Г.**, Макаров А.Н., Сабанцева И.С., Муреев К.П., Иванов А.В.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2014132293/28; заявл. 05.08.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19. – 2 с.
201. Патент на полезную модель 94709. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Устройство для определения теплофизических качеств ограждающих конструкций зданий и сооружений по температуропроводности в натуральных условиях / Муреев П.Н., Краева Т.И., Куприянов В.Н., **Котлов В.Г.**, Хинканин А.П., Сабанцева И.С., Герасимов Б.Г., Муреев К.П.; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. – № 2010100388/22; заявл. 11.01.2010; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 1 с.

202. Исследование теплофизических свойств образцов стеновых ограждений при помощи автоматизированного лабораторного комплекса в натуральных условиях / П.Н. Муреев, **В.Г. Котлов**, А.Н. Макаров, И.С. Сабанцева, А.В. Иванов // Труды Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Технологическая. Вып. 3. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. – С. 212-216.
203. Автоматизированный лабораторный комплекс для проведения теплофизических исследований наружных образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / П.Н. Муреев, **В.Г. Котлов**, А.Н. Макаров, И.С. Сабанцева, К.П. Муреев, А.В. Иванов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции НАСКР – 2014. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2014. – С. 28-32.
204. Патент на полезную модель 94709. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Устройство для определения теплофизических качеств ограждающих конструкций зданий и сооружений по температуропроводности в натуральных условиях / Муреев П.Н., Краева Т.И., Куприянов В.Н., **Котлов В.Г.**, Хинканин А.П., Сабанцева И.С., Герасимов Б.Г., Муреев К.П.; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. – № 2010100388/22; заявл. 11.01.2010; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 1 с.
205. Патент на полезную модель 124395. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Устройство для определения теплофизических качеств ограждающих конструкций зданий и сооружений в натуральных условиях / Муреев П.Н., **Котлов В.Г.**, Феськов А.М., Макаров А.Н., Герасимов Б.Г., Муреев К.П.; заявитель и патентообладатель Поволжский

- государственный технологический университет. – № 2012133073/28; заявл. 01.08.2012; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2. – 2 с.
206. Патент на полезную модель 135420. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Лабораторная установка для определения теплотехнических характеристик образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / Муреев П.Н., Куприянов В.Н., Андрианов Ю.С., **Котлов В.Г.**, Хинканин Л.А., Герасимов Б.Г., Макаров А.Н., Муреев К.П.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2013126263/28; заявл. 07.06.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34. – 2 с.
207. Патент на полезную модель 153276. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Лабораторный комплекс для определения теплотехнических характеристик образцов стеновых ограждений при длительных режимах испытаний год и более в натуральных условиях / Муреев П.Н., Куприянов В.Н., Андрианов Ю.С., **Котлов В.Г.**, Макаров А.Н., Сабанцева И.С., Муреев К.П., Иванов А.В.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2014132293/28; заявл. 05.08.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19. – 2 с.
208. Патент на изобретение 2454659. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ оценки теплофизических характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений, выполненных из кирпича, в зимний период по результатам испытаний в натуральных условиях / Муреев П.Н., Куприянов В.Н., Краева Т.И., **Котлов В.Г.**, Муреев К.П.; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. – № 2010132407/28; заявл. 02.08.2010; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18. – 7 с.

209. Патент на изобретение 2650054. Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Измерительный комплекс контроля теплотехнических параметров наружной стены при длительных режимах испытаний в натуральных условиях / Макаров А.Н., Муреев П.Н., Куприянов В.Н., **Котлов В.Г.**, Макаров Р.А., Гилязова О.С., Макарова О.П.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2016112653; заявл. 04.04.2016; опубл. 06.04.2018, Бюл. № 10. – 1 с.
210. **Котлов, В.Г.** Теоретические основы и методы повышения энергоэффективности жилых и общественных зданий и зданий текстильной и легкой промышленности / С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, В.Г. Котлов, А.Б. Петрухин, Л.А. Опарина, И.А. Мартынов. – Иваново: ИВГПУ, 2018. – 319 с.
211. Патент на изобретение 2607561. Российская Федерация, МПК E04B 1/76. Теплоизоляционная конструкция наружной стены / Макаров А.Н., Муреев П.Н., Куприянов В.Н., **Котлов В.Г.**, Макаров Р.А., Гилязова О.С.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2015131657; заявл. 29.07.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 1 с.
212. **Котлов В.Г.** К определению предела огнестойкости деревянных конструкций с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах (МЗП) / В.Г. Котлов, Б.Ю. Петухов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы Пятой Всероссийской конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. – С. 77-80.
213. **Котлов, В.Г.** Покрытие из пространственных деревянных ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах / Р.И. Хисамов, В.Г. Котлов // Пространственные прогрессивные

- конструкции и перспективы их применения: сб. – Свердловск, 1985. – 74 с.
214. **Котлов В.Г.** К расчету дощатых ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах / А.К. Наумов, В.Г. Котлов // Оптимальные металлические и деревянные конструкции: сб. – Казань, 1988. – С. 59-64.
215. Авторское свидетельство № 916681. СССР. Пространственное покрытие / Марийский политехнический институт им. А.М. Горького; авт. изобр. А.К. Наумов, В.А. Наумов, Д.А. Наумов, **В.Г. Котлов.** – № 2889555/29-33; заявл. 04.03.1980; опубл. 30.03.1982, Бюл. № 12. – 3 с.
216. Авторское свидетельство № 1020533. СССР. Складная пространственная ферма треугольного сечения / Казанский инженерно-строительный институт и Марийский политехнический институт; авт. изобр. Р.И. Хисамов, А.К. Наумов, **В.Г. Котлов.** – № 3340475/29-33; заявл. 01.07.1981; опубл. 30.05.1983, Бюл. № 20. – 3 с.
217. Болотин, В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. – Москва: Стройиздат, 1971. – 254 с.
218. Ржаницын, Р.А. Теория расчета строительных конструкций на надежность / Р.А. Ржаницын. – Москва: Стройиздат, 1978. – 239 с.
219. Металлические конструкции / Н.С. Стрелецкий, А.Н. Гениев, Е.И. Беленя, В.А. Балдин, Е.Н. Лессиг // Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. – Москва, 1962. – 776 с.
220. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. – Москва: Наука, 1985. – 640 с.
221. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика /

- В.Е. Гмурман. – Москва: Юрайт-Издат, Высшее образование, 2009 г. – 480 с.
222. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1, 2). – Москва: Стандартинформ, 2019. – (Приложения Д 1.5, Д 1.7, Д 2.2.)
223. Авторское свидетельство № 1196457. СССР. Узел соединения деревянных элементов / Казанский инженерно-строительный институт; авт. изобр. И.Л. Кузнецов, **В.Г. Котлов**. – № 3810532/29-33; заявл. 05.11.1984; опубл. 07.12.1985, Бюл. № 45. – 2 с.
224. Авторское свидетельство № 1206410. СССР. Способ сборки покрытия из перекрестных ферм / Казанский инженерно-строительный институт и Марийский политехнический институт; авт. изобр. Р. И. Хисамов, А.К. Наумов, **В.Г. Котлов**. – № 3436871/29-33; заявл. 03.05.1982; опубл. 23.01.1986, Бюл. № 3. – 2 с.
225. Авторское свидетельство № 1596031. СССР. Узел соединения деревянных элементов / Марийский политехнический институт им. А.М. Горького; авт. изобр. А.К. Наумов, **В.Г. Котлов**, А.А. Шарин. – № 4603057/31-33; заявл. 09.11.1988; опубл. 30.09.1990, Бюл. № 36. – 2 с.
226. Авторское свидетельство № 1604945. СССР. Соединительный элемент для крепления деревянных деталей / Марийский политехнический институт им. А.М. Горького; авт. изобр. **В.Г. Котлов**, Н.Н. Степанов. – № 4612756; заявл. 01.12.1988; опубл. 1991, Бюл. № 1. – 2 с.
227. Патент на полезную модель 127775. Российская Федерация, МПК E04B 1/49. Крепежный элемент для соединения деревянных деталей / **Котлов В.Г.**, Шарынин Б.Э., Муратова С.С.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2012152107/03; заявл. 04.12.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 1 с.

228. Патент на полезную модель 165965. Российская Федерация, МПК E04C 3/14. Многослойный клееный стеновой брус / Макаров А.Н., Муреев П.Н., **Котлов В.Г.**; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2016123590/03; заявл. 14.06.2016; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31. – 1 с.
- 229 **Котлов, В.Г.** Разработка опытно-промышленного образца металлической зубчатой пластины с внедренными решениями по оптимизации / В.Г. Котлов, Б.Э. Шарынин // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы Международной научно-практической конференции. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. – С. 131-134.
230. **Котлов, В.Г.** Совершенствование конструктивных решений покрытий из деревянных ферм с узловыми соединениями на МЗП / В.Г. Котлов, С.Л. Машинова // Строительные конструкции и механика твердого деформируемого тела: сборник статей. Вып. 1. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – С. 43-51
231. **Котлов, В.Г.** Оптимизация конструктивных особенностей металлических зубчатых пластин / Б.Э. Шарынин, В.Г. Котлов // Россия в глобальном мире: вызовы и перспективы развития. Четырнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием. Часть 2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С. 276-278.
232. Сафин, Р.Р. Введение в профессиональную деятельность «строительство деревянных зданий и сооружений» / Р.Р. Сафин, Е.Ю. Разумов: учебное пособие. – Москва, 2015. – 210 с.
233. **Котлов, В.Г.** Экономическая эффективность применения деревянных конструкций в Республике Марий Эл / А.Н. Шестакова, В.Г. Котлов // Творчество студентов – экономике России: сборник статей

региональной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 164 с.

234. Хасаншин, Р.Р. Основы строительного дела: учебное пособие / Р.Р. Хасаншин, Р.Р. Сафин, Р.Т. Хасаншина. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2015. – 85 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица А1. Результаты испытания нагельного соединения на МЗП при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Операция/температура		Время <i>t</i> , мин	Абсолютная деформация, Δ , мм	Влажность, <i>W</i> , %	Δl , мм	Относительная деформация, ϵ
полив	20 С	0	0,493	12	0	0,00
		3	0,786	18	0,293	0,45
		24,5	1,201	28	0,708	1,09
		27,5	1,26	30,6	0,767	1,18
сушка	20 С	51,5	1,284	20	0,791	1,22
		73	1,333	15	0,84	1,29
		76,5	1,353	13,5	0,86	1,32
		79	1,396	13	0,903	1,39
		143	1,543	11,5	1,05	1,62
полив	20 С	145,5	1,572	24	1,079	1,66
		152,5	1,573	30	1,08	1,66
сушка	20 С	168	1,578	15	1,085	1,67
		172	1,581	10	1,088	1,67
		174	1,586	9	1,093	1,68
		192,5	1,591	8,5	1,098	1,69
полив	20 С	198,5	1,602	15	1,109	1,71
		218	1,603	28	1,11	1,71
		224	1,604	31	1,111	1,71
сушка	20 С	248	1,665	14,9	1,172	1,80
		260,5	1,666	13	1,173	1,80
		271,5	1,68	12	1,187	1,83
полив	20 С	274,5	1,729	30	1,236	1,90
сушка	20 С	280,5	1,743	19	1,25	1,92
		295,5	1,744	13	1,251	1,92
		302,5	1,753	12	1,26	1,94
		305	1,754	11	1,261	1,94
		320	1,758	10	1,265	1,95
полив	20 С	323,5	1,797	29	1,304	2,01
сушка	20 С	328,5	1,816	15	1,323	2,04
		355	1,817	12	1,324	2,04
полив	20 С	358	1,865	30	1,372	2,11
сушка	20 С	408	1,866	11	1,373	2,11
полив	20 С	413	1,904	30	1,411	2,17
сушка	20 С	433	1,953	16	1,46	2,25
		438	1,954	12	1,461	2,25
полив	20 С	444	1,963	30	1,47	2,26

Продолжение таблицы А1.

сушка	20 С	459	1,968	16	1,475	2,27
		464	1,967	14	1,474	2,27
		484	1,97	11	1,477	2,27
полив	20 С	485,5	1,978	31	1,485	2,28
сушка	20 С	510,5	1,979	12	1,486	2,29
полив	20 С	516,5	2,002	30	1,509	2,32
сушка	20 С	588	2,003	13	1,51	2,32
		608	2,004	11	1,511	2,32
полив	20 С	612	2,061	32	1,568	2,41
сушка	20 С	627	2,08	16	1,587	2,44
		634	2,081	12	1,588	2,44
полив	20 С	636	2,114	30	1,621	2,49
сушка	20 С	654	2,144	14	1,651	2,54
		657	2,145	12	1,652	2,54
полив	20 С	660	2,173	30	1,68	2,58
сушка	20 С	678	2,217	15	1,724	2,65
полив	20 С	681	2,236	31	1,743	2,68
сушка	20 С	730	2,237	12	1,744	2,68
полив	20 С	732	2,275	30	1,782	2,74
сушка	20 С	751	2,305	12	1,812	2,79
полив	20 С	754	2,339	32	1,846	2,84
сушка	20 С	775	2,363	12	1,87	2,88
полив	20 С	777	2,397	26	1,904	2,93
		780	2,402	32	1,909	2,94
сушка	20 С	800	2,407	12	1,914	2,94
полив	20 С	805	2,456	32	1,963	3,02
сушка	20 С	825	2,485	12	1,992	3,06
полив	20 С	827	2,5	30	2,007	3,09
сушка	20 С	834	2,51	18	2,017	3,10
		848	2,52	12	2,027	3,12
полив	20 С	850	2,554	30	2,061	3,17
сушка	20 С	876	2,563	12	2,07	3,18
полив	20 С	880	2,637	30	2,144	3,30
сушка	20 С	900	2,646	12	2,153	3,31
полив	20 С	902	2,678	28	2,185	3,36
		903	2,68	30	2,187	3,36
сушка	20 С	925	2,686	12	2,193	3,37
полив	20 С	927	2,734	30	2,241	3,45
сушка	20 С	949	2,739	12	2,246	3,46
полив	20 С	952	2,788	30	2,295	3,53
сушка	20 С	955	2,813	22	2,32	3,57
		976	2,837	12	2,344	3,61

Продолжение таблицы А1.

полив	20 С	981	2,881	30	2,388	3,67
сушка	20 С	1000	2,9	12	2,407	3,70
полив	20 С	1003	2,964	31	2,471	3,80
сушка	20 С	1023	3,003	12	2,51	3,86
полив	20 С	1025	3,115	30	2,622	4,03
сушка	20 С	1070	3,203	12	2,71	4,17
полив	20 С	1071	3,501	30	3,008	4,63
			разрушение			

Таблица А2. Результаты испытания нагельного соединения на МЗП при t=40 °С

Операция/температура		Время <i>t</i> , мин	Абсолютная деформация, Δ , мм	Влажность , <i>W</i> , %	Δl , мм	Относительная деформация, ϵ
полив	40 С	0	0,43	9,2	0	0,00
		2,5	0,962	21,7	0,532	0,82
		4,5	1,025	25,6	0,595	0,92
		7	1,118	29,9	0,688	1,06
сушка	40 С	20,5	1,616	10	1,186	1,82
полив	40 С	24,5	1,802	21	1,372	2,11
		25,5	1,807	23	1,377	2,12
		29	1,83	30	1,4	2,15
сушка	40 С	32	2,007	12	1,577	2,43
		44,5	2,271	10	1,841	2,83
		50,5	2,334	9	1,904	2,93
полив	40 С	52	2,388	22	1,958	3,01
		54	2,402	29	1,972	3,03
		58	2,422	32	1,992	3,06
сушка	40 С	69,5	2,852	10	2,422	3,73
полив	40 С	71,5	2,909	20	2,479	3,81
		73	2,95	25	2,52	3,88
		74,5	2,954	30,3	2,524	3,88
сушка	40 С	76,5	2,964	18	2,534	3,90
		77,5	3,027	13,2	2,597	4,00
		93	3,369	7	2,939	4,52
полив	40 С	95	3,423	15	2,993	4,60
		98	3,44	21	3,01	4,63
		100	3,447	31	3,017	4,64
сушка	40 С	103	3,521	15	3,091	4,76
		119	4,023	7	3,593	5,53
полив	40 С	120	4,121	20	3,691	5,68
		121	4,13	30	3,7	5,69
сушка	40 С	140	4,8	6	4,37	6,72
полив	40 С	141	4,83	15	4,4	6,77
			разрушение			

Таблица А3. Результаты испытания нагельного соединения на МЗП при $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Операция/температура		Время, <i>t</i> , мин	Абсолютная деформация, Δ , мм	Влажность, <i>W</i> , %	Δl , мм	Относительная деформация, ϵ
полив	60 С	0	1,04	6	0	0,00
		0,33	1,382	16	0,342	0,53
		3	1,816	32	0,776	1,19
сушка	60 С	7	1,997	15	0,957	1,47
		18	2,251	10,2	1,211	1,86
полив	60 С	20	2,3	21	1,26	1,94
		25,5	2,324	23	1,284	1,98
		27	2,363	29	1,323	2,04
сушка	60 С	30	2,422	12	1,382	2,13
		41,5	2,983	8	1,943	2,99
		43	3,022	6	1,982	3,05
полив	60С	45,5	3,325	20,4	2,285	3,52
		47,5	3,394	25	2,354	3,62
		49,5	3,433	30	2,393	3,68
сушка	60 С	51,5	3,5	22	2,46	3,78
			разрушение			

Таблица А4. Результаты испытания болтового нагельного соединения при $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Операция/температура		Время	Абсолютная деформация, мм	Влажность, %	Δl , мм	Относительная деформация, ϵ		
полив	40 С	0 ч	0,43	9,2	0	0,00		
		2.5 ч	0,962	21,7	0,962	1,48		
		4.5 ч	1,025	25,6	1,025	1,58		
		7 ч	1,118	29,9	1,118	1,72		
сушка	40 С	20.5 ч	1,616	10	1,616	2,49		
полив	40 С	24.5 ч	1,802	21	1,802	2,77		
		25.5 ч	1,807	23	1,807	2,78		
		29 ч	1,812	30	1,812	2,79		
		сушка	40 С	32 ч	2,007	12	2,007	3,09
		44.5 ч	2,271	10	2,271	3,49		
		50.5 ч	2,334	9	2,334	3,50		
		полив	40 С	52. ч	2,388	22	2,388	3,67
		54 ч	2,402	29	2,402	3,71		
		58 ч	2,422	32	2,422	3,73		
		сушка	40 С	69.5 ч	2,852	10	2,852	4,39
		полив	40 С	71.5 ч	2,909	20	2,909	4,48
				73 ч	2,95	25	2,95	4,54
74.5 ч	2,954			30,3	2,954	4,54		
сушка	40 С			76.5 ч	2,964	18	2,964	4,56
		77.5 ч	3,027	13,2	3,027	4,66		
		93 ч	3,369	7	3,369	5,18		
		полив	40 С	95 ч	3,423	15	3,423	5,27
				98 ч	3,44	21	3,44	5,29
100 ч	3,447			31	3,447	5,30		
сушка	40 С			103 ч	3,521	15	3,521	5,42
			разрушение					

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
АКТЫ И СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ

19 октября 4

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. отделом культуры
Советского райисполкома
Марийской АССР
Моторова А.А. / Моторова А.А. /

СПРАВКА

Дана Казанскому инженерно-строительному институту в том, что результаты исследований, выполненных в соответствии с договором о научно-техническом содружестве с Марийским политехническим институтом им. М. Горького № 19/81 по теме "Разработка деревянных конструкций с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах" Казанским ИСИ с участием Котлова В.Г., внедрены при строительстве покрытия эстрады танцплощадки в п. Советском Марийской АССР.

Покрытие в плане 12х12 м представляет из себя систему перекрестных деревянных ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах.

Гл. архитектор района: *Лебедев* /А.Т.Лебедев/

РСФСР

Марийская АССР	Колхоз
Оршанский район	им. Мичурина
Великопольский сельский совет	Великопольского сельского совета
Мичурин аулсовет	Оршанского района
колхоз	Марийской АССР

197 г

425253 с. Великополье

С П Р А В К А

Дана КОТЛОВУ Виталию Геннадьевичу в том, что результаты его исследований, учитывающие податливость узловых соединений на металлических зубчатых пластинах (МЭП) и эксцентриситеты в узлах пересечения перекрестных ферм, использованы при разработке проекта покрытия из перекрестных деревянных ферм с узловыми соединениями на МЭП и внедрены при строительстве крытого навеса для ремонта и хранения комбайнов размером 12х24 м в колхозе им. Мичурина Оршанского района Марийской АССР. В.Котлов принимал непосредственное участие в выполнении работ и является одним из авторов проекта.



Председатель колхоза им. Мичурина
Оршанского района Марийской АССР

В.А. Янишев

В.А. ЯНИШЕВ



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

«УТВЕРЖДАЮ»
 Директор АО «ПИ Агропроект»
 Н.Д.Баздунов
 Для
 ДОКУМЕНТОВ
 20 ноября 2016 г.

А К Т

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований на тему: «Разработка рекомендация по проектированию, 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 теплопереноса» 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, ОКАТО 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.

Продолжение приложения Б

УТВЕРЖДАЮ:

д.т.н., профессор,
проректор по развитию
университетского комплекса
ФГБОУ ВО «Поволжский
государственный технологический
университет»

Роженцов А.А.

«08» августа 2020 г.

**СПРАВКА****о внедрении результатов научно-исследовательской работы**

Процессы, связанные с циклически изменяющимися температурой и влажностью, приводят к неотвратимым изменениям в деревянных конструкциях. В нагельных соединениях в виде болта через 50 лет эксплуатации произошла коррозия металла и гниение древесины на объекте – учебный корпус № 2 Поволжского государственного технологического университета, расположенный по адресу г. Йошкар-Ола, ул. Советская, дом 158, построен в 1955 году.

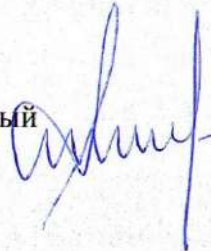
Объект представляет из себя, кирпичное здание, а покрытие - деревянные стропильные конструкции. Конструкции выполнены в виде составной балки из двух элементов, соединенных между собой болтами диаметром 22 мм, с шагом 1000 мм. Кровля над стропильными конструкциями выполнена по обрешетке – металлическая. Расстояние между кровельным железом и болтами, соединяющими элементы стропильных конструкций, составляет 40 мм.

При обследовании данного объекта в 2005 году были обнаружены дефекты в стропильных конструкциях. В результате изменения температурно-влажностного режима в чердачном помещении за 50 лет эксплуатации, из-за нагрева и охлаждения болта, приводящего к выпадению конденсата, возникли процессы гниения древесины и

коррозии металла, что в конечном итоге способствовало увеличению диаметра отверстия и, соответственно, прогибу конструкций.

Настоящей справкой подтверждается, что результаты исследований, представленные в докторской диссертации на тему «Процессы тепломассопереноса при напряжённо-деформированном состоянии нагельных соединений» по специальности 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (строительство)», выполненные В.Г. Котловым, кандидатом технических наук, доцентом кафедры Строительных конструкций и водоснабжения, директором Института строительства и архитектуры федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» (ПГТУ) в виде рекомендаций были использованы при капитальном ремонте чердачного помещения учебного корпуса № 2 Поволжского государственного технологического университета.

Директор департамента
инженерно-хозяйственной работы
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
технологический университет»



Д.П. Иванушкин



**МАРИЙ ЭЛ РЕСПУБЛИКЫН
ЯЛ ОЗАНЛЫК ДА КОЧКЫШ
МИНИСТЕРСТВЫЖЕ**

Йошкар Армий ур., 41-ше п., Йошкар-Ола, 424000

**МИНИСТЕРСТВО
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ
РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ**

ул. Красноармейская, д. 41, г. Йошкар-Ола, 424000

Тел./факс: (8362) 45-29-55, факс 45-58-48, E-mail: minselhoz@aris.mari.ru
ОКПО 00087283, ОГРН 1061215027070, ИНН/КПП 1215109137/121501001

04.12.2020 № 06-25-976
На № 01-3629 от 01.12.2020

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Поволжский государственный
технологический университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

В Республике Марий Эл на протяжении более 40 лет проводились исследования и внедрение в строительство сельскохозяйственных объектов деревянных конструкций с узловыми соединениями на различных видах нагелей - это деревянные балки, фермы, арки с узловыми соединениями на болтах, гвоздях и на металлических зубчатых пластинах.

За этот период построено более 200 сельскохозяйственных объектов в Горномарийском, Звениговском, Куженерском и Медведевском районах республики: овчарни, птичники, склады различного назначения для сена, комбикормов, удобрения и т.д.

Разработка и проектирование конструкций проводилось на основе научно-исследовательских работ, проводимых Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Поволжский государственный технологический университет».

С 1980 года по настоящее время научными исследованиями в этой области занимается В.Г.Котлов, кандидат технических наук, доцент кафедры Строительных конструкций и водоснабжения, директор Института строительства и архитектуры. Были разработаны и внедрены в Республике Марий Эл дощато-гвоздевые арки из кружал пролётом 12 м, деревянные фермы на металлических зубчатых пластинах пролётом 9 м,

034746 *

деревянные фермы с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах 5,5 м из лиственных пород (берёза) для покрытий 27-ми квартирных жилых домов и т.д.

При личном участии Котлова В.Г. разрабатываются новые конструкции на металлических зубчатых пластинах. Исследования касаются не только разработки новых деревянных конструкций (ферм, рам, арок и т.д.) на нагелях (болтах, гвоздях, металлических зубчатых пластинах), но и новых соединений, связанных с процессами, характеризующими изменение температурно-влажностных условий среды эксплуатации. Актуальность данных исследований подтверждается тем, что при проектировании прогнозируется срок планово-предупредительных ремонтных работ, что продлевает нормативный срок службы конструкций.

Результаты исследований докторской диссертации на тему «Процессы тепломассопереноса при напряжённо-деформированном состоянии нагельных соединений» по специальности 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (строительство)» позволят заблаговременно оценить работоспособность деревянных конструкций на нагелях, в том числе на металлических зубчатых пластинах, и с использованием ремонтных работ повысить срок службы конструкций, тем самым увеличить нормативный срок эксплуатации объектов.

Врио министра



А.В.Кондратенко

НЦС | Новосибирский
 Центр
 Сертификации

Общество с ограниченной ответственностью

«Новосибирский Центр Сертификации»

630099, г. Новосибирск, ул. Ядринцевская, 72, офис 301

(383) 363-20-29, 8-913-985-3837

E-mail: Nksert@mail.ru

№ 053/2020

«01» декабря 2020 г.

О внедрении результатов
 научно-исследовательской работы

·АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований, представленные в докторской диссертации на тему «Процессы тепломассопереноса при напряжённо-деформированном состоянии нагельных соединений» по специальности 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (строительство)», выполненные В.Г.Котловым, кандидатом технических наук, доцентом кафедры Строительных конструкций и водоснабжения, директором Института строительства и архитектуры федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» были использованы рядом предприятий Новосибирской области при разработке технических условий (ТУ) и проектировании деревянных конструкций с узловыми соединениями на нагелях.

Полученные результаты позволяют спрогнозировать срок эксплуатации конструкций в работоспособном состоянии, благодаря чему продлить срок службы деревянных конструкций на нагелях.

Директор, к.т.н.,
 Почетный строитель России



В.В. Пуртов



ЖИГУЛЕВСКАЯ ДОЛИНА

ООО «Жигулёвская долина»
Южное шоссе, д. 165, оф. 304, г. Тольятти, 445043
тел. (8482) 93-00-93
ОКПО 41708917; ОГРН 1196313079599;
ИНН/КПП 6320041166/632001001

01.12.2020 № 208

На № _____ от _____

СПРАВКА

Настоящим подтверждаем, что специалистами ООО «Жигулёвская долина» в процессе повседневной деятельности по эксплуатации и обследованию объектов используются рекомендации по обеспечению необходимых параметров нагельных соединений, предложенные советником РААСН, кандидатом технических наук, доцентом, директором Института строительства и архитектуры Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола Котловым Виталием Геннадьевичем.

Использование рекомендаций при обследовании позволяет принимать меры к устранению дефектов на ранней стадии их развития.

Генеральный директор



А.Н. Горбунов



№ 135 от 09.12.2020

СПРАВКА

Настоящей справкой подтверждается, что при проектировании объекта: «Производственный корпус с помещениями административного и складского назначения для реализации проекта «Организация производства антифрикционных и противоизносных добавок к маслам, смазкам и краскам на основе нанодисперсного политетрафторэтилена и оборудования для производства указанных добавок», расположенный по адресу: РФ, Самарская область, г.Тольятти, Автозаводской район, Южное шоссе» используются положения инженерной методики расчета и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения для обеспечения заданных эксплуатационных показателей и характеристик узлов деревянных конструкций, предложенные советником РААСН, кандидатом технических наук, доцентом, директором Института строительства и архитектуры Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола Котловым Виталием Геннадьевичем.

Использование положений методики при проектировании предусмотрено для обеспечения максимальной экономической эффективности реализуемого проекта.

Генеральный директор



А.Р.Гарифуллин

ООО «Перспектива»

445043, РФ, Самарская обл. г. Тольятти, ул. Борковская 48 офис 21, тел. (8482) 311-244
ИНН 6321330668 / КПП 632101001 ОГРН 1136320024884

Исх. 52 от 01.12.2020 г.

СПРАВКА

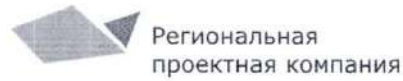
Настоящей справкой подтверждается, что при разработке алгоритмов программы для ЭВМ: «Космос - Комплексная облачная система мониторинга объектов строительства» были учтены положения инженерной методики расчета и мониторинга теплообменных процессов в древесине нагельного соединения для обеспечения заданных эксплуатационных показателей и характеристик узлов деревянных конструкций, предложенные советником РААСН, кандидатом технических наук, доцентом, директором Института строительства и архитектуры Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола Котловым Виталием Геннадьевичем.

Использование положений методики позволило обеспечить качественно новый отклик системы на деформации соединений и перепады температуры и влажности окружающей среды.

Генеральный директор
ООО «Перспектива»



Б.Э. Шарынин



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ
«РЕГИОНАЛЬНАЯ ПРОЕКТНАЯ КОМПАНИЯ»

445030, РФ, Самарская область,
г. Тольятти, улица 40 лет Победы, 136, 61
Телефон/факс: (8482) 93-55-01
ИНН: 6321369182, КПП: 632101001

Исх. № 50 от 01.12.2020 г.
на № _____ от _____

СПРАВКА

Настоящей справкой подтверждается, что специалистами общества с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие самарской области «Региональная проектная компания» при инженерной проработке проектов и обследовании объектов используются положения инженерной методики расчета и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения для обеспечения заданных эксплуатационных показателей и характеристик узлов деревянных конструкций, предложенные советником РААСН, кандидатом технических наук, доцентом, директором Института строительства и архитектуры Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола Котловым Виталием Геннадьевичем.

Положения методики используются для повышения конкурентоспособности услуг предприятия на рынке сбыта.

Генеральный директор

Д.Н. Филатов

Исх. № 073-12/2020-НПП



Общество с ограниченной ответственностью
 Научно-производственное предприятие
«ПРОМТЕХНОЛОГИЯ»

460018, г. Оренбург, ул. Терешковой, 22, офис 307, 313
 Телефон: +7 (3532) 27-91-72, +7 (9228) 95-77-11; www.npp-promteh.ru; e-mail: npp-promtech@mail.ru

Исх. № 073-12/2020-НПП от «10» декабря 2020 г.

А К Т

о внедрении в результаты исследований к.т.н. Котлова В.Г.

Настоящим удостоверяем, что в нашей организации при проведении инструментальных обследований деревянных конструкций с соединениями на стальных цилиндрических нагелях осуществлено внедрение результатов научно-исследовательской работы В.Г. Котлова «Процессы тепломассопереноса при напряженно-деформированном состоянии нагельных соединений».

Внедрение заключалось в оценке фактических деформационных характеристик несущих конструкций покрытия в виде цельнодеревянных ферм, в разработке моделей конструкций, позволяющих прогнозировать увеличение прогибов с течением времени и соответственно с оценкой долговечности обследуемых зданий по методике и рекомендациям В.Г. Котлова, позволяющей учитывать изменяющиеся факторы внешней среды с учетом протекающих процессов тепломассопереноса.

Наиболее значимыми объектами на территории Оренбургской области, на которых были внедрены результаты научных исследований В.Г. Котлова являются:

- дом культуры на 260 мест в с. Благодарное Ташлинского района;
- коровник на 800 голов в с. Марьевка Сакмарского района;
- здание неотапливаемой стоянки для сельхозтехники площадью 900м².

Директор
 ООО НПП «ПРОМТЕХНОЛОГИЯ»



Г.А. Столповский

Тел.: +7 (3532) 27-91-72, +7 (9228) 95-77-11;
 e-mail: npp-promtech@mail.ru
promteh.ru

[www.npp-](http://www.npp-promteh.ru)



Интегрированная система менеджмента качества ООО НПП «ПРОМТЕХНОЛОГИЯ» (сертификат соответствия № А.СРТ.СС.200422.101-3859.04 от 22.04.2020 г., срок действия до 22.04.2023 г.), применительно к выполнению работ по проектированию, монтажу и пуско-наладке технологического оборудования, инженерных сетей, систем автоматизации и телемеханики, включая работы по инженерным изысканиям, подготовке проектной документации, строительству, реконструкции, капитальному ремонту, объектам капитального строительства, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства, а также работ выполняемых на особо опасных и технически сложных и уникальных объектах соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001:2015 (ISO 9001), ГОСТ Р ИСО 14001:2007 (ISO 14001), ГОСТ Р 54934-2012 (OHSAS 18001)



СТРОИТЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ
«АЛТИТУДА»

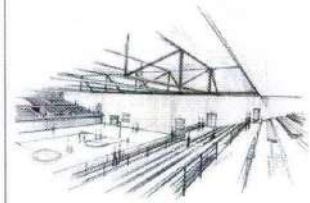
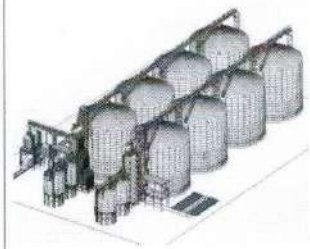
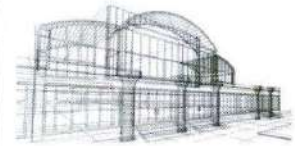
ИНН/КПП: 5610086086/771801001
Юридический адрес: 107143, город Москва,
проезд Иртышский 2-й, дом 4Б, строение 2, этаж 3, кабинет 4.2
E-mail: mail@altituda.ru

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ООО «Альтитуда»
С.В. Калинин
« » 2020 г.

А К Т

о внедрении в проектную документацию результатов научно-исследовательской работы к.т.н. Котлова В.Г.

ООО «Альтитуда» использовало результаты научных исследований к.т.н. В.Г. Котлова «Процессы тепломассопереноса при напряженно-деформированном состоянии нагельных соединений» при разработке проектных решений зданий свиноводческого комплекса на 100 тыс. голов по замкнутому циклу (корпус осеменения, здание опороса, корпус дорастивания и откорма), предназначенного для строительства в Гайском районе Оренбургской области. Для покрытия вышеназванных зданий в качестве проектного предложения были использованы деревянные фермы с узловыми соединениями на стальных цилиндрических нагелях и металлических зубчатых пластинах пролетами 12,0 м и 18,0 м.



Адрес: Россия, Оренбургская обл. г. Оренбург, ул. Шоссейная, 24 «А», 2 этаж


альтитуда.рф
mail@altituda.ru

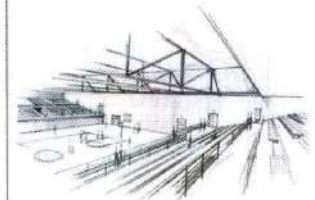
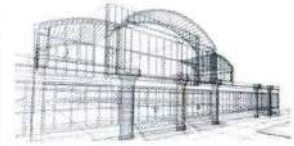
8 (3532) 373 374 (Оренбург)
8 (905) 712 69 17 (Москва)



СТРОИТЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ
«АЛЬТИТУДА»

Применение разработанных В.Г. Котловым рекомендаций и методик обеспечило расчет гарантированного срока эксплуатации зданий с учетом выполнения предложенных и исследованных в научной работе мероприятий по защите узловых соединений деревянных конструкций, а также увеличение сроков между текущими ремонтами.

Главный инженер проекта  Поздеева Н.С.



Адрес: Россия, Оренбургская обл. г. Оренбург, ул. Шоссейная, 24 «А», 2 этаж

альтитуда.рф

mail@altituda.ru

8 (3532) 373 374 (Оренбург)

8 (905) 712 69 17 (Москва)



**ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЙ КООПЕРАТИВ
ПО РАЗВИТИЮ ИННОВАЦИЙ,
ЭКОНОМИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ
ПРОГРАММ «АЛЬТЕРНАТИВА»**

ОГРН 1176313011621, ИНН 6321425052, КПП 632101001
445044, Самарская область, г. Тольятти, ул. Полякова 30 – 103
Тел. +7(8482)539010.
www.anpilov.ru, e-mail: anpilovsm@gmail.com

20.10.2020 № 21

На Ваш № _____

Котлову Виталию Геннадьевичу

СПРАВКА

Настоящей справкой подтверждается, что при проектировании реконструкции и дальнейшей эксплуатации объекта: «Спортивный комплекс» в г. Тольятти Самарской области были учтены положения инженерной методики расчета и мониторинга тепломассообменных процессов в древесине нагельного соединения конструкций ферм покрытия для обеспечения заданных эксплуатационных показателей и характеристик узлов деревянных конструкций ферм покрытия, предложенные советником РААСН, кандидатом технических наук, доцентом, директором Института строительства и архитектуры Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола Котловым Виталием Геннадьевичем.

Использование положений инженерной методики позволило с максимальной достоверностью спрогнозировать и увеличить сроки эксплуатации деревянных конструкций объекта.

С уважением,
Председатель Совета
ПК «АЛЬТЕРНАТИВА», к.т.н.



М.М. Матвеева