

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
ПНИПУ

На правах рукописи

Водяников Михаил Алексеевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ  
УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Кашеварова Галина Геннадьевна

Москва – 2019

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. Современное состояние вопроса. Исследование деформативности и прочностных характеристик нагельных соединений цельных и клееных деревянных конструкций .....	13
1.1. Общие сведения .....	13
1.2. Сопряжения деревянных конструкций .....	14
1.3. Особенности расчета узлов стыка деревянных конструкций с применением клеиваемых стержней .....	28
1.4. Пути совершенствования нагельных узловых сопряжений деревянных конструкций .....	36
1.5. Выводы по главе .....	37
ГЛАВА 2. Исследование влияния химически агрессивной среды на конструкции из клееной древесины, стальные и композитные детали; прогноз технического состояния клееных деревянных конструкций .....	38
2.1. Общие сведения .....	38
2.2. Условия эксплуатации строительных конструкций складов .....	45
2.3. Анализ опыта эксплуатации строительных конструкций складов .....	48
2.4. Влияние солесодержания и влажности на прочность композитов на углеродных, базальтовых и стекловолокнах .....	68
2.5. Выводы по главе .....	74
ГЛАВА 3. Теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрических нагелей из углеродного композита при действии поперечных сил .....	76
3.1. Методика расчета нагельных соединений деревянных конструкций ..	76
3.2. Оборудование и материалы, используемые при экспериментальной оценке несущей способности углепластиковых нагелей .....	81
3.3. Расчет нагельного соединения по методике СП «Деревянные конструкции» .....	86

3.4.	Экспериментальное исследование узлового соединения .....	87
3.5.	Компьютерное моделирование и расчет нагельного соединения в расчетном комплексе ANSYS.....	96
3.6.	Выводы по главе .....	101
ГЛАВА 4. Экспериментальные и теоретические исследования напряженно-деформированного состояния жестких стыков клееных деревянных конструкций с применением композитных клеенных стержней и пластин.....		
4.1.	Подбор рациональных параметров стыкового соединения деревянных конструкций на углепластиковых клеенных стержнях.....	105
4.2.	Моделирование и натурные испытания жесткого узла стыка балок при испытаниях на четырехточечный изгиб .....	113
4.3.	Численное моделирование и натурные испытания жесткого стыка балок по консольной схеме на трехточечный изгиб.....	120
4.4.	Выводы по главе .....	128
ГЛАВА 5. Расчет экономического эффекта от внедрения карбонового узла .....		
5.1.	Методология расчета экономической эффективности .....	131
5.2.	Расчет экономической эффективности карбонового узла .....	133
5.3.	Выводы по главе .....	139
Библиографический список.....		140
Приложение 1 .....		152
Приложение 2 .....		153

## ВВЕДЕНИЕ

В химически агрессивных средах при применении конструкций из древесины всегда является актуальным вопрос проектирования прочных жестких и долговечных, при этом компактных и технологичных в изготовлении и сборке в условиях строительной площадки, стыков и узлов соединений, способных воспринимать значительные усилия. Проектирование прочных и долговечных конструкций без надежных соединений не представляется возможным. В настоящий день такие контактные соединения выполняют в основном из стальных элементов (нагелей, накладных деталей, уголков и т.п.). Однако в специфических условиях, диктуемых агрессивной средой, применение стали зачастую неуместно в связи с быстротекущими процессами коррозии и сложностью борьбы с ними.

**Актуальность темы исследования.** Конструкции из цельной и клееной древесины нашли широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. Опыт применения этих конструкций в зданиях и сооружениях химической отрасли насчитывает более ста лет и показывает не поддающиеся сомнению преимущества древесины. В условиях химической агрессии древесина применяется при возведении складов, галерей межцехового транспорта, устройстве стропил над зданиями различного назначения, так как ее эксплуатационные характеристики значительно выше в сравнении со стальными, каменными и армокаменными конструкциями. За весь обозримый период эксплуатации не выявлено ни одного случая аварии, связанного с химической коррозией древесины. В то же время узлы соединений деревянных конструкций, проектируемые сегодня в виде стальных болтов, пластин, нагелей, накладных деталей и проч. подвержены воздействию коррозии, что является наиболее частой причиной аварийных ситуаций.

Восстановление антикоррозионного слоя зачастую невозможно без остановки эксплуатации объекта. Высокотемпературное воздействие при применении в узлах стыка сварки стальных деталей (накладных пластин,

арматурных стержней) приводит к возникновению концентраторов напряжений, связанных с разрушением структуры древесины на этих участках. Существенная разница коэффициентов линейного термического расширения и древесины параллельно волокнам приводит к ограничению стыковки крупнообъемных большепролетных элементов в условиях большого годового перепада температур. Предел огнестойкости массивного деревянного сечения, обработанного антипиреном, позволяет выдерживать конструкции до 60 минут без обрушения, при этом переход стальных соединительных деталей в пластическое состояние в условиях пожара происходит за время в 5-12 раз меньшее (в зависимости от температуры). Применение в качестве соединительных элементов армированных пластиков (в числе которых углеродные композиционные материалы), позволяет решить большую часть описанных выше проблем. Существует ряд ценных свойств таких материалов: высокая механическая прочность; модуль упругости, сопоставимый с модулем упругости древесины; легкость, устойчивость к высоким температурам, инертность к коррозионным процессам, простота механической обработки. В Российской Федерации в 2010 году ГК «Нанотех» выпущена Дорожная Карта «Использование нанотехнологий в производстве углеродных волокон и продуктов на их основе», отражающая структуру стратегического развития производства углеволокна и материалов на его основе. Однако, на практике применение композитных элементов в строительных конструкциях, в частности углепластиков, сдерживается, в связи с отсутствием корректных методов расчета и нормативной документации. Поэтому развитие теоретических положений расчета, обоснование экономической эффективности применения углеродных композитов, является актуальным и расширяет возможности применения возобновляемых природных материалов.

#### **Степень разработанности темы.**

Особенности расчетов строительных конструкций из древесины, а также конструктивные схемы проектирования стыков с применением стальных

соединительных элементов широко изучены. В России выдающиеся инженерные конструкции на основе клееной древесины и инженерные методики их расчета созданы И. П. Кулибиным, К. Д. Фроловым, Д. И. Журавским, В. Т. Шуховым, Г. Г. Карлсеном, А. Д. Захаровым, И. К. Коробовым и другими. Новые решения деревянных конструкций были применены в СССР при строительстве павильонов первой сельскохозяйственной выставки в 1923 г., а после – при возведении ЦАГИ имени профессора Н. Е. Жуковского в 1925-26 гг. Кроме того, многочисленные исследования стыков и узлов сопряжения деревянных конструкций выполнены силами таких институтов, как ВИАМ, ЦНИИСК, ЦАГИ, МИСИ, ЛИСИ, ВИА. Отдельного внимания заслуживают работы и исследования советских и российских деятелей науки В. Н. Маслова, В. В. Большакова, Е. М. Знаменского, В. С. Деревягина, В. Ю. Щуко, М. Е. Кагана, В. А. Цапаева, В. Ф. Бондина, А. В. Леняшина, В. И. Линькова, К. П. Пятикрестовского и др.

Широко применимым видом жестких соединений клееных деревянных конструкций, применяемых в современной строительной практике большепролетных сооружений, являются узлы с наклонно вклеенными арматурными стержнями с применением сварки ввиду технологичности и относительной простоты сборки. Основная методика расчета таких узлов на сегодняшний день представлена в работах группы ученых под руководством С. Б. Турковского, и и А. А. Погорельцева носит название «система ЦНИИСК». Основные положения по расчету и конструированию таких узлов приведены в СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80». Эта методика сводится к сравнению минимальной несущей способности стержня из условия смятия гнезда древесины или изгиба наиболее нагруженного из стержней, а способы определения усилий в нагелях для нахождения наиболее нагруженного стержня в нормативных документах не приводятся. Эта задача решается в данной диссертационной работе.

**Цель работы** – разработка методики расчета несущей способности и деформативности соединений деревянных конструкций в большепролетных складах хранения соли на углепластиковых стержнях.

**Задачи диссертационной работы:**

1. Оценить влияние влажности и соледержания по глубине сечения древесины на прочность клеёных деревянных конструкций складов хранения соли. Установить скорость развития коррозионных процессов в стальных элементах узлов сопряжения деревянных конструкций.

2. Провести лабораторные и вычислительные эксперименты бесклеевых нагельных соединений на сдвиг со стальными и углепластиковыми стержнями, работающими на изгиб, для сравнительного анализа характера разрушения стыков.

3. Разработать методику расчета несущей способности и деформативности конструкции деревянной балки со стыком на вклеенных углепластиковых нагелях, объединенных в единый узел при помощи композитных накладных деталей, учитывающую ортотропию клееной древесины и контактное взаимодействие элементов стыка.

4. Выявить влияние параметров элементов стыка на несущую способность и деформативность конструкции.

5. Провести вычислительные эксперименты и сравнительный анализ несущей способности и деформативности конструкций балок со стыком и без стыка.

6. Провести натурные испытания образцов балок из клееной древесины с применением углепластиковых нагелей и накладок до разрушения для экспериментального подтверждения теоретических результатов.

7. Выполнить оценку экономической эффективности применения углепластиковых элементов в узле в качестве альтернативы стальным элементам.

**Научная новизна** заключается в том, что:

1. Установлены параметры солесодержания и влажности агрессивной газовой среды в большепролетных складах хранения соли и их влияние на жизненный цикл клееных деревянных конструкций.

2. Получена скорость развития коррозии соединительных металлических элементов каркаса большепролетных арочных складов.

3. Выявлено, что снижение прочности древесины складов хранения соли от совокупного воздействия коррозионных факторов происходит в первые 10...15 лет эксплуатации и носит затухающий характер.

4. Выявлена зависимость конструктивных параметров жесткого стыка (угол наклона, количество и расположение стержней) от величины и способа приложения нагрузки, а также геометрических параметров балки.

5. Показано, что разрушение узла сопряжения в зависимости от нагрузки и конфигурации стыка происходит в связи с одним из следующих прогнозируемых факторов: потери прочности элементов соединения, проскальзывания (нарушения сцепления стержня и древесины), либо расслоения древесины стыка. Ширина раскрытия контактов и плотность сопряжения стыка соединяемых элементов зависит от размеров элементов стыка, величины и скорости приложения нагрузки

6. Разработан алгоритм расчета прочности деревянных балок с жестким стыком на углепластиковых стержнях в пролете, эксплуатируемых в химически агрессивной газовой среде складов хранения соли. На основании алгоритма разработана вычислительная технология создания конечно-элементной модели конструкции, учитывающая ортотропию клееной древесины и контактное взаимодействие элементов стыка.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

Теоретическая значимость работы состоит в том, что выявлен характер разрушения узлов стыка клеёных деревянных конструкций с использованием углепластиковых деталей. Установленное влияние параметров агрессивной

среды большепролетных складов хранения соли на жизненный цикл элементов конструкций из древесины позволяет прогнозировать безопасность сооружений в целом и подтверждает принципиальную возможность и эффективность применения композитных деталей в качестве альтернативы стальным элементам для создания равнопрочных узлов. Разработанная вычислительная технология расчета деревянных конструкций с углепластиковым соединением раскрывает характер разрушений композитной конструкции и вносит вклад в развитие теории расчета композитных элементов в строительных конструкциях.

Практическая значимость работы заключается в том, что установлены конструктивные особенности расположения углепластиковых стержней в узле сопряжения деревянных конструкций в зависимости от размеров образцов, величины и способа приложения нагрузки; разработан программный модуль для расчёта конструкции на языке программирования APDL с применением CAD-ориентированного подхода. Результаты проведенных исследований и программные продукты используются в научно-исследовательском и проектном институте АО «ВНИИ Галургии», г. Пермь, о чем свидетельствует Акт о внедрении (приложение 1).

**Методология и методы исследования.** В работе использованы теоретические и эмпирические методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях технологии и расчета строительных конструкций зданий и сооружений, методах строительной механики, механики деформируемого твердого тела, математического моделирования, математической статистики и механики волокнистых композиционных материалов. Используются расчетные программные комплексы ANSYS, ANSYS Workbench, CAD-система AutoCAD.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты прогнозирования прочностных показателей материалов клеёных деревянных конструкций, подтвержденные экспериментальными исследованиями влияния эксплуатационных факторов на длительную

прочность, работающих в неблагоприятных условиях агрессивных сред (повышенной влажности, насыщении древесины солями магния и калия с учетом фактора времени).

2. Результаты лабораторных и вычислительных экспериментов бесклеевых нагельных соединений на сдвиг со стальными и углепластиковыми стержнями, работающими на изгиб, и сравнительный анализ характера разрушения стыков.

3. Вычислительная технология создания корректной расчетной модели конструкции деревянной балки с узловым нагельным соединением, учитывающая ортотропию клееной древесины, контактное взаимодействие элементов стыка и усовершенствованная методика расчета деревянных конструкций с углепластиковым нагельным соединением.

4. Результаты численного и экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния и сравнительного анализа конструкции деревянной балки со стыком на вклеенных углепластиковых нагелях и балки без стыка, а также результаты оценки влияния конструктивных параметров стыка на несущую способность и деформативность конструкции в целом.

5. Результаты оценки эффективности замены стальных элементов на углепластиковые в равнопрочных нагельных соединениях конструкций, работающих в условиях агрессивной среды.

#### **Степень достоверности и апробация результатов:**

*Достоверность результатов* обеспечивается: базированием на доказанных и корректно использованных выводах фундаментальных и прикладных наук; сравнением результатов расчётов с экспериментальными данными, и данными расчетов по методикам, предлагаемым действующими нормативными документами, а также практическим опытом использования теоретических исследований. При проведении экспериментов достоверность результатов обеспечивалась применением современных поверенных и метрологически аттестованных приборов и оборудования, статистической

обработкой данных и их сравнением с данными зарубежных и отечественных аналогов.

**Апробация работы и публикации.** Основные результаты диссертационного исследования были представлены на VIII, IX и X Всероссийских молодежных конференциях аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика» (г. Пермь, 2016-2018 гг.); Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений («Золотовские Чтения»)» (РААСН, г. Москва, 2018 г.); II международной научной конференции «International Conference on Materials Engineering and Nanotechnology (ICMEN 2017)» (Куала-Лумпур, Малайзия, 2017 г.); IV международной научной конференции «International Conference on Chemical and Materials Engineering (ICCME 2017)» (Гавана, Куба, 2017 г.); IV международной научной конференции «International Conference on Composite materials and Material Engineering (ICSMME 2019)» (Токио, Япония, 2019 г.).

Работа обсуждалась на научных семинарах кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» (ПНИПУ, г. Пермь).

**Публикации.** В рамках диссертационной работы опубликовано 12 научных статей, в их числе 8 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science.

**Личный вклад автора** – постановка задачи (совместно с научным руководителем), разработка расчётных моделей и программ численной реализации методов расчета задач контактного взаимодействия, проведение расчетов строительных конструкций зданий и сооружений и анализ результатов, постановка и проведение экспериментов для верификации полученных результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, пять глав, основные результаты и выводы, список литературы из 109 источников.

Объем диссертационного исследования составляет 152 страницы машинописного текста, в данный объем входят 139 страниц основного текста, содержащего 88 рисунков и 8 таблиц, библиографический список, а также 2 приложения. Приложение 1 содержит «Акт об использовании результатов кандидатской диссертационной работы». Приложение 2 содержит сметные расчеты стоимости стального и композитного узла стыка.

# **ГЛАВА 1. Современное состояние вопроса. Исследование деформативности и прочностных характеристик нагельных соединений цельных и клееных деревянных конструкций**

## **1.1. Общие сведения**

Конструкции из цельной и клееной древесины нашли широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. В частности, в тяжелой химической промышленности древесина на сегодняшний день применяется при возведении складов, галерей межцехового транспорта, устройстве стропил над зданиями различного назначения.

Опыт применения этих конструкций в зданиях и сооружениях химической отрасли насчитывает более ста лет и показывает не поддающиеся сомнению преимущества древесины. Эксплуатационные характеристики древесины в условиях химической агрессии значительно выше в сравнении со стальными, каменными и армокаменными конструкциями.

За весь обозримый период эксплуатации не выявлено ни одного случая аварии, связанного с химической коррозией древесины. В то же время узлы соединений деревянных конструкций, проектируемые сегодня в виде стальных болтов, пластин, нагелей, накладных деталей и проч. подвержены воздействию коррозии, что является наиболее частой причиной аварийных ситуаций. Значительный экономический эффект от применения конструкций из древесины подтвержден десятилетиями безаварийной эксплуатации деревянных строительных конструкций складов минеральных удобрений, реагентов, а так же бассейнов, теннисных кортов и других, где применение древесины обеспечивает увеличение сроков службы в 2 – 3 раза, а стоимость возведения ниже на 25 – 40 % в зависимости от региона. При этом присвоение аварийной категории технического состояния и необходимость демонтажа таких сооружений зачастую связаны с коррозионным износом труднодоступных узлов стыка, а не вследствие износа либо накопления необратимых дефектов непосредственно древесины.

Применение конструкций из древесины позволяет снизить расход не возобновляемой стали в 1,5 – 2,5 раза [1-5], при этом отмечено снижение массы сооружения в 2,0 – 2,5 раза с уменьшением сроков монтажа сооружений в зависимости от типа возводимого сооружения до 2,5 раз. Снижаются расходы на транспортировку материалов и конструкций в богатые древесиной при этом активно осваиваемые отдаленные районы Дальнего Востока, Урала, Сибири и других регионов.

Зарубежный опыт технически развитых стран подтверждает концепцию того, что строительные конструкции из цельной и клееной древесины обладают большим потенциалом, при этом древесина за рубежом применяется не только в малоэтажном, но и высокоэтажном строительстве. В качестве наиболее актуальных примеров, при возведении эко небоскребов в Японии (Токио) и многоэтажных студенческих общежитий в Канаде (Ванкувер). Кроме того, наравне с Россией большепролетные клееные деревянные конструкции широко используются на промышленных площадках производственных предприятий Норвегии, Швеции, Германии, США и других стран. В будущем в развитых странах планируется возведение крупных мегаполисов в виде «лесов» с благоприятной для человека экосистемой.

## **1.2. Сопряжения деревянных конструкций**

Сопряжения конструктивных элементов деревянных конструкций по способу передачи усилий подразделяются на две основные группы:

- бесклеевые соединения на механических связях;
- клеевые соединения.

### **1.2.1. Бесклеевые нагельные соединения**

Использование соединений древесины при помощи бесклеевых механических связей насчитывает многие столетия с момента изобретения способов производства изделий из металла. В такого рода соединениях передача сил между элементами происходит дискретно от одного к другому по площади контакта соединяемых конструктивных элементов и связей. К таким

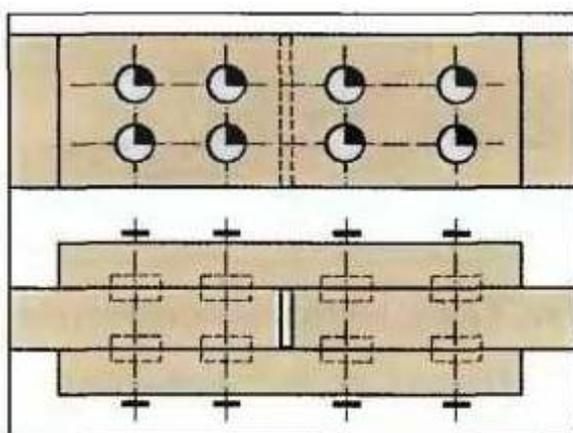
соединениям с механическими связями, работающими преимущественно на изгиб (реже – на выдергивание) относятся стыки на нагелях, болтах, шурупах, гвоздях, глухарях. Различные виды нагелей приведены на рисунке 1.1.



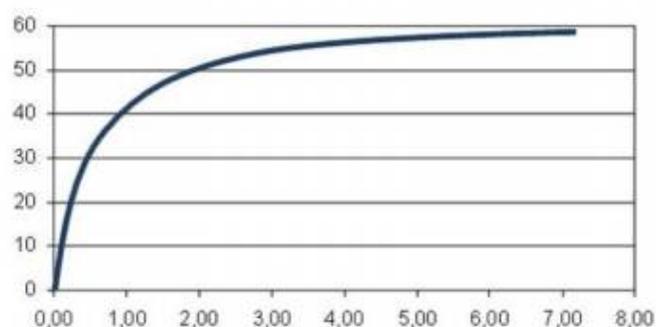
Рисунок 1.1 – Основные виды нагелей, используемые в соединениях конструкций из древесины (1 – дубовый нагель, 2 – болты, 3 – штифты, 4 – винты, 5 – самонарезающие шурупы, 6 – обыкновенные шурупы, 7 – гвозди)

Соединения на механических связях исторически получили широкое распространение благодаря универсальности, высокой надежности и простоте изготовления, а в современных условиях – благодаря автоматизации и широкой распространенности ручного электро- и пневмоинструмента.

Соединениям на механических бесклеевых связях характерна нелинейная зависимость параметров нагружения и податливости стыка. На рисунке 1.2 а показана схема соединения на цилиндрических стальных стержнях, обычно применяемая в сжатых, растянутых и сжато-изгибаемых стыках. На рисунке 1.2 б – типовая диаграмма растяжения вида «нагрузка – перемещение», характеризующаяся нелинейным характером зависимости параметров нагружения и податливости стыка.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Нагельное соединение

а) схематичное изображение; б) диаграмма растяжения

В приведенных выше соединениях, модификациями которых также являются наиболее распространенные стыки с применением шурупов и гвоздей, древесина в местах закрепления (т. е. гнездах) работает на смятие, а нагели вне зависимости от их материала работают на изгиб. Расчет таких стыков регламентируется СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» [6]. Максимально допустимая нормативная величина деформаций нагельного податливого соединения всех типов при полном исчерпании его несущей способности в соответствии с таблицей 18 [6] принимается равной 2 мм.

Основными недостатками податливых механических нагельных соединений без вклеивания элементов являются:

- локальные ослабления поперечного сечения соединяемых элементов;
- относительно высокая податливость (в том числе в связи с возникновением начальных деформаций обмятия древесины);
- повышенная ползучесть при возникновении нагрузок, близких к критическим.

Важно, что на сегодняшний день наряду с наиболее распространенными стальными, в зависимости от типа соединения, в нормах приведены величины расчета несущей способности также для деревянных (дубовых) и стеклопластиковых нагелей.

Производство узлов стыка деревянных конструкций на связях, работающих преимущественно на выдергивание, состоит в использовании различного вида нагелей, модифицированных под условия применения. В качестве примера можно привести закрученные винтовые и квадратные с периодического профиля, а также стыки с применением различного вида шурупов. Эксплуатационные характеристики и несущие свойства при расчете на выдергивание таких элементов определяется максимальной величиной смятия и скалывания древесины в местах контакта. Следует упомянуть, что при устройстве такого рода соединений во всех случаях при превышении нагелей диаметра 6 мм необходимо выполнять предварительное рассверливание пилотных отверстий, что приводит к некоторому повышению трудоемкости работ при устройстве стыков.

Нагели с большим шагом витка периодического профиля и способы их монтажа в тело древесины разработаны как в Российской Федерации, так и зарубежом [7, 8], см. рисунок 1.3.

а)



б)

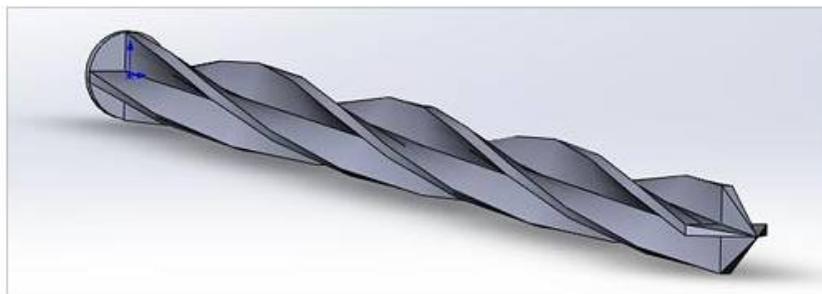


Рисунок 1.3 – Нагели, работающие на выдергивание

а) Helifix (Великобритания), б) Крестообразные витые стержни (ОГУ, Россия)

Податливость таких стыков ниже в связи с отсутствием необходимости предварительного сверления отверстий. Витая форма стержня с увеличенным шагом обеспечивает более надежное закрепление при необходимости восприятия усилий на выдергивание. Но, несмотря на повышенные прочностные характеристики стыка с применением витых стержней, исследования стыков на крестовидных нагелях, проведенные в Оренбургском Государственном Университете [9, 10], показали что отнести их к узлам с жесткой заделкой по совокупности свойств не допускается. Графики зависимости перемещений от нагрузки соединения на крестовидных витых нагелях, выполненные Г. А. Столповским в ОГУ в 2010 году показывают, что соединения на витых стержнях, работающих на выдергивание, аналогично нагелям, работающим на изгиб, имеют вид нелинейной функции [11].

Подводя итог, следует отметить, что повышенная деформативность, связанная с податливостью соединений и конструктивных элементов в целом,

являются основным недостатком перечисленных способов стыка деревянных конструкций на механических связях без применения технологии клеивания.

### **1.2.2. Клеевые соединения**

Стыки конструктивных элементов конструкций из древесины с применением технологии клеивания, такие как клеестальные соединения и соединения с применением клеестальных шайб, не нашли в свое время широкого распространения и признания, поскольку конструктивно не были совершенны, а существующие клеи не обеспечивали высокой надежности. Кроме того, клеевые соединения были достаточно трудоемки. После появления новых специальных клеев, обладающих рядом уникальных свойств (к примеру, таких как водостойкость, пожаробезопасность и прочих), позволяющих надежно соединять различные материалы с повышенными прочностными характеристиками. Такого рода соединения с применением стальных нагелей, вклеенных в тело древесины, позволили решить главную из существующих задач при проектировании жестких стыков деревянных конструкций, описанных выше: исключение податливости.

На сегодняшний день одним из самых эффективных и наиболее изученных видов жесткого стыка конструкций из цельной и клееной древесины является соединение на вклеиваемых нагелях. В наиболее общем виде нагели представляют собой стальные арматурные стержни периодического профиля. В таких стыках нагели работают на изгиб и выдергивание по клеевому шву. Зарубежный и отечественный опыт использования и внедрение на многих строительных объектах такого метода жесткого сопряжения деревянных конструкций показывает неоспоримые преимущества перед другими способами стыковки.

К преимуществам вклеиваемых нагелей перед связями на механических стыках относят:

– высокие прочностные показатели, являющиеся следствием плотного контактного взаимодействия нагеля и тела древесины через клеевую поверхность;

– армирующий эффект, выражающийся в усилении древесины материалом клеиваемого нагеля;

– повышенные показатели огнестойкости и коррозионной стойкости размещенной в теле древесины части нагеля и конструкции в целом.

Такой вид сращивания применим при соединении как сжатых, так и растянутых, а также растянуто-изгибаемых элементов. При этом конфигурация соединений не ограничивается сращиванием в продольном направлении, но с той же эффективностью применяется при соединении элементов под различными углами.

Основа исследований соединений на клеиваемых стержнях положена в центральных научно-исследовательских институтах, таких как НИСИ [12-21], Союздор НИИ [22], ЦНИИСК [23-35] и других в шестидесятых – семидесятых годах 20 века. Исследования установили преимущества и недостатки применения такого типа соединений деревянных конструкций. К примеру, по результатам отчетов [36], количество используемой стали при проектировании пролетных строений конструкций мостов сокращается до десяти раз, по сравнению со стыком в виде клеестальных шайб.

Первые попытки применения металлических арматурных стержней с целью усиления конструкций из древесины на практике принадлежит инженеру из США. В 1921 г. А. Клайтила предложил использовать в конструкциях летательных аппаратов (дирижаблей и аэропланов) деревянные элементы коробчатого сечения с запрессованной в полки стальной проволокой (рисунок 1.4).

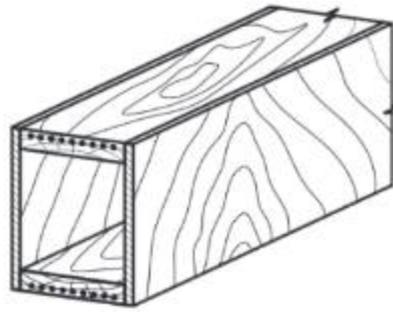


Рисунок 1.4 – Коробчатая армированная балка А. Клайтила

Стальное армирование несущих конструкций из цельной древесины впервые было предложено инженером из Германии А. Фишером [37] (рисунок 1.5) в 1926 г. Арматурные стержни в этом варианте укладывались в заранее пропиленные пазы и заливались мастикой.

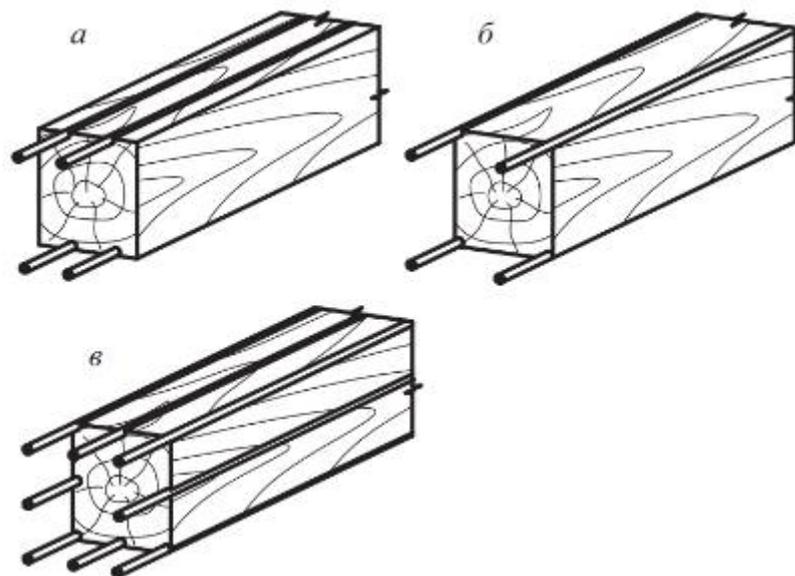


Рисунок 1.5 – Армирование балок из цельной древесины

а) части сечения, б) по углам, в) по всему сечению

Эти проекты по армированию древесины не получили реализации в связи с отсутствием на тот момент надежных способов и составов для склеивания стали с древесиной.

Позднее, в 1967 г. в СССР (ЦНИИСК, СоюздорНИИ [38]) при испытаниях стержней на продавливание и выдергивание, вклеенных при помощи составов на основе эпоксидных смол, удалось получить равнопрочное соединение.

Факторы, влияющие на надежную работу стыка, были оценены институтом СОЮЗДОРНИИ под руководством Н. Д. Пospelова. Под его

руководством оценивались такие факторы, как наличие загрязнений на поверхности вклеиваемых стержней, гладкая арматура, либо с периодическим профилем, наличие антисептика на древесине, глубина заделки нагеля, влияние толщины клея и направления волокон древесины, длительность действующей нагрузки.

Выводы по результатам таких испытаний показали, что наличие загрязнений на стержнях с рифлением (периодическим профилем), а также антисептирование в реальных экспериментах не оказывали существенного влияния на прочность стыка. Кроме того, была отмечена высокая степень выносливости стыка при циклически повторяющихся загрузках.

Более детально вопрос соединения деревянных конструкций на вклеенных гладких арматурных стержнях класса А-I и арматуры периодического профиля освещены в работах Ю. Б. Вылегжанина [39], где отмечено полутора – двух кратное повышение прочности соединений с применением арматуры периодического профиля по сравнению с образцами на гладкой арматуре.

Большой вклад в развитие стыков с применением вклеиваемых стальных нагелей был выполнен в НИСИ С. В. Колпаковым, В. Ф. Бондиным, П. А. Дмитриевым [13-16, 40, 41]. В приведенных исследованиях выявлены закономерности и зависимости параметров прочности и деформируемости соединений стали и древесины от таких факторов как диаметр стержня, его длина, поверхность и других. Сделаны выводы для работы соединения при длительном и кратковременном нагружении с вклейкой стержней вдоль древесных волокон. Выявлена величина оптимальной длины вклеенной части стержня [39]. Установлен коэффициент условий работы, учитывающий неравномерное нагружение стержней. Разработана методика определения влияния таких факторов как влажность воздуха и температура на НДС соединения.

По результатам проведенных испытаний инженерами НИСИ им. В. В. Куйбышева были разработаны многочисленные решения узлов и стыков с

использованием вклеенных стержней. На рисунке 1.6 приведен фланцевый торцевой стык линейного элемента (аналогично применим к арочным элементам). В таком соединении стержни до вклеивания привариваются к фланцу и при монтаже соединяются на болтах. Несущая способность стыка выше при установке в местах с минимальными изгибающими моментами.

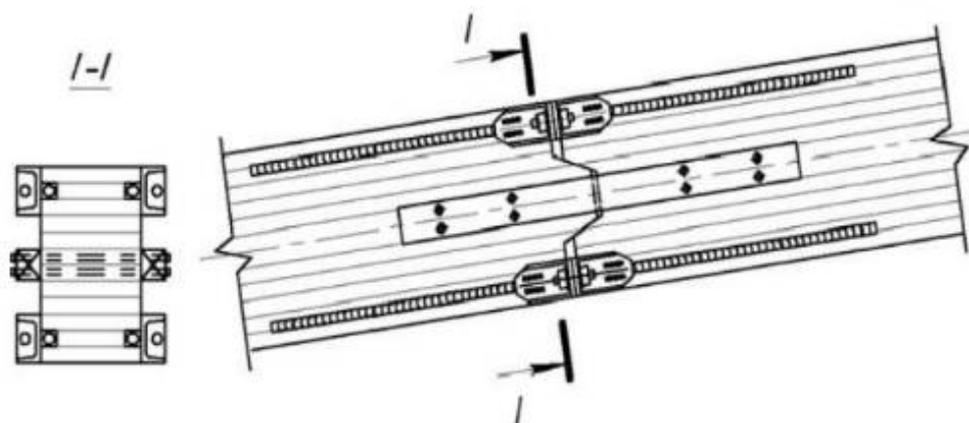


Рисунок 1.6 – Узел стыка линейного элемента (НИСИ)

Поперечная сила передается клиновидным тупым пазовым шипом, жесткость из плоскости действия изгибающего момента обеспечивается двумя спаренными накладными деталями соединенными болтами.

Преимуществом стыка является вклеивание арматурных стержней вдоль продольных осей элементов и их местоположение на боковых гранях. Такое решение позволяет обеспечить габарит соединяемых элементов (балок, арок) и обеспечивает возможность контроля качества вклеивания стержней в тело древесины.

Для увеличения возможностей транспортировки крупногабаритных деревянных элементов и упрощения монтажа на площадке строительства в НИСИ были разработаны сборные и неразборные угловые узлы для стыка стойки и наклонного ригеля рамы (рисунок 1.7), а также модификации опорного узла с армированием вклеиваемыми арматурными стержнями (рисунок 1.8).

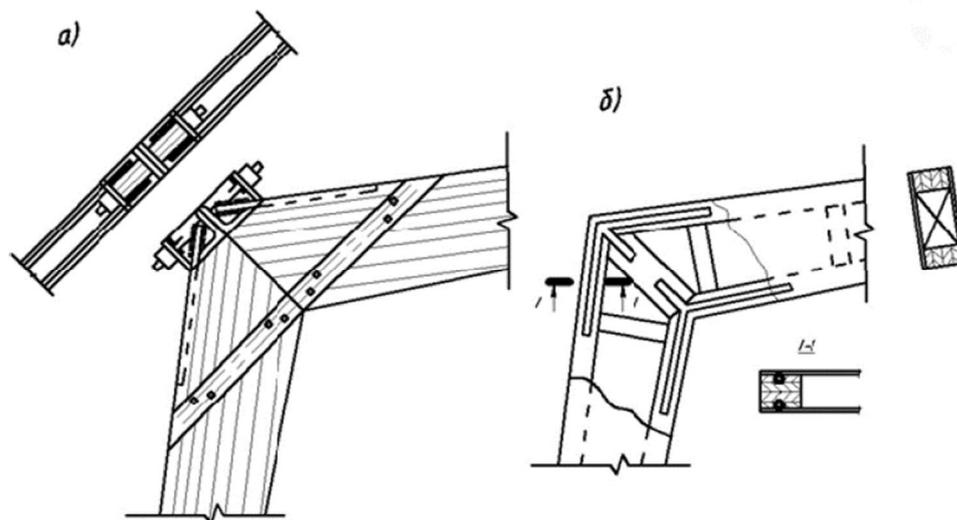


Рисунок 1.7 – Угловой стык рамы (НИСИ)

а) сборный узел, б) неразборный узел

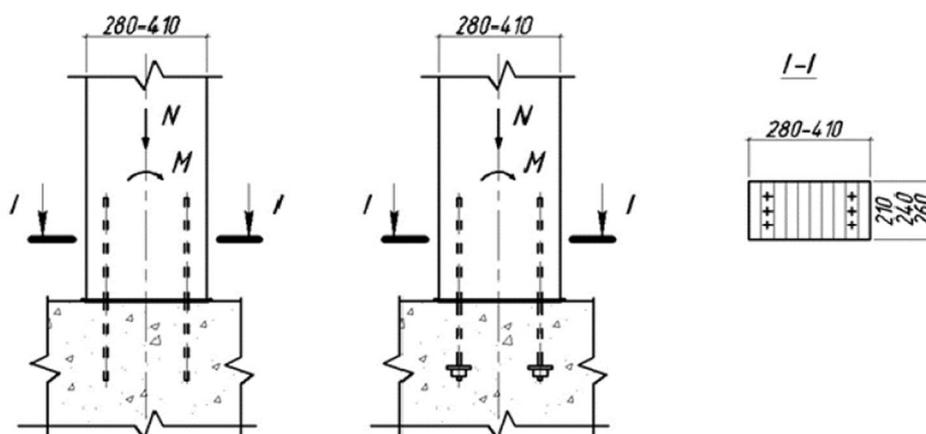


Рисунок 1.8 – Опорные узлы с армированием

Растягивающие усилия в узле, показанном на рисунке 1.7, воспринимают стержни арматуры, устанавливаемые в заранее просверленные пазы на внешних гранях деревянных поясов соединяемых элементов. Использование такого узла позволяет значительно уменьшить размеры отправочных элементов при транспортировке арок и рам.

Также разработаны решения для узлов стыка ферм с использованием клеиваемых стальных арматурных стержней (рисунок 1.9).

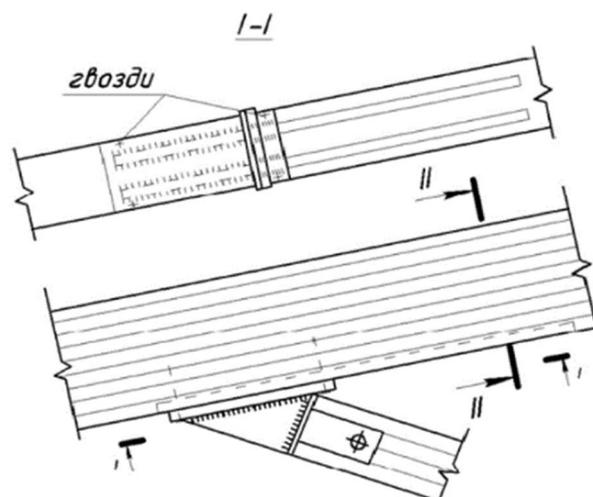


Рисунок 1.9 – Узел стыка верхнего пояса и раскоса фермы с использованием  
вклеиваемых стальных арматурных стержней

Лабораторией ДК ЦНИИСК [42, 43] были проведены испытания стыков, подверженных действию осевой силы с изгибом с применением вклеиваемых арматурных стержней, а также муфт и фланцев (рисунки 1.10, 1.11).

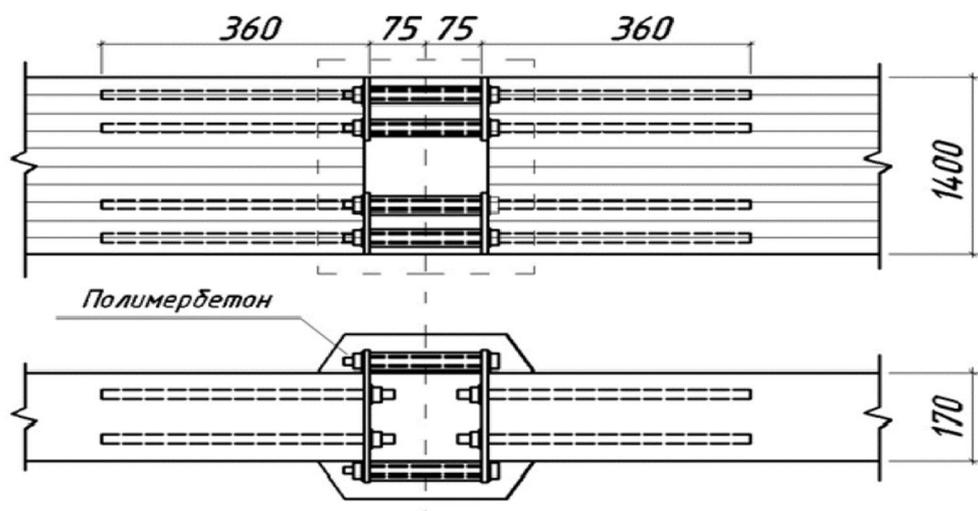


Рисунок 1.10 – Изгибаемый стык типа ПИ-1

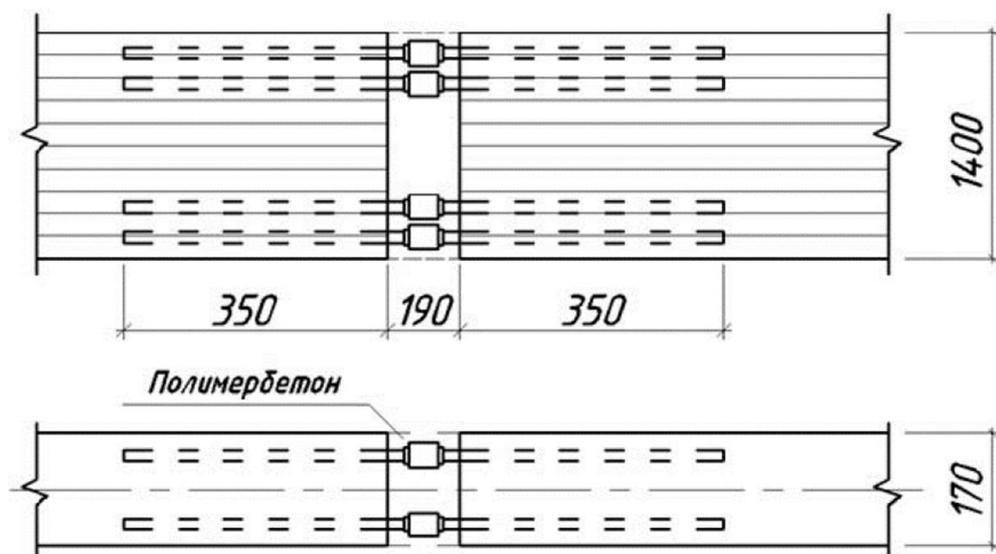


Рисунок 1.11 – Изгибаемый стык с использованием муфт  
(разработка ЦНИИСК)

В изгибаемом стыке типа ПИ-1 (рисунок 1.10) крепление фланцев выполнено гайками к стержням с резьбой на торцах. Монтаж и взаимной натяжение фланцев выполняется за пределами деревянных соединяемых элементов с помощью шпилек, после чего весь узел заключался в оболочку из полимербетона. Такое соединение было технологически сложным в связи с отклонениями геометрических размеров и нарушении целостности стыка при сборке.

Во втором стыке при разработке в ЦНИИСК (рисунок 1.11) предусмотрено максимально возможное исключение влияния эксцентриситета. Передача нагрузки при этом происходит в пределах сечения деревянных элементов. Соединяемые элементы стыкуются при помощи полумуфт. Полумуфты соединены гайками. Гайки накручиваются на резьбу на вклеиваемых стержнях, монтажный зазор между соединяемыми элементами заполняется полимербетонным составом.

Экспериментальные исследования стыков выполнялись на образцах из древесины прямоугольного сечения длиной 8 метров по сжато-изгибаемой схеме (с приложением продольных сил и момента). Результатами эксперимента отмечено, что разрушение как первого, так и второго соединения, происходило

от деформаций полимербетонного узла и последующим разрывом шпилек (для первого случая) либо срезом стальных муфт (для второго). Напряжения растяжения оказались меньше расчетных и составили до 35 % и 29 % для штырей и шпилек в первом узле и до 27 % для штырей во втором. В качестве причин низкой несущей способности по сравнению с теоретическими значениями отмечено влияние полимербетонной оболочки. Тензометрия древесины в месте стыка показала, что наибольшие напряжения расположены в сжатой зоне [42].

Второй вид соединения (на муфтах, разработка ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко) более экономично при устройстве, а также более технологично и обладает более конкурентными параметрами при конструировании при в целом схожей несущей способности.

Отдельно стоит отметить исследование И. Г. Овчинниковой [30], посвященной оценке напряженно-деформированного состояния клеенных в древесину стержней при выдергивании. В исследовании оценивалось влияние поверхности клеиваемого стержня на общую деформативность и прочность соединения. В качестве сравниваемых образцов были использованы арматурные стержни различных классов, клеенные на глубину  $10d$  и  $20d$  (где  $d$  – диаметр арматуры). Также в качестве изменяемого параметра принята различная толщина клеевого соединения между древесиной и стержнем (толщина принята 1,5, 3,5 и 7,5 мм для диаметра 14 мм и заделки  $10d$ ). Результаты испытаний показали, что гладкие стержни приклеивания показывают более низкую величину упругой работы стыка. Во всех случаях разрушение отмечено в связи со срезом клеевого шва в контактном слое со стержнем. Факт такого вида разрушения также описан в работах [15, 36]. Важно, что толщина клеевого шва оказывает влияние только на характер смещения стального стержня.

Результатом исследования стали данные для получения касательных и нормальных напряжений, перемещений по длине арматуры по линейному закону, определенные с использованием гиперболических функций.

В 1987 году в институте СИБСТРИН учеными И. П. Пинайкиным, а после – в 1992 году Б. И. Евдокимовым были проведены исследования соединений с применением клеиваемых стальных арматурных стержней в растянутых и изгибаемых стыках, клеенных в тело древесины вдоль и поперек волокон [22]. Разработаны математические модели, описывающие НДС клееного стыка древесины и стержней работающих на сдвиг с учетом деформационных и прочностных свойств использованных материалов. Установлены влияния длины клейки и размеров клеиваемых стержней на несущую способность стыка, показано влияние взаимного расположения стальных стержней на общее НДС соединения при устройстве стыка с несколькими клеиваемыми стержнями.

### **1.3. Особенности расчета узлов стыка деревянных конструкций с применением клеиваемых стержней**

Основополагающие концепции расчета узлов деревянных конструкций с применением клеиваемых стержней предложены коллективом ученых под руководством С. Б. Турковского в лаборатории деревянных конструкций института ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. Развитие производства КДК новых технологий для решения узлов соединения. Решением стала разработка уникальной системы жестких стыков, основанная на вклеивании в тело древесины под различными углами к волокнам арматурных стержней повышенной прочности, преимущественно стальной арматуры классов А300 – А500 с клеями на базе эпоксидных смол ЭД20 с различными наполнителями (молотым песком – маршалитом, или цементом). Такой вид соединения получил название «система ЦНИИСК» [32-34]. Все теоретически полученные данные и положения системы ЦНИИСК были проверены и подтверждены экспериментальными исследованиями. Ниже представлены результаты анализа расчетной методики.

Впервые натурные испытания жестких стыков деревянной балки на клеенных под углом стержнях, легшие в основу для данной методики, были выполнены в 1975 году. Практическое применение стыков осуществлено

впервые при строительстве пешеходного перехода через МКАД в районе 102 километра, в котором растянутые укрупнительные стыки и узлы крепления элементов из клееной древесины устроены с использованием клеиваемых стержней. За последние 15 лет построен целый ряд сооружений с линзообразными фермами на клеенных стержнях: аквапарк «Ква-ква Парк» в г. Мытищи перекрыт фермами пролетом 44 м, бассейн «Невская волна» в г. Санкт-Петербург с помещениями пролетами от 32 до 38 м, спорткомплекс «Строгино» на ул. Таллинской в г. Москва пролетом 48 м и многие другие [35].

Расчет стыков системы ЦНИИСК базируется на методике, предлагаемой в СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80» в разделе «Соединения на клеенных стержнях» [6]. Широкому применению таких узлов препятствует отсутствие рекомендаций или пособий к СП, что приводит к увеличению числа ошибок при проектировании конструктивных элементов и недостаточной несущей способности.

Узлы «системы ЦНИИСК» базируются на работе клеенных стержней на растяжение с выдергиванием и сжатие с продавливанием. Расчетную несущую способность стержня, МН, клеенного под углом к волокнам древесины на приведенные выше нагрузки, определяют по формуле 1.1 приведенной в СП [6]:

$$T = R \pi d_l l_p k_c k_b m_d \leq F_a R_a, \quad (1.1)$$

где  $R$  – расчетное сопротивление древесины продавливанию (либо выдергиванию) клеенного стержня;

$d_l$  – диаметр отверстия (определяется по [6]);

$l_p$  – расчетная длина стержня;

$k_c$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжений сдвига в зависимости от длины заделки;

$k_b$  – коэффициент, зависящий от знака нормальных напряжений вдоль волокон в зоне установки стержней;

$m_d$  – коэффициент, учитывающий зависимость расчетного сопротивления от диаметра стержня;

$F_a$  – площадь поперечного сечения стержня;

$R_a$  – расчетное сопротивление материала стержня.

Расчетная длина стержня  $l_p$  определяется по формуле 1.2:

$$l_p = l - l_0 \leq 25d, \quad (1.2)$$

где  $l$  – глубина вклеивания;

$l_0$  – глубина возможного снижения прочности клеевой прослойки при сварке (для стержней без сварки  $l_0 = 0$ );

$d$  – диаметр вклеиваемого стержня.

Коэффициент  $k_c$  определяется формулой 1.3:

$$k_c = 1,2 - 0,02(l_p/d) \quad (1.3)$$

Для стержней, работающих на выдергивание в области растягивающих напряжений, действующих вдоль направления волокон древесины конструкции, значения коэффициента  $k_b$  следует определять по формуле 1.4:

$$k_b = 1 - 0,01\sigma, \quad (1.4)$$

где  $\sigma$  – максимальные растягивающие напряжения.

В сжатой зоне и для стержней, работающих на продавливание  $k_b = 1$ .

Универсальный стык «система ЦНИИСК» разработанный в НИЦ «Строительство» под авторством С. Б. Турковского и А. А. Погорельцева [32-35] на вклеенных арматурных стержнях (рисунок 1.12) дал возможность для реализации большого количества уникальных большепролетных несущих конструкций из древесины. С применением стыков возведены общественные и производственные здания, промышленные цеха и другие сооружения.

Наиболее неблагоприятными для деревянных конструкций сочетаниями усилий являются растяжение и растяжение с изгибом без возникновения сжатых зон, т. е. во всех сечениях элементов возникают только растяжения различной интенсивности. Система ЦНИИСК предлагает решение растянутых узлов посредством использования стержней, вклеенных в одном направлении и работающих на растяжение, а также стержней, вклеенных под углом (с V-образной вклейкой).

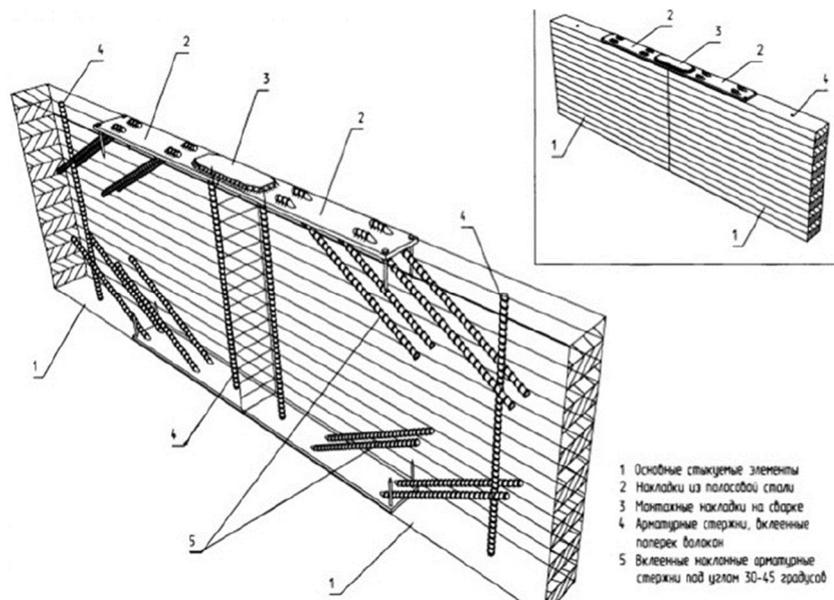


Рисунок 1.12 – Универсальный стык «система ЦНИИСК»

В обоих вариантах стержни фиксируются посредством стыковых стальных пластин по обеим граням соединяемых элементов. Дополнительно к этому для восприятия поперечной силы в крайнем ряду предусматривается вклейка поперечных стержней.

На рисунке 1.13 представлено решение конструкции ригелей с жестким стыком в середине пролета здания аквапарка в г. Абзаково, Южный Урал.

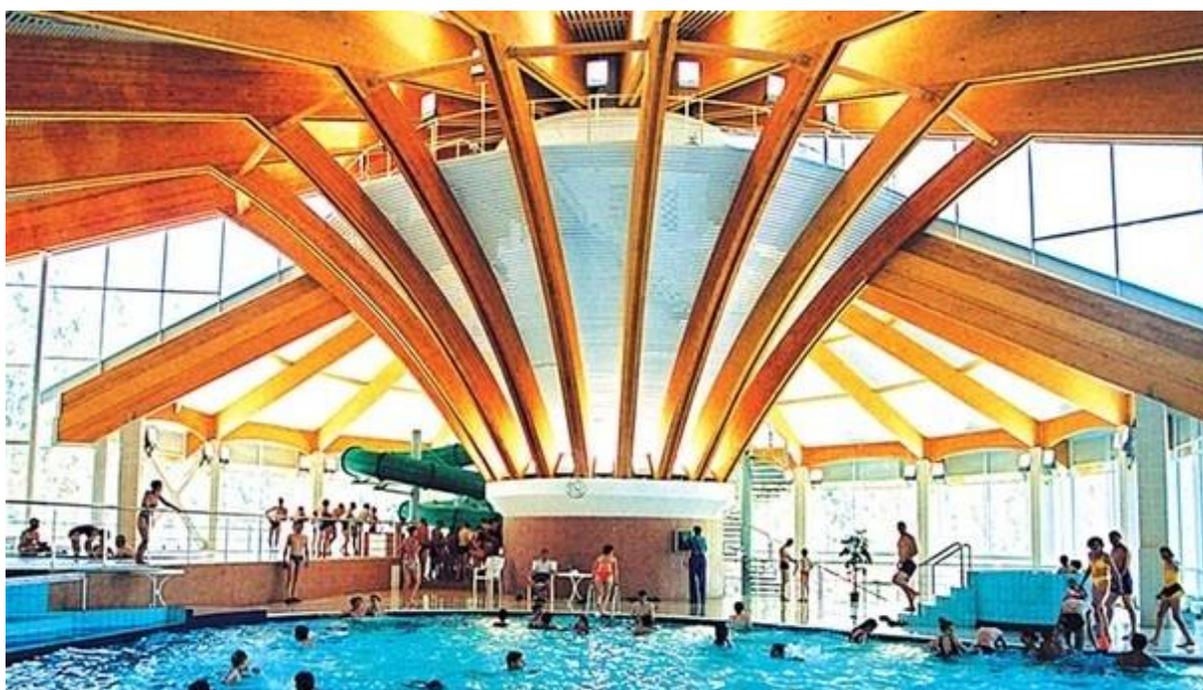


Рисунок 1.13 – Конструкции ригелей с жестким стыком в покрытии аквапарка

Усилия в пластинах от действия изгибающего момента с продольной силой определяются формулой 1.5:

$$N_d = N/2 + M/h_o, \quad (1.5)$$

где  $N_d$  – продольное усилие, возникающее в пластине;

$h_o$  – расстояние по осям пластин.

Расчетные схемы соединений со стержнями, вклеенными в одном направлении для симметричного и несимметричного стыков приведены на рисунках 1.14 а, б.

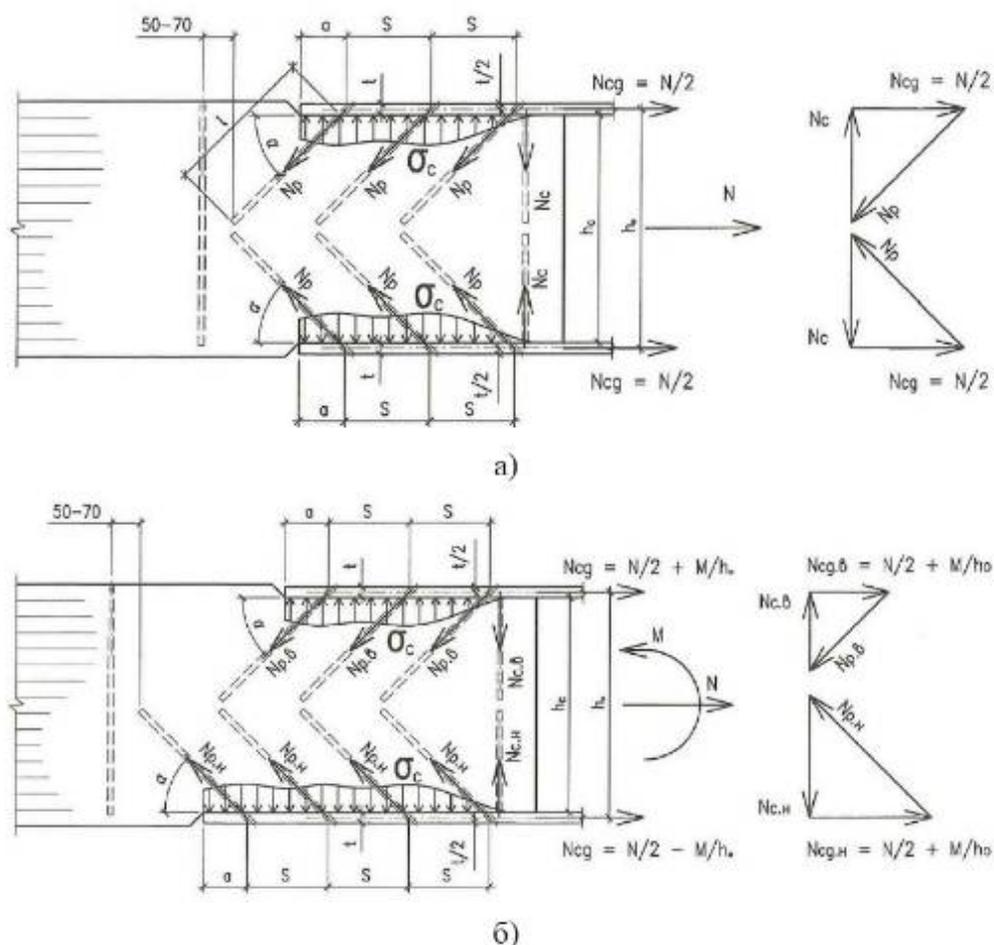


Рисунок 1.14 – Расчетные схемы симметричного (а) и несимметричного (б) стыков со стержнями, вклеенными в одном направлении

Расчет таких узлов сводится к проверке несущей способности вклеенных в одном направлении стержней на выдергивание, а также на продавливание для стержней, вклеенных поперек волокон. Также выполняется проверка древесины на смятие поперек волокон под накладными деталями.

Для стержней выполняют проверку несущей способности на выдергивание по формуле 1.6. Максимально допустимое растягивающее усилие  $N_p$  в стержне:

$$N_p = N_{сд} / (nk_{ср} \cos \alpha) \leq T_p, \quad (1.6)$$

где  $n$  – количество стержней;

$k_{ср}$  – коэффициент совместной работы;

$\alpha$  – угол клейки стержня;

$T_p$  – расчётная несущая способность стержня вклеенного под углом к волокнам, определяется формулой (1.1).

Проверка стержней, вклеенных поперек волокон, производится сравнением продольной силы  $N_c$  с расчетной несущей способностью стержня на продавливание (формула 1.7):

$$N_c = N_p \sin \alpha \leq T_c, \quad (1.7)$$

где  $T_c$  – расчетная несущая способность стержня, вклеенного под углом к волокнам древесины, на продавливание

Проверку древесины проводят на смятие в месте контакта с накладной деталью от силы  $N_c$  (формула 1.8). Размеры площадки контакта определяются: ширина  $F_{см}$  равна ширине накладной детали, длина принимается меньшей из двух величин:  $2a$  и  $S$  (см. рисунок 1.13).

$$N_c / F_{см} \leq R_{см.90}, \quad (1.8)$$

где  $R_{см.90}$  – расчётное сопротивление древесины смятию поперёк волокон, определяется по СП [6] в опорных участках конструкции.

Узлы конструкций, подверженных действию растягивающих и изгибающих сил решают с помощью устройства V-образных анкеров. Расчет таких элементов ведется аналогично, с учетом разложения усилий на растягивающие и сжимающие.

Расчетные схемы стыков, симметричного растянутого и несимметричного, приведены на рисунках 1.15, 1.16. На рисунке 1.17 приведены фотоснимки монтажа конструкций на вклеиваемых стержнях.

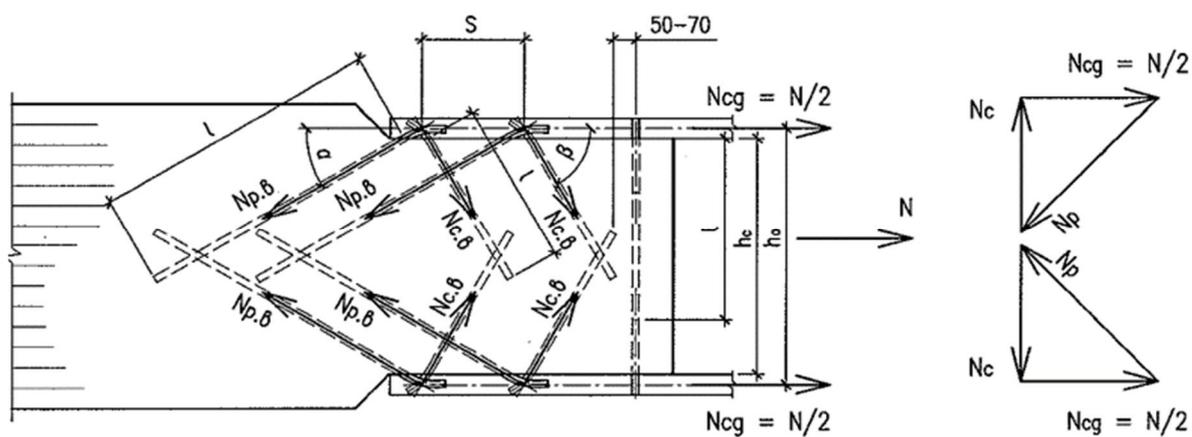


Рисунок 1.15 – Схема симметричного стыка на V-образных стержнях

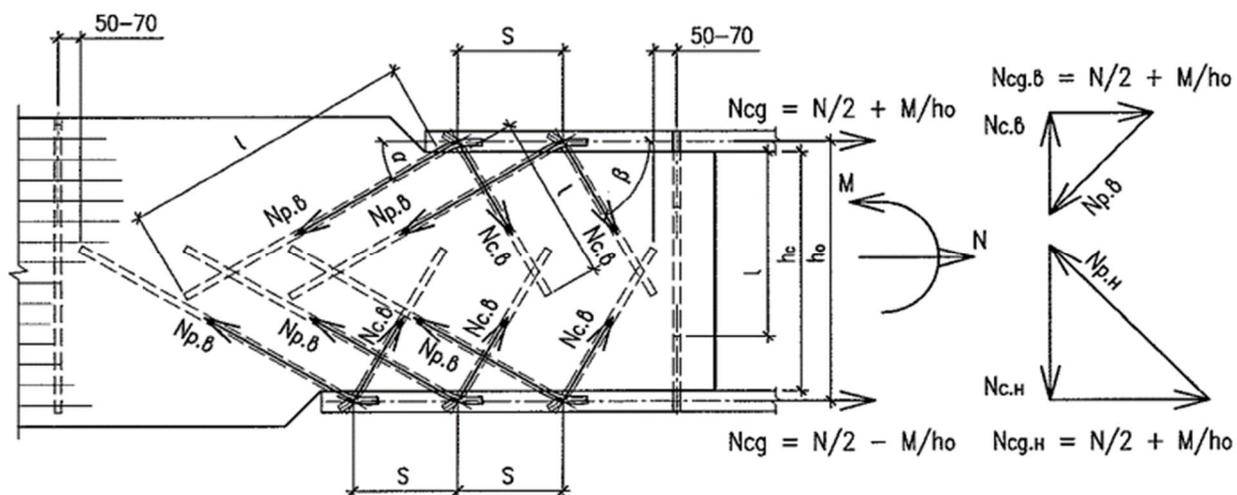


Рисунок 1.16 – Схема несимметричного стыка на V-образных стержнях



Рисунок 1.17 – Монтаж деревянных конструкций на клеенных стержнях

Предельное усилие в одном анкере  $N_a$  определяется формулой 1.9:

$$N_a = N_{сд} / (n k_{с.р}), \quad (1.9)$$

где  $n$  – количество анкеров;

$k_{с.р}$  – коэффициент совместной работы.

Усилия  $N_p$  и  $N_c$  определяем из условия равновесия узла (рисунок 1.16):

$$\begin{aligned} N_a &= N_p \cos\alpha + N_c \cos\beta \\ N_p \sin\alpha &= N_c \sin\beta \end{aligned} \quad (1.10)$$

Углы  $\alpha$  и  $\beta$  определяются положением стержней, работающих на растяжение и сжатие относительно оси детали стыка (рисунок 1.16). Решением системы уравнений 1.10 получим усилия:

$$\begin{aligned} N_p &= N_a / (\cos\alpha + \sin\alpha / \operatorname{tg}\beta) \leq T_p, \\ N_c &= N_a / (\cos\beta + \sin\beta / \operatorname{tg}\alpha) \leq T_c, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где  $T_p$  и  $T_c$  – расчетная несущая способность соответственно на выдергивание и продавливание стержней, вклеенных под углами  $\alpha$  и  $\beta$  к волокнам древесины.

Для частного случая при  $\alpha = \beta = 45^\circ$  усилия в стержнях одинаковы и равны  $N_p = N_c = N_a / (2 * \cos 45^\circ)$ .

Конструктивно стыки, подверженные действию сжимающей осевой силы с изгибом, решаются при помощи восприятия сжимающих усилий лобовым упором при применении в растянутой зоне V-образных стержней либо анкеров, вклеенных в одном направлении, либо установкой V-образных стержней в обеих зонах. Расчет таких стыков выполняется по той же методике.

Примером таких конструкций может служить возведенный в Санкт-Петербурге склад калийной соли из гнуклеенных рам со стыком на вклеенных стержнях (рисунок 1.18).

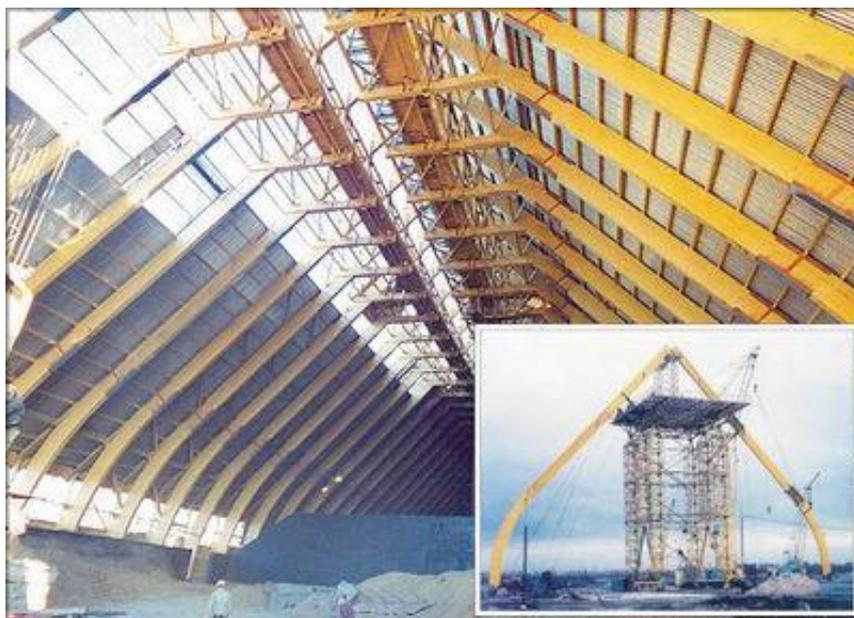


Рисунок 1.18 – Склад калийной соли, г. Санкт-Петербург

#### **1.4. Пути совершенствования нагельных узловых сопряжений деревянных конструкций**

Несмотря на универсальность соединений с использованием клеиваемых стальных стержней и их практическое внедрение в качестве несущих конструкций в ряде объектов промышленного и гражданского назначения, при расчете величины их несущей способности, проектировании, типизации и непосредственно изготовлении, существуют определенные условные недостатки, а именно:

– нет теоретических данных о влиянии углов клеивания поперечных выступов стальных нагелей к оси конструкции на общую прочность клееного соединения при расчете на выдергивание, что ограничивает надежное проектирование новых типов и видов стержней;

– применение в узлах стыка деревянных конструкций высокотемпературных воздействий в связи с необходимостью сварки стальных деталей разноплановых металлических элементов (накладных пластин, арматурных стержней) приводит к возникновению концентраторов напряжений, связанных с разрушением структуры древесины на этих участках;

– существенная разница коэффициентов линейного термического расширения  $\alpha \cdot 10^6$  ( $1/^\circ\text{C}$ ) стали (13,0) и древесины параллельно волокнам (3,7) приводит к ограничению стыковки крупноборных большепролетных отпавочных элементов в условиях большого годового перепада температур;

– предел огнестойкости массивного деревянного сечения, обработанного антипиреном, позволяет выдерживать конструкции до 60 минут без обрушения, при этом переход стальных соединительных деталей в пластическое состояние в условиях пожара произойдет за время в 5-12 раз меньшее (в зависимости от температуры);

– коррозионное разрушение стальных соединительных накладных деталей и арматурных стержней при использовании в условиях химически агрессивных сред без должной антикоррозионной защиты, а зачастую восстановление антикоррозионного слоя невозможно без остановки эксплуатации объекта, накладывает определенные риски возникновения потери несущей способности всей конструкции в связи с потерей несущей способности стыка.

### **1.5. Выводы по главе**

Решение вопроса совершенствования методик расчета и проектирования жестких стыков большепролетных конструкций из цельной и клееной древесины является актуальным.

Наиболее рациональным сопряжением деревянных балочных и арочных конструкций при сращивании по длине на сегодняшний день является универсальный стык «система ЦНИИСК», однако существующие решения имеют некоторые ограничения, связанные с относительно быстрым выходом из строя соединительных элементов, расположенных в зоне влияния химически агрессивной газовой среды.

Кроме того, в технической и научной литературе отсутствуют статистические данные о влиянии химически агрессивной среды, в том числе влажности, на несущую способность большепролетных клееных деревянных конструкций и их стыков.

## **ГЛАВА 2. Исследование влияния химически агрессивной среды на конструкции из клееной древесины, стальные и композитные детали; прогноз технического состояния клееных деревянных конструкций**

### **2.1. Общие сведения**

В Российской Федерации накоплен богатый опыт эксплуатации, производства и проектирования большепролетных конструкций с применением клееной древесины (см. рисунок 2.1). Широкое распространение клееные деревянные конструкции получили при производстве складов хлористого калия, как на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей Пермского края, так и в ближнем (Белоруссия, Узбекистан) и дальнем (Германия, Канада, США, Бразилия, Иордания и др.) зарубежье.

Уникальные свойства и структура древесины позволяют применять ее в условиях химически агрессивных сред, при которых традиционные сталь и бетон быстро исчерпывают свои характеристики несущей способности. По данным эксплуатационных служб, периодичность ремонтов в среднем составляет 5-7 лет для стальных конструкций и 10-15 лет для конструкций из кирпича и железобетона. Это объясняется тем, что существующие составы антикоррозионной защиты не обеспечивают требуемой долговечности конструкции.

Большой опыт практического использования большепролетных арочных складов из клееной древесины для хранения минеральных удобрений накоплен на калийных предприятиях Пермского края [44]. Срок эксплуатации деревянных конструкций в условиях солевой агрессии составляет более 50 лет без выполнения ремонтных мероприятий.

Зарубежный опыт подтверждает актуальность применения древесины в агрессивной среде. Склады хранения соли навалом [45] (Potassium warehouses) используют все компании рынка, так или иначе связанные с циклом производства и хранения руды и готового продукта.

Временное хранение на складах различных продуктов являются завершающей составляющей технологического процесса на калийных предприятиях.



Рисунок 2.1 – Стрельчатый склад пролетом 45 метров

Строительство складов с применением строительных конструкций из древесины, начато с середины 40-х годов XX века. Первоначально в качестве несущих конструкций складов использовались сегментные цельнодеревянные фермы системы Деревягина, попарно объединенные в арочные блоки. Все элементы ферм выполнялись из цельной древесины. Для узловых соединений использовались металлические пластины (поковки) и гвозди.

В шестидесятых годах прошлого века начато изготовление конструкций арочного типа из клееной древесины для большепролетных складов. Эти конструкции изготавливались набором в пакет досок на специальном стапеле с использованием клеегвоздевой запрессовки. Для склеивания применялся фенолформальдегидный клей марки КБ-3. Первые большепролетные склады с

несущими конструкциями в виде клееных деревянных арок стрельчатого очертания пролетом 45 м были введены в эксплуатацию в 1970 г. Первоначально арки устанавливались с шагом 3 м, а в последствии – 6 м.

Дальнейшим этапом совершенствования конструктивных схем явилось создание треугольных распорных систем (А-образных арок) из прямолинейных элементов. Это позволило перейти на индустриальный способ изготовления клееных конструкций с применением винтовых прессов.

Разработка проектов складов осуществлялась различными проектными организациями. Склады системы Деревягина проектировались Львовским филиалом института ГОСГОРХИМПРОЕКТ, арочные склады стрельчатого очертания – Ленинградским ВНИИГ, ГОСГОХИМПРОЕКТ г. Москва, и Уральским филиалом ВНИИГ. Треугольные распорные системы разработаны Уральским филиалом ВНИИГ.

### **2.1.1. Склады системы Деревягина**

Склады системы Деревягина представляют собой одноэтажные, однопролетные сооружения арочного типа. Общий вид склада показан на рисунке 2.2.

Пролеты складов в плане – 34; 36 и 40 м, высота в коньке в зависимости от пролета составляет 17,4...19,8 м. К торцам склада примыкают перегрузочные узлы с подвалами. Подвалы соединяются монолитным железобетонным тоннелем. К аркам подвешена транспортерная галерея, на которой устанавливается транспортер для подачи продукта.

В качестве несущих конструкций складов использовались сегментные цельнодеревянные фермы, попарно объединенные системой горизонтальных и вертикальных деревянных связей в пространственные блоки, рисунок 2.3. Расстояние между арками в блоке – 1,5м, шаг блоков 6м. В настоящее время складов такого типа не сохранилось

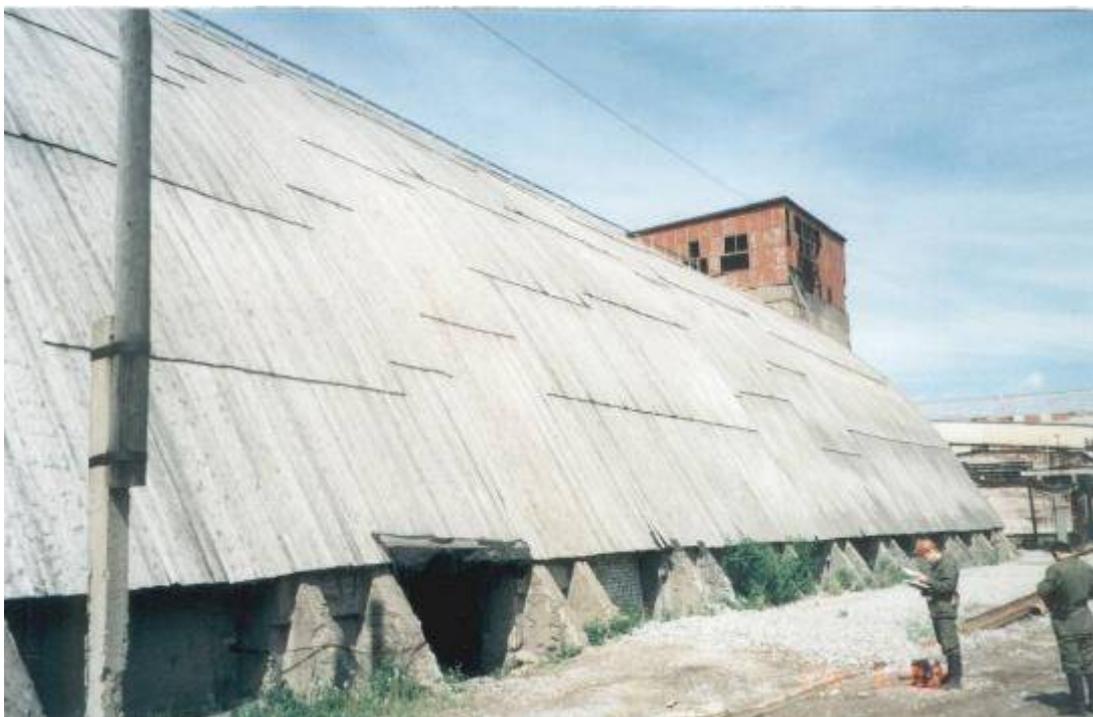


Рисунок 2.2 – Общий вид склада системы Деревягина



Рисунок 2.3 – Общий вид каркаса склада

### **2.1.2. Склады с арками стрельчатого очертания**

Склады представляют собой одноэтажное, однопролетное сооружение с унифицированным пролётом 45 м и высотой в коньке – 24 м. Общий вид склада показан на рисунке 2.4. К торцам склада примыкают перегрузочные узлы с

подвалами. Внутри склада подвешена транспортная галерея с отметкой чистого пола пешеходного настила +16,650 м. На галерее расположены один или два транспортера для подачи продукта. По коньку склада устраивается ходовой мостик. Склады не отапливаемые, с нерегулируемым микроклиматом.



Рисунок 2.4 – Общий вид склада руды стрельчатого очертания

Основными несущими конструкциями склада являются 3-х шарнирные клееные деревянные стрельчатые арки пролетом 45 м с радиусом кривизны полуарки – 31 м и стрелой подъема в коньке 22,5 м.

Арки опираются на монолитные железобетонные фундаменты контрфорсного типа. Обрез фундамента поднят до отм. +0,65 м.

В первоначальном варианте строительство складов велось с шагом арок равным 3 м. Арки проектировались прямоугольного сечения размерам 300x1200. Для изготовления арок использовались доски толщиной 32 мм после острожки. Качество пиломатериала отвечало требованиям второго сорта [6]. Влажность

досок предусматривалась проектом 15 %. Изготовление полуарок осуществлялось на специальном стапеле с применением клеегвоздевой запрессовки. Для склеивания использовался фенолформальдегидный клей марки КБ-3. Устойчивость склада в продольном направлении обеспечивалась косым диагональным настилом и стальными связевыми фермами, рисунок 2.5.



Рисунок 2.5 – Связевая ферма на складе руды

Покрытие устраивалось из досок. Подвесная галерея выполнялась в виде стальной балочной клетки с дощатым настилом.

В связи с увеличением объемов строительства и для повышения уровня сборности по предложению УС «Березникихимстрой» с 1972 г. началось экспериментальное строительство складов с шагом арок 6 м.

По рационализаторскому предложению размеры поперечного сечения арок были приняты 300x1200 мм (в проектах Уральского филиала ВНИИГ сечения арок были увеличены до 300x1400 мм).

Для обеспечения пожарной безопасности в середине склада предусматривались противопожарные зоны.

### 2.1.3. Склады треугольного очертания

В связи с изменением технологии работы складов, которая заключалась в замене кратцер-крана на порталный, появилась необходимость в замене конструкций складов. Из предложенных вариантов наиболее рациональным оказалось строительство склада из прямолинейных элементов А-образного очертания, предложенного Уральским филиалом ВНИИГ. Переход на прямолинейные элементы позволил избавиться от стапеля и гвоздевой запрессовки, конструкции стали изготавливать с помощью прессы, что значительно повысило качество изделий.

Склады А-образного очертания представляют собой однопролетное сооружение с унифицированным пролетом 45 м. Общий вид склада показан на рисунке 2.6. Высота склада в коньковом узле +29,700 м. Основными несущими конструкциями склада являются клееные деревянные треугольные распорные конструкции (А-образные арки) пролетом 45 м. Шаг несущих конструкций – 6 м. Сечение арок прямоугольное с размерами 300×1400 мм, распорок 830×300мм. Марка клея – ФРФ-50, ФР-100. Древесина 1-го и 2-го сортов.



Рисунок 2.6 – Общий вид склада готового продукта треугольного очертания

Устойчивость склада в продольном направлении обеспечивается системой связей и прогонов. Связевые блоки предусматриваются в середине и по торцам склада.

Ниже рассмотрено влияние химически агрессивной газовой среды калийного предприятия на основные конструктивные элементы большепролетных арочных складов и выполнен анализ процессов коррозии строительных материалов по результатам периодического наблюдения и обследования [46, 47].

## 2.2. Условия эксплуатации строительных конструкций складов

За весь срок службы клееных деревянных конструкций не было выявлено ни одного случая аварий, связанных с химической коррозией древесины [48-51]. Чего, однако, нельзя сказать о коррозии стальных элементов узлов крепления основных несущих конструкций. Обобщение материалов испытаний [52] образцов материалов, мониторинга [53] и экспертных заключений [54-56] позволяют прогнозировать изменение состояния строительных материалов и конструкций.

Химический состав газовой среды при добыче и хранении калийных руд (см. таблицу 2.1) агрессивен по отношению ко всем применяемым строительным материалам.

Таблица 2.1 – Химический состав газовой среды

Компоненты						
MgCl <sub>2</sub>	KCl	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	Cl-	H <sub>2</sub> O
Содержание, %						
Руда						
0,13	28,53	67,27	2,05	1,72	0,15	0,15
Готовый продукт						
0,04	95	4	0,55	0,2	0,11	0,1

Степень агрессивного воздействия на конструкции определяется химическим составом среды и характером воздействия ее компонентов на конструкции из разных материалов при определенном температурно-

влажностном режиме, и классифицируется как слабоагрессивная, среднеагрессивная и сильноагрессивная [6]. Для усредненного состава продуктов, приведенного в таблице 2.1, в условиях средней полосы России, степень агрессивного воздействия выглядит следующим образом (см. таблицу 2.2).

Таблица 2.2 – Степень воздействия среды на материал

Характеристика среды		Степень воздействия на материал			
Состав среды	Зона влажности	Железобетон	Сталь	Глиняный кирпич	Древесина
Аэрозоли солей натрия и калия	Нормальная	Средняя	Сильная	Средняя	Слабая

Разрушение капиллярно-пористых материалов (кирпич, бетон, древесина) в условиях калийных предприятий происходит в основном вследствие физической коррозии, обусловленной фазовыми преобразованиями растворов солей в порах материалов.

При запылении элементов конструкций и переменном температурно-влажностном режиме соли впитывают влагу и образуют на поверхности конструкций насыщенные растворы. Происходит постепенное проникновение этих растворов во внутреннюю часть материалов, а затем, при изменении температуры и влажности, начинается процесс кристаллизации. Величина кристаллизационного давления может достигать от 4 до 10 МПа. Такого давления достаточно для разрушения поверхностного слоя материала (поверхностная мацерация). Скорость и степень разрушения зависит от структуры материала, температурно-влажностных условий эксплуатации, состава солей, содержащихся в пыли и технологических растворах.

Эксплуатационная надежность деревянных конструкций в агрессивной среде калийных предприятий значительно выше, чем конструкций из традиционных материалов: железобетона и стали. По данным длительных наблюдений и проводимых обследований средняя продолжительность эксплуатации до проведения капитального ремонта составляет: для

железобетонных конструкций 5...7 лет; для стальных – 7...10 лет. Это объясняется тем, что существующие способы защиты строительных конструкций от агрессивного воздействия промышленной среды калийных предприятий не обеспечивают требуемой долговечности стальных и железобетонных конструкций.

В тех же условиях практически без специальной защиты ДК и КДК эксплуатируются без капитального ремонта более 25 лет. Это подтверждается и зарубежным опытом применения КДК в калийных отраслях.

Строительство и эксплуатация зданий и сооружений с применением деревянных конструкций осуществляются на территориях калийных предприятий России с 1950 г, а клееных деревянных конструкций с 1971 г.

В основном ДК и КДК применяются при возведении большепролетных складов калийных солей, наземных транспортерных галерей и вспомогательных объектов.

Конструкции складов находится под воздействием неблагоприятных эксплуатационных факторов. Это высокое содержание пыли внутри зданий, значительные перепады температуры и влажности. По данным многолетних метеонаблюдений в районах Пермского края среднемесячная температура в теплое время года составляет от +16 до +18 °С, в холодное время – от минус 15 до минус 18 °С. Влажность воздуха колеблется в пределах 28...81 %.

На характер и степень разрушения весьма существенно влияет состав пыли, определяемый составом добываемых руд. Наиболее агрессивным является карналлит, содержащий достаточно большое количество хлористого магния, см. таблицу 2.1. Хлористый магний хорошо растворяется в воде и обладает высокой гигроскопичностью.

По данным ЦНИИСК им. Кучеренко поверхностное разрушение древесины конструкций внутри склада после тридцати лет эксплуатации составляет не более 5 мм. Для конструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе

(деревянные щиты покрытия) без защитного покрытия аналогичное разрушение происходит после трех лет эксплуатации.

### **2.3. Анализ опыта эксплуатации строительных конструкций складов**

Наблюдения за техническим состоянием строительных конструкций складов в процессе эксплуатации началось с конца шестидесятых годов и осуществлялось различными организациями. Обследования проводились визуально и инструментально, с целью своевременного выявления причин появления дефектов. За период длительных наблюдений удалось выявить наиболее характерные дефекты и повреждения для каждого из рассмотренных выше типов очертания складов.

Условно, можно выделить три группы неблагоприятных факторов:

- эксплуатационные;
- нормативно-технические;
- расчетно-теоретические.

В рамках данной работы нас интересуют эксплуатационные факторы среды, влияющие на долговечность конструкции, а именно:

- перепады температуры и влажности;
- агрессивность внутренней среды;
- снижение прочностных показателей клеевых швов и самой древесины в процессе эксплуатации;
- коррозия стальных элементов узловых стальных соединений.

#### **2.3.1. Влияние солесодержания и влажности на прочность древесины**

Тридцатипятилетний опыт наблюдения за эксплуатацией клееных несущих и ограждающих конструкций складов, систематизация результатов проводимых обследований позволила выявить наиболее характерные особенности работы клееных арочных конструкций и установить факторы, влияющие на их долговечность.

Рассмотрим влияние содержания солей и влажности на прочность древесины и стали. С целью установления степени насыщенности древесины солями, из полуарок эксплуатируемых складов были отобраны опытные образцы. По данным лабораторных испытаний, установлено, что при максимальном насыщении хлористым калием, содержание солей в опытных образцах не превышало 25 %, а глубина насыщенного слоя после 40 лет эксплуатации не превышает 2...5 мм, и на глубине 15 мм снижается до 6...8 % (см. рисунок 2.7).

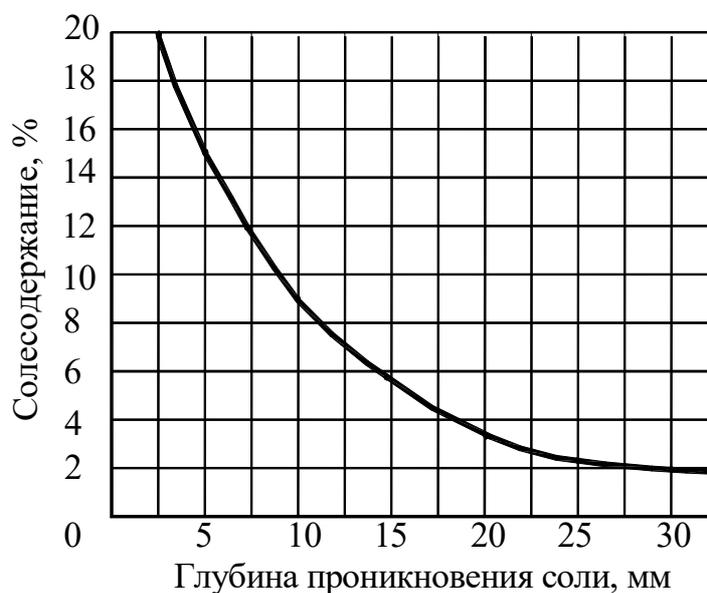


Рисунок 2.7 – Распределение солесодержания по глубине сечения

Прочностные характеристики клееных деревянных образцов, насыщенных солевым раствором, снижаются в зависимости от количества раствора в образце. Относительное снижение прочности образцов при изгибе, а также при сжатии вдоль волокон по результатам опытов, приведены на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Снижение относительной прочности древесины в зависимости от содержания соли

Таким образом, наибольшее снижение прочности древесины в агрессивной среде не превышает 20 %.

Другим существенным фактором, снижающим прочность древесины [57-66], является влажность. Влажность древесины мало зависит от атмосферных условий. Микроклимат внутри складских сооружений является практически постоянным с незначительными колебаниями в зависимости от времени года. В тоже время, при условии интенсивной запыленности конструкций в системе «влажный воздух-соль-древесина», гигроскопическая соль является влагопереносной системой. Накопление влаги древесной конструкций и ее распространение в глубину сечения зависит от продолжительности эксплуатации. Увлажнение и изменение прочностных характеристик древесины конструкций по сечению протекают более интенсивно по сравнению с соленакоплением.

На рисунке 2.9 показано распределение влажности по глубине сечения конструктивного элемента при ширине последнего более 150мм и сроке эксплуатации 15 лет.

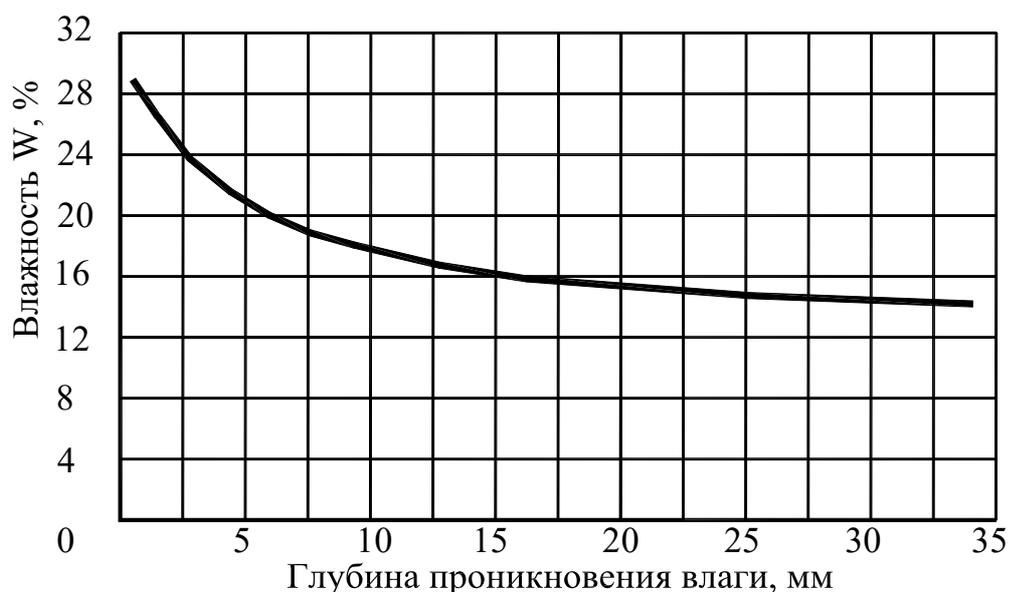


Рисунок 2.9 – Распределение влаги по глубине сечения

Из графика видно, что наиболее интенсивно процесс проникновения влаги в глубину сечения происходит первые 5-8 лет. Затем процесс замедляется, и глубина увлажненной зоны не превышает 1/3 высоты элемента. При анализе распределения влажности по сечению деревянных конструкций после 3, 13, 20 лет эксплуатации установлено, что различный процентный уровень содержания влаги в древесине продвигается в глубь сечения с различной скоростью. Более высокая влажность продвигается медленнее и если принять скорость продвижения тридцатипроцентной влажности (30 % предел гигроскопичности) за единицу, то относительная скорость влагонасыщения при других значениях имеет вид гиперболической кривой, рисунок 2.10.

Распределение влажности по сечению реальных конструктивных элементов в различные сроки эксплуатации и с учетом специфики эксплуатационных условий складов описывается эмпирическим уравнением, удовлетворительно описывающим кривые влагосодержания натуральных конструкций складов калийных производств [67].

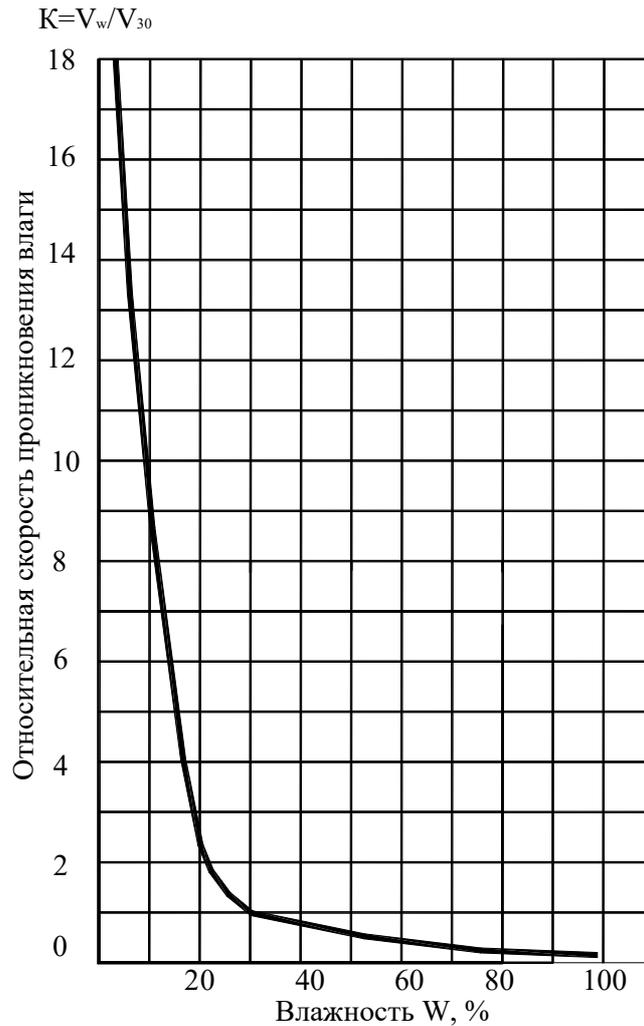


Рисунок 2.10 – Коэффициент скорости проникновения влаги

Уравнение распределения влажности по толщине сечения имеет вид

$$W = \frac{48}{\delta^{0,83}} \tau^{(0,3\delta^{0,16})}, \quad (2.1)$$

где  $W$  – влажность древесины в %,

$\delta$  – расстояние от заданной точки сечения до поверхности в мм,

$\tau$  – время эксплуатации, в годах.

Наличие в поперечном сечении конструктивного элемента слоев с различной влажностью приводит к сложному перераспределению внутренних напряжений, что отрицательно сказывается на прочностных и упругих характеристиках древесины. Изменение модуля упругости и прочности стандартных образцов древесины на растяжение, изгиб и сжатие в зависимости от влажности приведено на рисунке 2.11.

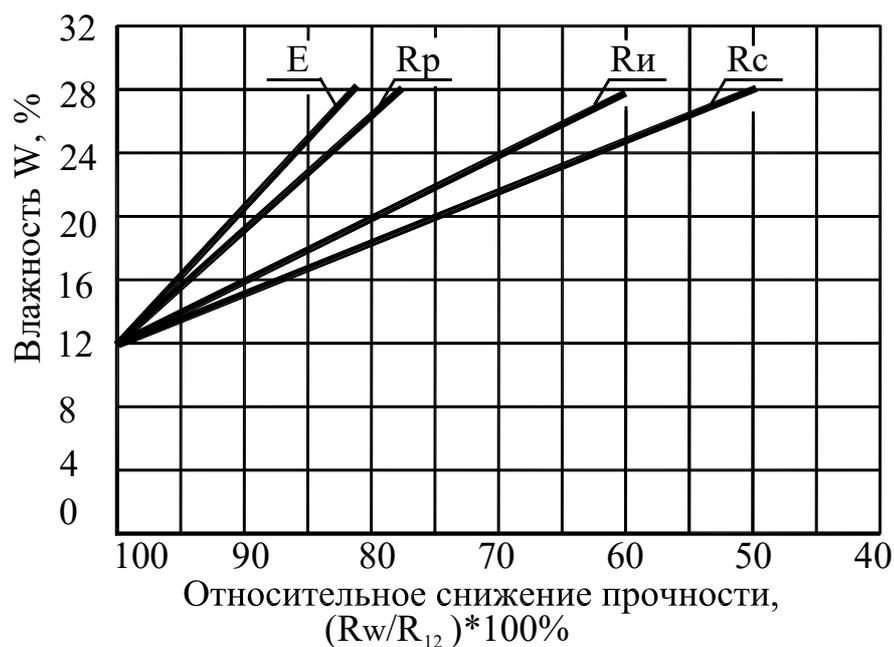


Рисунок 2.11 – Относительное снижение модуля упругости и прочности стандартных образцов на растяжение, изгиб и сжатие при изменении влажности

Прочностные и упругие характеристики древесины конструкций, эксплуатирующихся под воздействием среды складов калийных солей, с учетом влияния влажности и временного фактора аппроксимируются следующими зависимостями:

– прочность на сжатие:

$$R_{сж}^w = (1,672 - 0,0336W) R_{сж}; \quad (2.2)$$

– прочность на растяжение:

$$R_p^w = (1,248 - 0,0124W) R_p; \quad (2.3)$$

– модуль упругости:

$$E^w = (1,226 - 0,0113W) E, \quad (2.4)$$

где  $W$  – влажность древесины в %,

$R_{сж}^w$ ,  $R_p^w$  – прочность древесины на сжатие и растяжение при эксплуатационной влажности;

$E^w$  – модуль упругости древесины при эксплуатационной влажности;

$R_{сж}$ ,  $R_p$ ,  $E$  – прочность древесины на сжатие, растяжение и модуль упругости при нижней границе влажности, равной 20%.

Уравнения дают достоверные результаты в диапазоне изменения влажности от 12 до 30%.

С учетом полученных данных и выведенных зависимостей условие прочности поперечного сечения сжато-изгибаемого элемента имеет вид

$$\sigma_i = \frac{M \frac{E^w}{E} \left( \frac{A}{I_{пр}} + y_i - h_o \right)}{I_{пр} \xi} \leq R_{сж} , \quad [2.5]$$

где  $A$  – отношение  $N/M$ ,

$y_i$  – расстояние до центра рассматриваемой ячейки,

$h_o$  -расстояние от центра ячейки до центральной оси сечения.

Уравнение справедливо при следующих условиях:

– изменение влажности древесины по сечению принято в пределах от 12 до 30 %;

– отношение нормальной силы к изгибающему моменту остается постоянным при любом уровне нагружения;

– конструкция работает упруго до разрушения;

– при увлечении нагрузки напряжение в некоторой точке превысит предельное, то разрушение произойдет только в этой точке,

– устойчивость конструкции при нагружении обеспечена.

С использованием приведенной формулы было проанализировано напряженное состояние реальных арочных конструкций действующих складов при трех уровнях соотношений сжимающей продольной силы и изгибающего момента, соответствующих различным сочетаниям расчетных нагрузок. Расчет проводится для сроков эксплуатации 5, 10, 20, 40, 60 лет.

Результаты расчета показали, что, начиная с 20 лет, разрушение некоторой части ячеек не приводит к лавинному разрушению оставшихся ячеек по всему

сечению, а в результате перераспределения напряжений происходит некоторое повышение несущей способности оставшегося не разрушенным сечения.

Приведенные данные позволяют прогнозировать срок службы несущих деревянных конструкций складов калийных производств, при гигроскопическом увлажнении, не менее 60 лет.

### **2.3.2. Влияние продолжительности эксплуатации на прочность древесины**

Древесина в строительных конструкциях зданий и сооружений калийных производств эксплуатируется 50...80 лет. В связи с таким длительным сроком эксплуатации, физико-механические характеристики древесины могут изменяться.

Для выявления характера изменения прочностных характеристик древесины во времени различными организациями выполнен большой объем экспериментальных исследований.

Основной задачей проводимых экспериментов являлось определение фактической прочности древесины после длительного срока эксплуатации в условиях систематического воздействия солей хлористого калия, натрия и магния при влажности окружающей среды более 30 %. На основе результатов испытаний планировалось:

- выявить зависимость прочностных характеристик древесины от срока эксплуатации;
- установить влияние эксплуатационных факторов на прочность древесины.

В ходе инженерных обследований несущих конструкций складов калийных солей в период с 1997 по 2016 г. производился отбор образцов древесины из опорных узлов клееных арок. Из отобранных фрагментов изготавливались стандартные образцы для определения прочностных характеристик древесины на сжатие и определения прочности клеевых швов на скалывание.

Прочностные характеристики древесины на сжатие и скалывание, полученные в результате испытаний образцов, отобранных из арок в различных складах, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Прочностные характеристики древесины арочных складов по результатам испытаний стандартных образцов

№	Год ввода в эксплуатацию	Срок эксплуатации (на 2016 год)	Расчетные сопротивления (по результатам испытаний)		Относительные расчетные сопротивления	
			на сжатие $R_c^*$ (МПа)	скалывание $R_{ск}^*$ (МПа)	на сжатие $R_c^*/R_c$ (МПа)	скалывание $R_{ск}^*/R_{ск}$ (МПа)
Стрельчатые арки						
1	1978	38	7,56	0,74	0,58	0,49
2	1971	45	9,44	0,78	0,73	0,52
3	1976	40	11,89	0,68	0,91	0,45
4	1971	45	10,3	0,63	0,79	0,42
5	1970	46	9,6	1,18	0,74	0,79
6	1975	41	3,24	0,46	0,48	0,31
7	1971	45	11,1	1,15	0,85	0,76
8	1974	42	9,9	1,33	0,76	0,45
9	1975	41	11,37	0,66	0,87	0,71
10	1975	41	14,11	0,75	1,08	0,50
А-образные арки						
11	1988	28	11,88	1,13	0,91	0,75
12	1983	33	12,8	0,9	0,98	0,6
13	1983	33	15,6	0,95	1,2	0,63
14	1983	33	13,99	0,86	1,07	0,57
Условные обозначения:						
$R_c^*$ – экспериментальное значение расчетного сопротивления древесины сжатию;						
$R_{ск}^*$ – экспериментальное значение расчетного сопротивления древесины скалыванию;						
$R_c = 13$ МПа - нормируемое значение расчетного сопротивления древесины 2 сорта сжатию;						
$R_{ск} = 1,5$ МПа - нормируемое значение расчетного сопротивления древесины 2 сорта скалыванию						
Примечание: для клееных арок прочность на скалывание определена по клеевому шву						

Из данных, приведенных в таблице 2.1 видно, что экспериментальные значения расчетных сопротивлений на сжатие и скалывание древесины клееных конструкций имеют большой разброс. Коэффициент вариации изменяется от 13,1 до 24%. Относительная точность определения средних значений временного сопротивления сжатию составляет 2,2 ...6,2%, а скалыванию – 3,3...7,5%. Для получения сопоставимых данных, экспериментальные значения были рассортированы на группы в зависимости от величины относительной прочности  $R_{вр}^* / R_{вр}^ч$ .

За величину  $R_{вр}^ч$  принято значение предела прочности древесины на сжатие, полученное по результатам испытаний чистых стандартных образцов. Это значение принимается равным 44 МПа [6]. Если экспериментальные значения временного сопротивления  $R_{вр}^*$  ниже  $R_{вр}^ч=44$  МПа, следовательно, качество древесины не отвечает требованиям, предъявляемым к пиломатериалам первого сорта. Для древесины второго и третьего сортов вводятся понижающие коэффициенты. Понижающий коэффициент для древесины второго сорта составляет  $K_{п} = 0,94$ , а для третьего сорта  $K_{п} = 0,61$ . Исходя из этого принципа, все экспериментальные данные разделены на три группы. В первую группу включены выборки с отношением  $R_{вр}^* / R_{вр}^ч > 1$ , то есть прочность древесины соответствует требованиям первого сорта. Во вторую группу вошли выборки образцов, отвечающих требованиям по прочности не ниже второго сорта с отношением  $R_{вр}/R_{н} = 0,98...0,94$  и в третью группу вошли выборки образцов, отвечающих требованиям по прочности не ниже третьего сорта с отношением  $R_{вр}/R_{н} = 0,91...0,67$ . Результаты расчетов приведены в таблице 2.2.

Таким образом, испытания образцов древесины, отобранных из конструкций, эксплуатируемых длительное время, показали, что значительного снижения прочности древесины не происходит. Срок эксплуатации на промежутке 19 – 37 лет не оказывает существенного влияния на прочность древесины.

Таблица 2.2 – Сравнительная прочность образцов на сжатие

№ объекта отбора образцов (в соответствии с таблицей 2.1)	Срок эксплуатации (на 2016 год)	Среднее значение $\overline{x_j}$ , МПа	Относительная прочность, $R_{вр}^* / R_{вр}^ч$	Сравнение средних значений	Дисперсия $S_j^2$ , МПа <sup>2</sup>
$R_{вр}^* / R_{вр}^ч \geq 1$ (древесина 1 сорта)					
4	45	45,08	1,02	$a_j > a_0$	116,8
7	45	43,53	0,99	$a_j = a_0$	60,0
10	41	48,36	1,1	$a_j > a_0$	44,64
11	28	45,36	1,03	$a_j > a_0$	122,8
14	33	48,84	1,11	$a_j > a_0$	53,15
$1 > R_{вр}^* / R_{вр}^ч \geq 0,94$ (древесина 2 сорта)					
3	40	41,44	0,94	$a_j < a_0$	42,63
9	41	41,24	0,937	$a_j < a_0$	29,3
12	33	43,14	0,98	$a_j < a_0$	40,63
$0,94 > R_{вр}^* / R_{вр}^ч \geq 0,61$ (древесина 2-3 сорта)					
1	38	30,22	0,687	$a_j < a_0$	25,7
2	45	34,4	0,78	$a_j < a_0$	34,2
5	46	32,71	0,743	$a_j < a_0$	29,6
6	41	36,71	0,83	$a_j < a_0$	50,2
8	42	32,61	0,74	$a_j < a_0$	52,6
13	33	40,14	0,91	$a_j < a_0$	42,05

Анализ данных, приведенных в этой таблице, показывает, что из древесины первого сорта изготовлено 35,7 % конструкций, из древесины второго сорта – 21,4 %. Остальные 42,9 % конструкций выполнены из древесины не ниже третьего сорта. При этом не наблюдается зависимости между

продолжительностью эксплуатации и изменением прочностных характеристик древесины.

Прочностные характеристики образцов на скалывание по клеевому шву ниже нормативных значений. При этом у большинства образцов отмечается разрушение по клеевому шву, а не по древесине. Такой характер разрушения свидетельствует о низком качестве склеивания конструкций при изготовлении. Определенную негативную роль играет и место отбора образцов – опорная часть арок, где наиболее активно происходят процессы усушки и набухания с возникновением больших внутренних напряжений, значительно ухудшающих работу клеевых швов.

Для оценки достоверности полученных результатов испытаний опытных образцов, отобранных из конструкций, была выполнена статистическая обработка экспериментальных данных. Рассмотрено несколько вариантов обработки экспериментальных данных. На первом этапе произведена обработка совокупности данных по всем объектам. Затем проанализированы результаты по объектам с одинаковыми условиями эксплуатации. На последнем этапе произведено сравнение результатов между группами складов с разными условиями эксплуатации. Обработка результатов производилась по общепринятой методике.

При обработке результатов предполагается выполнение следующих условий:

- выбор конструкций для отбора образцов осуществляется случайно;
- конструкции склада – однородные объекты.

В ходе инженерного обследования несущих конструкций склада производят выборку древесины из опорных узлов отдельных конструкций. Число конструкций, из которых выполнена вырезка образцов древесины, составляет  $k = 5 - 7$  шт.

Генеральную совокупность составляют конструкции всего склада, выборочную совокупность – конструкции, из которых выполнена заготовка

древесины. Число рассматриваемых генеральных совокупностей  $N$ , равно числу складов, при обследовании которых отбирались образцы для испытания древесины. Каждой генеральной совокупности присваивается номер  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ , соответствующий порядковому номеру склада. Генеральные совокупности обозначены, как  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ .

Однородность конструкций означает, что они изготовлены из материала одного качества и по одной технологии. При производстве арок методом клеегвоздевой запрессовки в 70...80 годы это условие выполнялось не в полной мере, однако с достаточной степенью достоверности следует допустить предположение об относительной однородности конструкций по отношению друг к другу. При выполнении данных условий, можно считать, что выборка представительна.

При эксплуатации древесина в пределах одной конструкции имеет различные уровни внешней нагрузки. Воздействие эксплуатационной среды в разных зонах также неодинаково. Выборка древесины производилась из опорной зоны конструкции (4-5 нижних наружных слоя досок). Уровень нагрузки древесины в этой зоне незначительный, а концентрация соли и влажность более высокая, чем в других сечениях конструкции. Однако, как было установлено ранее, солесодержание и распределение влаги по глубине поперечного сечения с течением времени выравниваются и не оказывают существенного влияния на прочностные характеристики древесины. В связи с чем, есть основания предполагать, что свойства древесины не существенно различаются в зависимости от места отбора образцов. Поэтому, можно считать, что выборка представительна.

При обработке результатов испытаний общей генеральной совокупности  $X_j$ , рассматривается  $k$  частных выборок, которые объединяются в одну общую выборку. Объединение частных выборок в одну, возможно при условии их однородности. Однородность выборок означает, что генеральные совокупности, из которых были отобраны данные выборки, имеют одинаковые параметры

распределения. Однородность выборок устанавливается проверкой статистических гипотез о равенстве параметров распределения генеральных совокупностей. Основанием для выдвижения данных гипотез является допущение об однородности конструкций. Для оценки прочности древесины на сжатие рассматриваются только общие генеральные совокупности  $X_j$  и общие выборочные совокупности. Результатами испытаний образцов являются значения временного сопротивления древесины  $R_{ep}$ . Временное сопротивление древесины  $R_{ep}$  является непрерывной случайной величиной, так как в результате испытания принимает одно неизвестное значение, из некоторого ограниченного непрерывного множества возможных значений.

Обозначим случайную величину  $R_{ep} - X_{i,j}$ , а ее наблюдаемые значения -  $x_{i,j}$  где  $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$ ;  $n_j$  – объем выборки генеральной совокупности  $X_j$ .

Предполагается, что случайная величина  $X_{i,j}$  имеет нормальное распределение с параметрами  $M(X_{i,j})$  и  $D(X_{i,j})$ , где  $M(X_{i,j})$ ,  $D(X_{i,j})$  - соответственно математическое ожидание и дисперсия случайной величины  $X_{i,j}$  генеральной совокупности  $X_j$ .

$M(X_{i,j}) = a_j$ ,  $D(X_{i,j}) = \sigma_j^2$ , где  $a_j$ ,  $\sigma_j^2$  - соответственно генеральная средняя и генеральная дисперсия случайной величины  $X_{i,j}$  генеральной совокупности  $X_j$ .  $M(X_{i,j})$ ,  $D(X_{i,j})$  - неизвестные параметры распределения случайной величины  $X_{i,j}$  генеральной совокупности  $X_j$ .

В результате статистической обработки результатов испытаний выполняется оценка неизвестных параметров  $M(X_{i,j})$ ,  $D(X_{i,j})$ . Выборочное среднее  $\bar{x}_j$  и выборочная дисперсия  $S_j^2$  являются оценками соответствующих генеральных характеристик  $a_j$ ,  $\sigma_j^2$ . Результаты вычислений выборочных средних  $\bar{x}_j$  и дисперсии  $S_j^2$  представлены на графиках рис. 2.12 и 2.13.

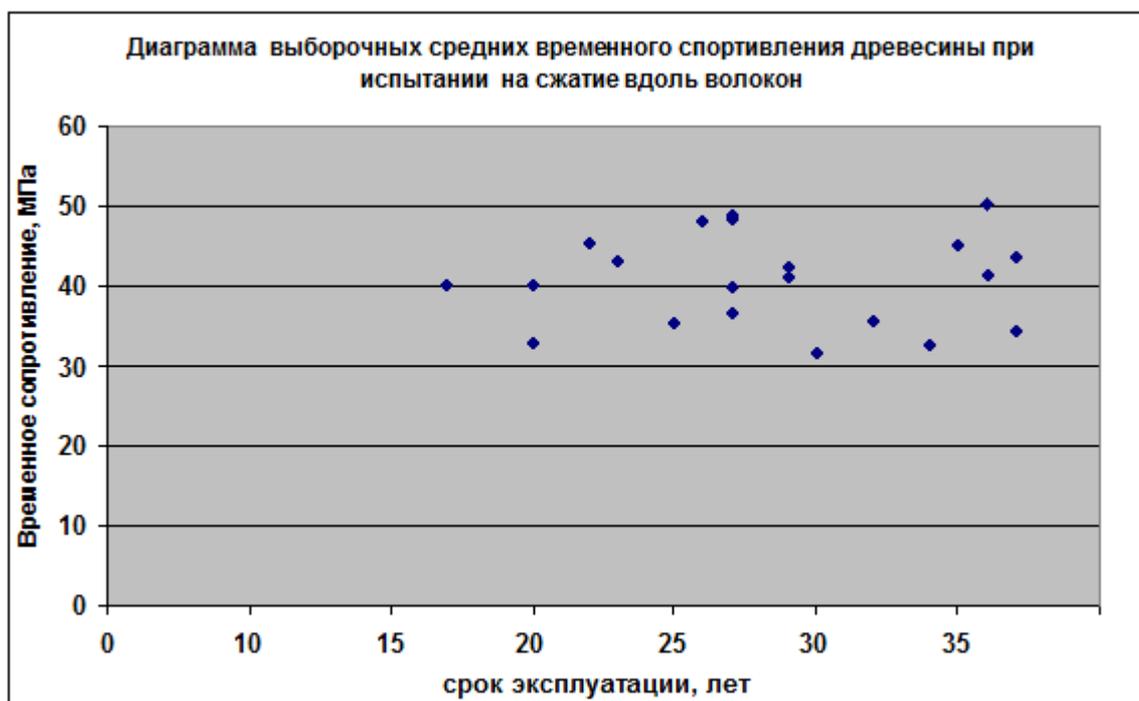


Рисунок 2.12 – Диаграмма распределения выборочных средних значений временного сопротивления древесины образцов на сжатие

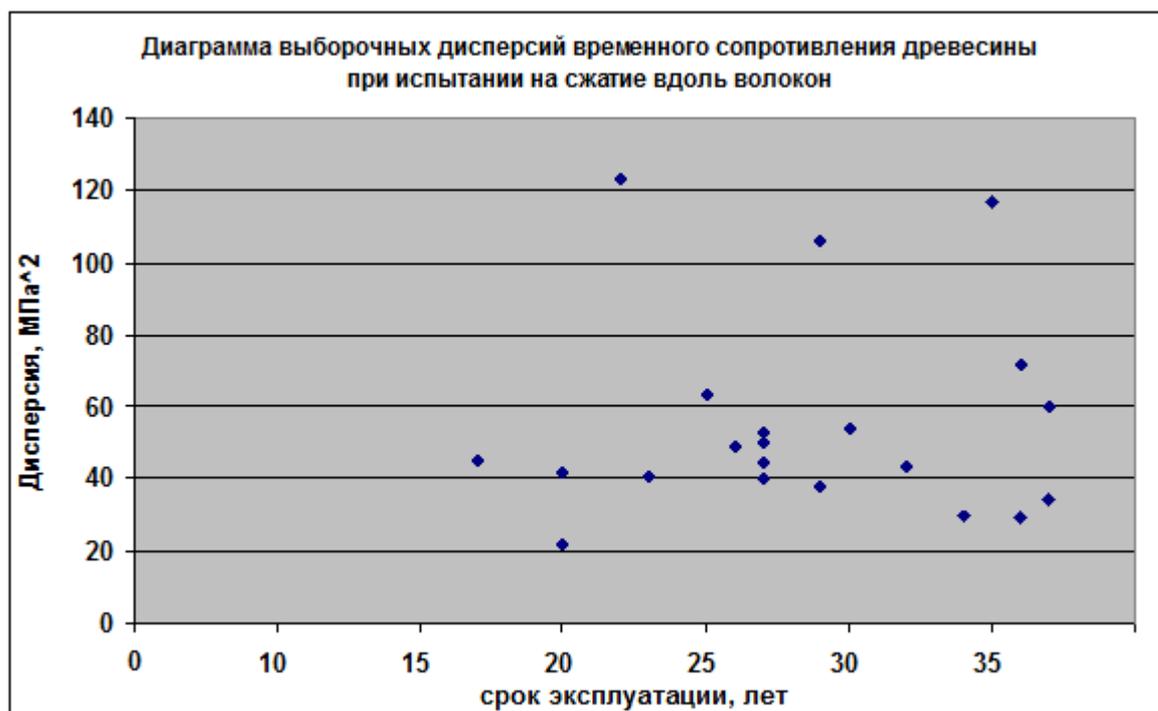


Рисунок 2.13 – Диаграмма распределения выборочных дисперсий временного сопротивления древесины образцов на сжатие

Дисперсия  $S_j^2$ , также, как и выборочное среднее  $\bar{x}_j$ , является характеристикой случайной величины  $X_{i,j}$ . Поэтому, оценивая взаиморасположение точек на диаграмме выборочных средних, рис. 2.12, следует учитывать соответствующие им дисперсии.

Некоторое рассеяние выборочных характеристик  $\bar{x}_j$ ,  $S_j^2$  вполне объяснимо, поскольку они являются случайными величинами и определены на основании ограниченного объема испытаний  $n_j$ .

Рассеяние оценок  $S_j^2$  (рис. 2.13) может быть так же следствием различного подхода в проведении испытаний на разном оборудовании и различными специалистами (так называемый индивидуальный фактор). При одинаковом подходе в проведении испытаний выборочные дисперсии  $S_j^2$  должны быть примерно равны друг другу.

Следует отметить, что среднее  $\bar{x}_j$  является более устойчивой к влиянию индивидуального фактора, чем дисперсия  $S_j^2$ . На среднее значение влияет срок эксплуатации и условия эксплуатации  $X_j$ , но на дисперсию указанные факторы влияния не оказывают.

Если выполнить оптимизацию графиков и исключить выпадающие максимальные и минимальные значения, то прослеживается вполне явная закономерность колебания средней величины временного сопротивления древесины в пределах 40...42 МПа. Это близко к значению, приводимому в нормах проектирования.

Для подтверждения данного вывода произведено сравнение прочностных характеристик, полученных в результате испытаний, с соответствующими значениями, установленными нормами.

Временное сопротивление чистой древесины сжатию вдоль волокон в СП [6] принимается равным  $R_q^{sp} = 44$  МПа. Коэффициент вариации при испытании древесины на сжатие вдоль волокон принимаемый по табл. 9 Пособия к [6] равен

$\nu = 0,13$ . В этом случае дисперсия временного сопротивления чистой древесины при сжатии вдоль волокон равна

$$\sigma^2 = (\nu \times R_q^{ep})^2 = 32,72 \text{ МПа}^2 \quad [2.6]$$

Временное сопротивление чистой древесины сжатию вдоль волокон  $R_q^{ep}$  является гипотетической генеральной средней  $a_0$ . Для каждой генеральной совокупности  $X_j$  выполняется проверка статистической гипотезы о равенстве генеральной средней  $a_j$ , гипотетическому значению  $a_0 = R_q^{ep}$ , установленному нормами. Обычно рассматриваются две гипотезы. Нулевая гипотеза  $H_0$ , когда  $a_j = a_0$ , и альтернативная гипотеза  $H_1$ , когда  $a_j \neq a_0$ .

В качестве критерия для проверки  $H_0$  используется статистика:  $t = \frac{\bar{x} - a_0}{S / \sqrt{n}}$ , которая имеет распределение Стьюдента с  $k = n_j - 1$  степенями свободы, где  $\bar{x}_j$  - выборочные среднее генеральной совокупности  $X_j$ ;

$S_j$  - выборочное стандартное отклонение,  $S_j = \sqrt{S_j^2}$  генеральной совокупности  $X_j$ ;

$n_j$  - объем выборки генеральной совокупности  $X_j$ .

Уровень значимости при проверке  $H_0$   $\alpha = 0,05$ .

Учитывая вид  $H_1$ , строится двусторонняя критическая область  $(-\infty; -t_{кр}) \cup (t_{кр}; +\infty)$ . Наблюдаемое значение критерия  $t_{набл}$  сравнивается с критическим двусторонним значением критерия  $t_{кр}$ .

Если  $|t_{набл}| > t_{кр}$ ,  $H_0$  отвергается, принимается  $H_1$ .

Если  $|t_{набл}| < t_{кр}$ ,  $H_0$  принимается.

Анализ результатов показал, что выборочные средние  $\bar{x}_j$  статистически значимо отличаются от гипотетического значения  $a_0$ , установленного нормами. Поэтому, для получения более достоверной картины, выполнен дополнительный статистический анализ, состоящий в сравнении выборочных дисперсий с гипотетической генеральной дисперсией.

Для каждой генеральной совокупности  $X_j$  выполняется проверка статистической гипотезы о равенстве генеральной дисперсии  $\sigma_j^2$ , гипотетическому значению  $\sigma_0^2=32,72 \text{ МПа}^2$ , установленному нормами. При нулевой гипотезе  $H_0$ , принимается:  $\sigma_j^2 = \sigma_0^2$ . При альтернативной гипотезе  $H_1$ :  $\sigma_j^2 \neq \sigma_0^2$ .

В качестве критерия проверки  $H_0$  используется статистика  $\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$ , которая имеет  $\chi^2$ -распределения с  $k = n_j - 1$  степенями свободы,

где  $S_j^2$  - выборочная дисперсия генеральной совокупности  $X_j$ ;

$n_j$  - объем выборки генеральной совокупности  $X_j$ .

Уровень значимости при проверке  $H_0$   $\alpha = 0,05$ .

Учитывая вид  $H_1$ , строится двусторонняя критическая область

$(0; \chi_{\text{лев.кр.}}^2) \cup (\chi_{\text{прав.кр.}}^2; +\infty)$ . Наблюдаемые значения критерия  $\chi_{\text{набл}}^2$  сравниваются с критическими значениями  $\chi_{\text{лев.кр.}}^2$  (левосторонний),  $\chi_{\text{прав.кр.}}^2$  (правосторонний).

Если  $\chi_{\text{набл}}^2 > \chi_{\text{лев.кр.}}^2$  и  $\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\text{прав.кр.}}^2$ , то  $H_0$  принимается.

Если  $\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\text{лев.кр.}}^2$  или  $\chi_{\text{набл}}^2 > \chi_{\text{прав.кр.}}^2$ , то  $H_0$  отвергается и принимается  $H_1$ .

Результаты проверки  $H_0$  приведены в таблице 2.2.

Для генеральных совокупностей  $X_1 \dots X_8$  выполняется условие  $\sigma_j^2 = \sigma_0^2$  и  $a_j \geq a_0$ , следовательно, для указанных генеральных совокупностей расчетное сопротивление древесины  $R_c$  может быть принято по [6] как для пиломатериалов первого сорта. Для остальных выборок данное условие не выполняется и, следовательно, расчетное сопротивление древесины  $R_c$  должно приниматься как для пиломатериалов второго сорта.

Для выявления влияния эксплуатационной среды на прочность древесины результаты испытаний были разделены по группам. В группы входили

конструкции, эксплуатируемые в одинаковых условиях. Анализ прочностных характеристик выполнялся внутри группы, а затем – между группами. Разделение складов на группы, с одинаковыми условиями эксплуатации, позволяет исключить возможное влияния фактора условий эксплуатации на результаты испытаний и более достоверно оценить возможное влияние срока эксплуатации на прочность древесины.

Полученные в результате такого анализа данные позволяют сделать вывод о том, что при сроке эксплуатации конструкций более 30 лет, эксплуатационная среда не оказывает существенного влияния на прочность древесины, что вполне согласуется с выводами предыдущих разделов.

Для сравнения приведем исследование кривой зависимости коррозионного повреждения стальных накладных деталей, применяемых на сегодняшний день во всех узловых соединениях деревянных конструкций (см. рисунки 2.14 и 2.15).

По графикам видно, что кривые, описывающие зависимости коррозионного износа от времени наиболее точно описываются полиномами 3-й и 4-й степени. По статистическим данным отмечено, что стальные накладки будут иметь сквозные коррозионные повреждения после ~60 лет эксплуатации. Однако дефицит несущей способности, при котором возникнет вероятность обрушения конструкции, произойдет намного раньше этого срока.

Следует отметить, что химический состав продукта оказывает влияние на скорость протекания коррозионных процессов. Из графиков видно, что склады с большим содержанием хлористого калия (склады готового продукта) более подвержены влиянию агрессивной среды.

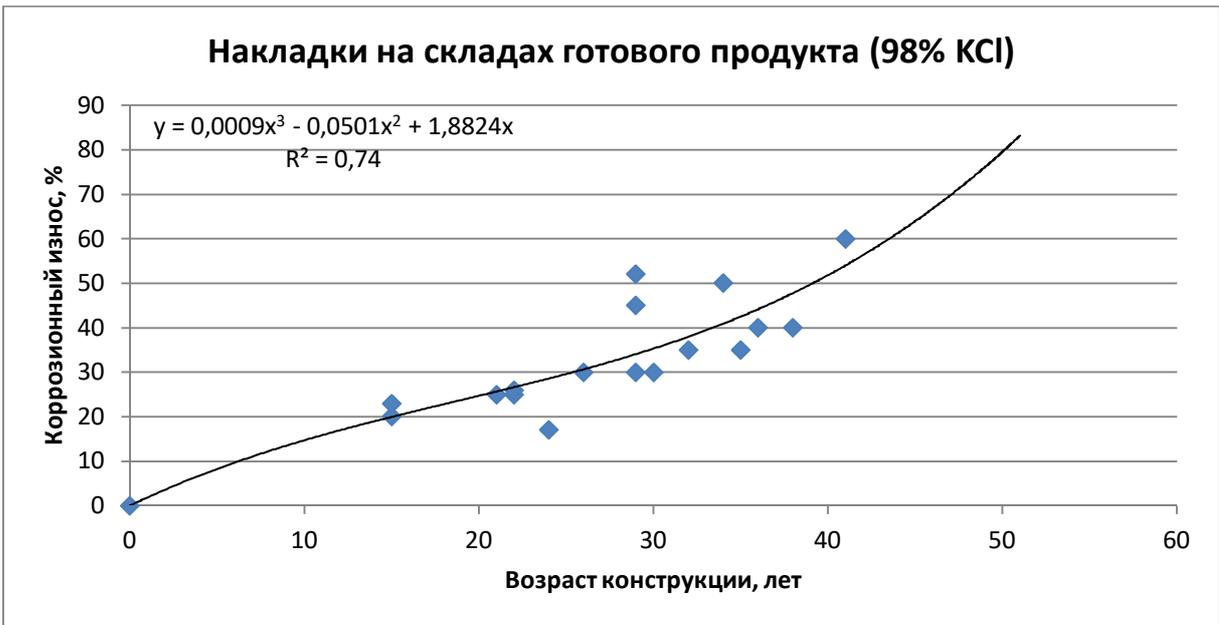


Рисунок 2.14 – Зависимость коррозионного износа от возраста накладок на складах готового продукта

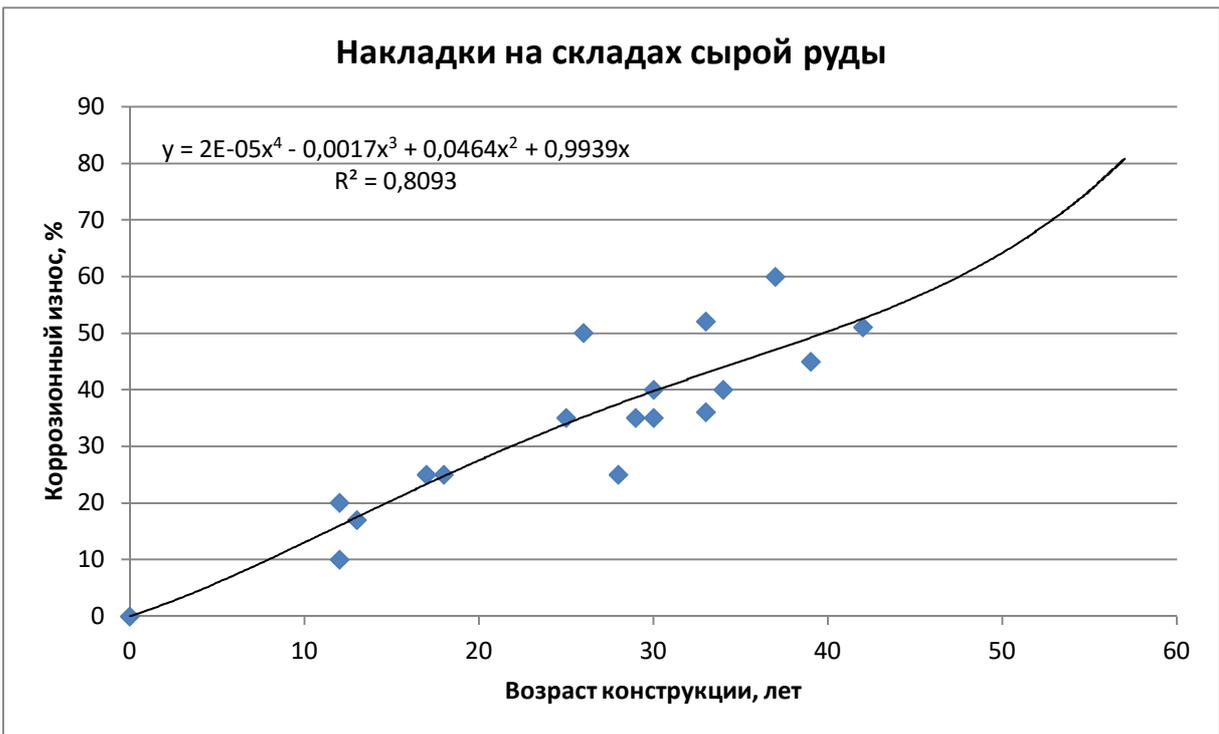


Рисунок 2.15 – Зависимость коррозионного износа от возраста накладок на складах сырой руды

## **2.4. Влияние солевого содержания и влажности на прочность композитов на углеродных, базальтовых и стекловолокнах**

Впервые интерес к исследованию проблемы влияния агрессивных соляных и щелочных сред на прочностные свойства непрерывных технических волокон возник с внедрением фибробетонов, а также неметаллической арматуры [68]. Как известно, при эксплуатации в агрессивных средах бетонных изделий, происходит коррозия стальной арматуры, что приводит к уменьшению сроков надежной эксплуатации конструкций. Этим объясняется интерес к замене стальных стержней композитными, отличающимися более высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками.

В практике применения стальных соединительных деталей, стержневых и накладных элементов при стыковке и опирании клееных деревянных конструкций отмечена идентичная проблема повышенного коррозионного износа. Интерес к замене стали композитами при возведении конструкций из древесины аналогичен армированию конструкций из железобетона и фибробетона.

Препятствием для внедрения композитных деталей вместо изделий из стали является малоизученность коррозионной стойкости волокон при их использовании в соляной и других агрессивных средах. По результатам исследовательских работ [68, 69] выполнен сравнительный анализ изменения прочностных характеристик углеродных, базальтовых и стеклянных волокон после воздействия соляных растворов хлорида калия KCl. В качестве испытуемого материала использовались ровинги (плети) из 4000 непрерывных волокон.

На сегодняшний день испытания на прочность отдельных волокон связаны с определенными трудностями, поскольку диаметры волокон малы (от 7 до 20 мкм) – для получения диаграмм растяжения требуются специальные разрывные установки [70].

Дополнительно к этому, толщины (диаметры) отдельных волокон, составляющих ровинг, имеют некоторый неконтролируемый разброс, затрудняющий вычисление предельных значений разрывных нагрузок для отдельного волокна.

При испытании непосредственно ровинга на прочность диаграмма «нагрузка ( $p$ ) – деформация ( $\varepsilon$ )» имеет пологую ниспадающую ветвь и площадку пластичности, соответствующую пластическим материалам, однако не характерную упругим испытываемым композитам [108, 109]. Во избежание отмеченных выше недостатков А. Г. Демешкиным и А. А. Швабом (Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Россия, Новосибирск) была разработана методика изготовления образцов из ровинга, позволяющая приблизить свойства образцов к свойствам отдельных нитей.

Суть методики состоит в разбивании исследования образцов на два этапа: на первом этапе выполнялись испытания нескольких нитей на прочность в статической постановке. К небольшому количеству нитей подвешивались грузы с последующим догрузением и отмечался момент разрыва. По результатам таких испытаний отмечалась средняя прочность нити, и после серии экспериментов проводились испытания, когда количество нитей было минимальным. Результатом такой методики вычислена несущая способность одной нити. Чем меньше количество нитей, тем выше итоговая прочность одной нити. Это объясняется эффектом разной нагруженности нитей в процессе загрузки образца. Отмечено, что при количестве нитей более двухсот, разброс результатов становится максимальным. В связи с этим была поставлена цель испытания целого пучка (жгута) вторым этапом исследования и сравнения результатов с прочностью одной нити.

Такая методика позволила прочностные характеристики образцов из жгута (ровинга) приблизить к свойствам нити и, соответственно, избавиться от площадки пластичности на кривых растяжения «нагрузка – деформация».

Программа испытания композитов состояла в следующем. Для оценки влияния среды использовался раствор хлористого калия с концентрацией один моль при температуре 40 градусов Цельсия. Испытуемые материалы помещались в сосуд с раствором. После этого авторы исследования извлекали образцы из углепластика, стеклопластика и базальта через 7, 14 и 21 сутки и испытывали их на разрывной машине Zwick/Roell 8506 со скоростью нагружения  $10^{-3}$  сек<sup>-1</sup>, снимая диаграмму «нагрузка – перемещение». На рисунках ниже показаны диаграммы для каждого из материалов с различным временем выдержки в агрессивной среде. Также приведены фотоснимки с электронного сканирующего микроскопа LEO 412.

На рисунке 2.16 приведены диаграммы «нагрузка – перемещение» для базальта. Кривые 1 и 2 соответствуют начальному состоянию; кривые 3, 4, 5 – состоянию через 7, 14 и 21 суток. Из графиков следует, что прочность образцов из базальта уменьшается с течением времени и по истечении 21 суток фактически материал теряет способность к восприятию нагрузки.

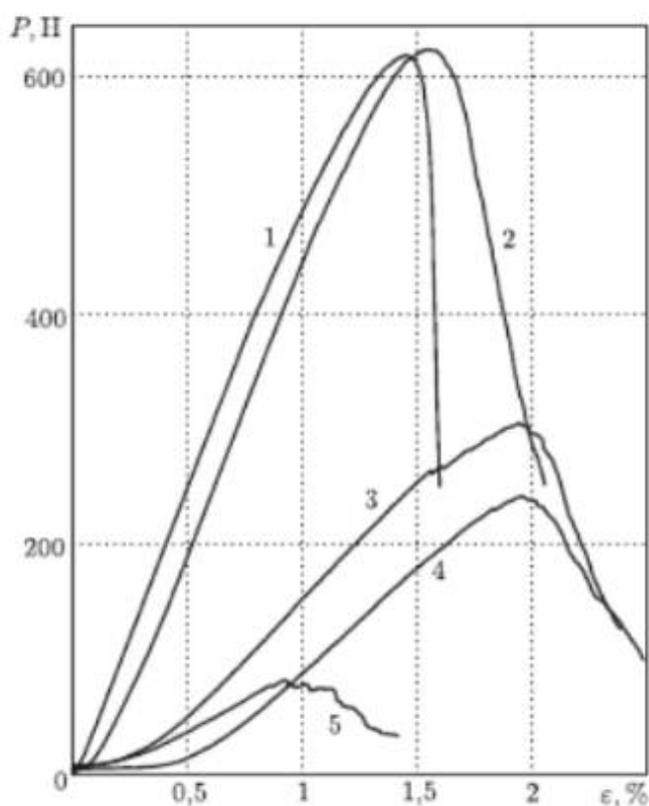


Рисунок 2.16 – Диаграмма растяжения для образцов из базальта

По фото (рисунок 2.17 (а) для начального состояния, 2.17 (б) – через 21 день в агрессивной среде) видно, что разрушение волокон происходит по наружной поверхности.

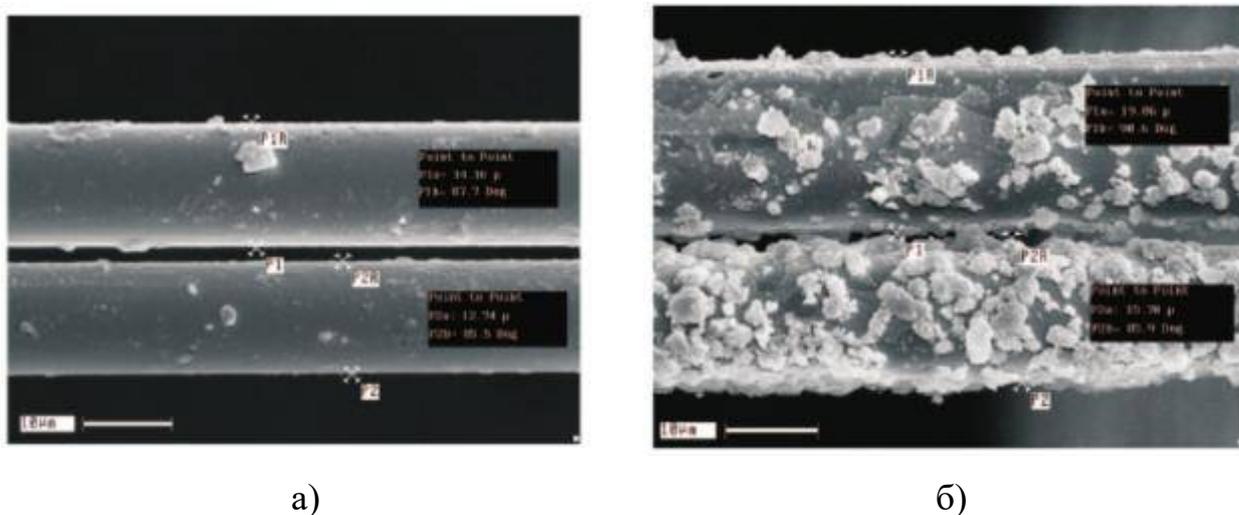


Рисунок 2.17 – Общий вид базальтового волокна до (а) и после 21 суток (б) в агрессивной среде

На рисунке 2.18 приведены диаграммы «нагрузка – перемещение» стекловолокна. Аналогично базальтовому волокну, графики 1 и 2 соответствуют начальному состоянию; 3, 4, 5 – состоянию через 7, 14 и 21 суток.

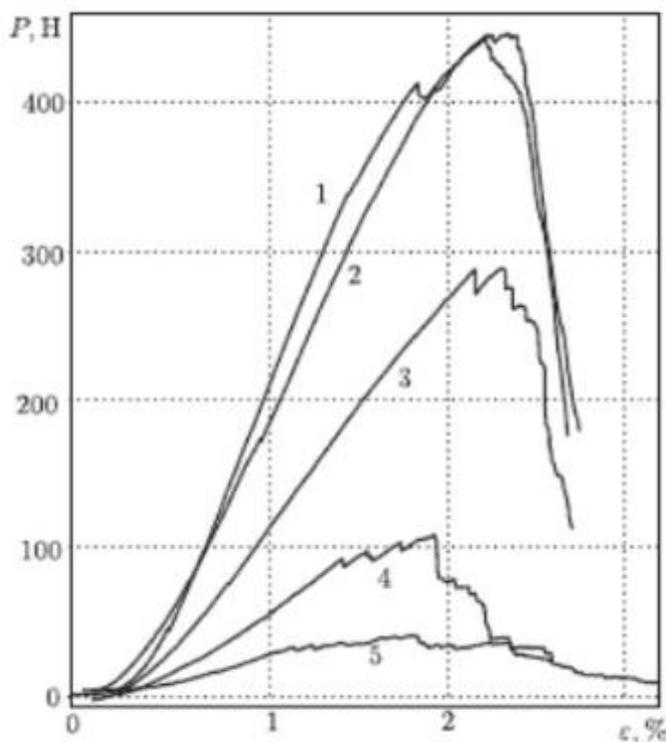


Рисунок 2.18 – Диаграмма растяжения для образцов из стекловолокна

По сравнению с базальтом качественной разницы между результатами испытаний не отмечено: через 21 суток материал полностью исчерпывает несущую способность.

По фото (рисунок 2.19) установлено, что разрушение также происходит по внешней поверхности волокна. Первоначально диаметр составлял 14 мкм, после 21 суток – от 5 до 7 мкм.

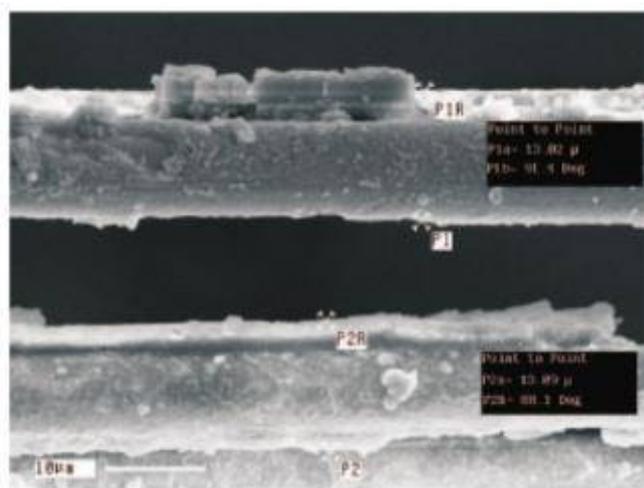


Рисунок 2.19 – Общий вид стекловолокна после 21 суток

Для углепластика результаты испытаний приведены на рисунке 2.20. Графики 1 и 2 получены для карбона в начальном состоянии, графики 3, 4, 5 – соответственно через 7, 14 и 21 суток.

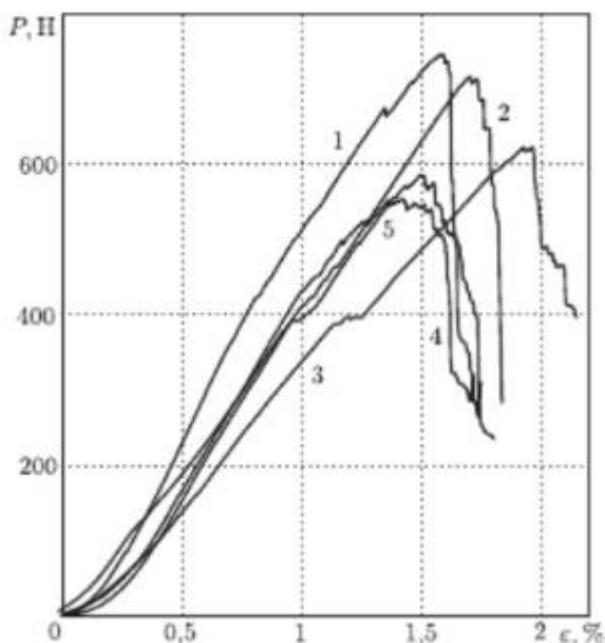


Рисунок 2.20 – Диаграмма растяжения для образцов из углеволокна (карбона)

Из графика видно, что изменение прочностных характеристик угольного волокна составляет порядка 18...22 %. Падение прочности в дальнейшем практически не происходит, выдержка в растворе не влияла на прочность образцов. Это отмечено диаграммами для 14 и 21 суток. Сечение волокна приведено на рисунке 2.21.

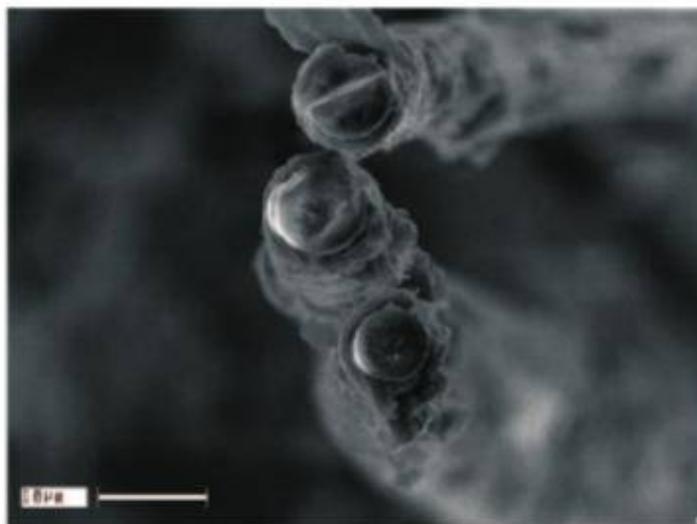


Рисунок 2.21 – Сечение углепластика после 21 суток

В выводах авторы исследований приводят следующие факты. Разрушение волокнистых композитных материалов, таких как базальт, стеклопластик и углепластик происходит по внешней поверхности волокон. Стеклопластик и базальт после выдерживания в концентрированном растворе хлористого калия имели одинаковые количественные показатели потери прочности. Для карбона процесс разрушения прекратился после 14 суток, показатели прочности изменились на 18...22 % от первоначальных.

В источниках также отмечено, что разрушение отдельных волокон в концентрированном растворе происходит намного более интенсивно, чем в реальных конструкциях. Это связано как с величиной степени агрессии, так и с тем фактом, что в реальных конструкциях применяют не отдельные волокна, а изделия, представляющие собой связки жгутов, покрытых химически нейтральной эпоксидной смолой. Эти факторы указывают на то, что влияние агрессивной среды на такие относительно массивные детали будет практически незаметным.

## 2.5. Выводы по главе

Опыт применения деревянных конструкций в зданиях и сооружениях с агрессивной внутренней средой показывает несомненные преимущества древесины по сравнению с металлом, железобетоном и кирпичом. Эксплуатационная надежность древесины в такой среде значительно выше указанных материалов. При качественном изготовлении, монтаже и грамотной технической эксплуатации деревянные конструкции находятся в удовлетворительном состоянии более сорока лет.

Экспериментальные исследования влияния эксплуатационных факторов на длительную прочность древесины показали:

- максимальное насыщение древесины солью происходит в поверхностном слое толщиной 2...3 мм. На глубине 10...15 мм содержание соли снижается до 5...7%. Снижение прочностных показателей древесины, пропитанной солью, не превышает 20-25%. Отмечается снижение пластических деформаций, разрушение образцов носит хрупкий характер;

- распределение влажности по поперечному сечению конструкций имеет неравномерный характер. Глубина увлажненной зоны не превышает 1/3 высоты элемента из цельной древесины. При влажности, равной пределу гигроскопичности  $W=30\%$ , снижение прочности может достигать 40...45%. С увеличением влажности более 30% снижения прочности не происходит. У клееных конструкций наибольшему увлажнению подвергается наружный слой и торцы;

- внутренняя среда и вид летучих химически активных веществ существенным образом влияет на процессы коррозии металлических деталей и элементов конструкций, но не вызывает изменений в скорости снижения прочностных характеристик древесины;

- временной фактор в большей мере оказывает влияние на конструкции из цельной древесины и в меньшей мере – на клееные деревянные конструкции.

Установлено, что снижение прочностных характеристик древесины от совокупного воздействия эксплуатационных факторов (солесодержание, влажность, длительность эксплуатации) происходит в первые 10...15 лет эксплуатации.

Исследования перспективных строительных материалов, способных заменить либо в значительной степени снизить количество металлических деталей позволят продлить срок службы объектов, расположенных в зоне негативного влияния агрессивной среды. Одним из возможных направлений развития мысли видится применение композитных материалов, стойких к химической агрессии, и в то же время обладающих сравнимыми по совокупности свойств со сталью.

По данным исследований установлено, что влияние среды на свойства конструкций из химических волокон, таких как базальт, стекло и карбон, различно. Разрушение таких волокон под действием среды происходит по внешней поверхности волокон. Стекланные и базальтовые волокна более подвержены влиянию соляной среды, процесс их разрушения не прекращается во времени вплоть до полного разрушения волокон.

Углеродные волокна (карбоны) менее подвержены влиянию агрессивной среды, процесс потери прочности является затухающим, и по результатам испытаний прекращается через 14 суток. Показатели прочности для отдельного волокна снижаются на величину от 18 до 22 %. В то же время влияние агрессивной среды на массивные (макро-) элементы, выполненные из связок (жгутов) углеродных волокон на полимерной матрице не значительно, однако точных количественных оценок в литературе не приводится.

Исходя из практики применения углеродных лент в качестве внешнего армирования конструктивных элементов объектов, используемых на предприятиях с сильной солевой агрессией, можно сделать заключение, подтверждающее выводы авторов исследований об отсутствии видимых разрушений углеродных композитов, связанных с химической агрессией.

### **ГЛАВА 3. Теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрических нагелей из углеродного композита при действии поперечных сил**

#### **3.1. Методика расчета нагельных соединений деревянных конструкций**

Основные положения о расчете и проектировании узлов соединения деревянных конструкций с использованием стальных, деревянных и стеклопластиковых нагелей разработаны в России инженерами Г. Г. Карлсенем, И. П. Кулибиным, В. Г. Шуховым, В. Ф. Ивановым, П. А. Дмитриевым, Ю. В. Слицкоуховым, В. М. Коченовым; в Германии – Гестеши, Графом, Шнидтманом и другими.

До 1970-х годов XX века в связи с малой изученностью физических свойств древесины как упруговязкого материала, особенностей работы нагельных соединений в течение времени, разработанная теория расчета не учитывала влияние времени и скорости приложения нагрузки на деформативность и прочность стыков.

Исследователи (С. А. Андреев [72], В. Н. Маслов [73], В. Ф. Иванов [74], Б. Л. Николаи [75], А. В. Лентяшин [76], В. Г. Донченко [77], Ю. В. Слицкоухов [78]) как правило, принимали нагель как балку на упругом основании.

Профессор МВТУ им. Баумана Г. Г. Карлсен первым предложил методику расчета нагельных соединений по допускаемым напряжениям, фактически являющимся приближенным методом расчета по разрушающей нагрузке.

В 1953 году В. М. Коченов [79] предложил методику расчета нагельных соединений с учетом упругопластичной работы древесины в гнезде нагеля на смятие и пластической работы нагелей на изгиб.

В. М. Коченов, кроме того, вывел эмпирические зависимости и формулы для расчета нагельных соединений, которые вошли в первые редакции, а также и сегодня действующий СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 [6].

В настоящее время расчет нагельных соединений в соответствии с общей теорией предельных состояний выполняется по первой группе предельных состояний (несущая способность) на прочность и по второй группе предельных состояний (по деформациям).

Достижение первого предельного состояния (по несущей способности) происходит в момент, при котором физическая несущая способность стыка по смятию гнезда нагеля полностью исчерпывается. В связи с этим соединение теряет способность к сопротивлению внешним силам. Полное использование изгибной несущей способности нагеля достигается при образовании пластических шарниров по длине нагеля.

Дефицит несущей способности по условию смятия нагельного гнезда [80-85] принимается в момент, при котором напряжения смятия достигают предельных величин  $R_{см}^{вр}$  и  $R_{см}^{дл}$ . При действии временных нагрузок за критическую величину напряжения смятия принимается временное сопротивление  $R_{см}^{вр}$ , а при длительном воздействии – длительное сопротивление смятию  $R_{см}^{дл}$  соответственно.

Кроме того, достижение соединением предельных состояний возможно в случае достижения напряжений скалывания при изгибе нагеля предельных величин  $R_{ск}^{вр}$  и  $R_{ск}^{дл}$  аналогично условию смятия. До момента возникновения пластического шарнира ось нагеля между такими шарнирами принято принимать за прямую линию. Схема расстановки нагелей (т.е. расстояния между ними и до торцов соединяемых элементов) является нормируемой величиной и должна исключать возможность разрушения соединяемых элементов от скалывания древесины. Следует отметить, что принятые допущения о распределении напряжений смятия по длине нагелей, являются условными.

Аналогично описанным выше ситуациям с разрушением древесины нагельного гнезда, ситуация справедлива для варианта разрушения стыка, связанного с изгибом либо разрушением нагеля [86-90].

В случае образования пластических шарниров в нагелях при предельной величине изгибающего момента, происходит быстрое развитие пластических деформаций, связанных со смятием на участке гнезда по плоскостям сплачивания соединяемых элементов и шарниром пластичности.

Несущая способность узлов соединения увеличивается пропорционально увеличению поперечных сечений соединяемых элементов до тех пор, пока в соединениях участвует лишь ограниченная часть длины нагеля. Поэтому увеличение несущей способности стыка происходит не равномерно. Приведенные допущения одинаково справедливы при действии длительных и кратковременных нагрузок.

При кратковременных и длительных нагружениях нагельного гнезда характер картины разрушения проявляется одинаково. Эпюры напряжений нагельных соединений, и соответствующие им схемы деформирования двусрезных нагельных соединений приведены на рисунке 3.1

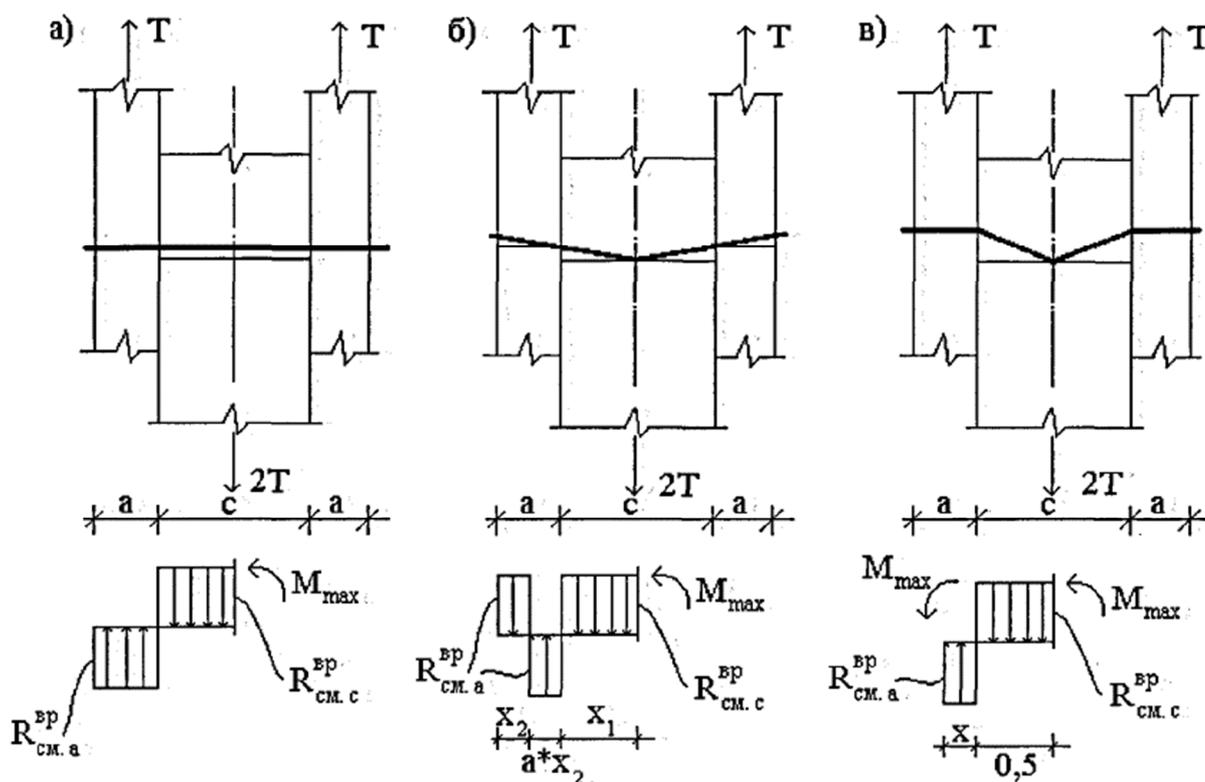


Рисунок 3.1 – Эпюры напряжений нагельных соединений и соответствующие схемы деформирования

Вторая группа предельных состояний (при расчете по деформациям) достигается в момент, при котором взаимные сдвиговые деформации элементов стыка достигают предельных значений. Предельные значения устанавливаются условиями нормальной эксплуатации узлов и соединяемых конструктивных элементов в целом.

Методика расчета по второй группе предельных состояний включает в себя следующие допущения. Работа нагельного стыка условно разделена на две области. В первой, при действии нагрузок  $P$ , меньших по величине чем длительная несущая способность соединения  $P_{дл}$ , деформации носят затухающий характер, приближаясь к определенному конечному значению. В этот момент работа стыка принимается в виде линейной зависимости деформаций смятия древесины внутри нагельного гнезда и скорости их развития в зависимости от напряжений. При действии нагрузки  $P$ , превышающей значение  $P_{дл}$  наступает разрушение соединения, связанное с неконтролируемым развитием деформаций во времени. То есть при этом условии соединение не обладает длительной способностью к восприятию нагрузки.

Теорию в существовании двух областей деформирования деревянных конструкций впервые разработал академик Ф. П. Белянкин [90, 91], им установлены величины длительного сопротивления для древесины. Кроме того, он предложил принимать длительное  $R_{дл}$  сопротивление в качестве величины, разграничивающей работу деревянных конструкций между описанными выше областями.

Предполагается, что при работе в рамках эксплуатационных нагрузок, соединения деревянных конструкций работают в первой области, при которой  $P < P_{дл}$ .

Допущения, принятые в методике расчета по деформациям, не противоречат экспериментальным данным.

Расчетная несущая способность соединения определяется с учетом так называемых пороков древесины, зависящих от качества пиломатериала,

изменчивости нагрузок и материала нагеля. Несущая способность описывается формулой 3.1.

$$N = n_{\text{ср}} n T_{\text{min}} , \quad (3.1)$$

где  $n_{\text{ср}}$  – число срезов по плоскостям сплачивания соединяемых элементов;

$n$  – количество нагелей;

$T_{\text{min}}$  – минимальная несущая способность, определяемая из смятия соединяемых элементов и несущей способности нагеля для одного шва сплачивания с учетом расположения нагелей (без раскалывания и скалывания древесины).

Несущая способность нагеля для одного шва сплачивания соответственно для случаев смятия в крайних элементах, средних элементах, а также на обеспечение несущей способности изгиба нагеля для симметричного двухсрезного соединения определяется формулами 3.2...3.4.

$$T_a = 0,8 a d_n k_a k_d; \quad (3.2)$$

$$T_c = 0,5 c d_n k_a k_d; \quad (3.3)$$

$$T_n = 1,8 d_n^2 (k_a k_n)^{1/2}, \quad (3.4)$$

где  $k_a$  – коэффициент, определяемый в зависимости от угла направления волокон древесины и оси нагеля;

$k_d$  – коэффициент условий работы древесины;

$k_n$  – коэффициент условий работы нагеля, зависящий от материала нагеля.

### 3.2. Оборудование и материалы, используемые при экспериментальной оценке несущей способности углепластиковых нагелей

Для проведения испытаний в качестве материала нагелей были использованы композитные полимерные арматурные углеродные стержни MONSTEROD АСК-6 диаметром 5 мм производства ООО «Нанотехнологический центр композитов» (ООО «НЦК»), г. Москва. В качестве контрольных образцов были использованы стальные нагели аналогичного диаметра.

Характеристики партии использованных углеродных стержней приведены в таблице 3.1. Дата производства образцов 01.10.2015 г.

Таблица 3.1 – Характеристики партии примененных углеродных стержней, предоставленные ООО «НЦК»

<b>Наименование ингредиента:</b>	<b>Дозировка, %</b>	<b>Масса, гр.</b>
Общий вес изготовленной смеси	–	3600
Смола эпоксидная	–	2000
Ускоритель «Алкофен»	2,7	55
Добавка «Метоксилан»	2,5	50
<b>Информация по волокну:</b>	<b>Кол-во, шт.</b>	<b>Текс, Те</b>
Количество нитей в волокне	40	–
Плотность:	–	1200
<b>Пултрузионный режим:</b>	<b>Частота, Гц (1 Гц=10 см)</b>	<b>–</b>
Скорость протяжки	33 → 42	–
Усилие протяжки	42 → 33	–
<b>Произведено продукции:</b>	–	–
5 шт. х 6 м	–	–

Углеродные стержни были испытаны на растяжение до разрыва по ГОСТ 31938-2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций».

Для испытания стержней на разрыв использовано следующее оборудование: машина испытательная Instron 5582; преобразователь перемещения Instron 2630-105; весы лабораторные Ohaus Explorer EX-623. Скорость движения траверсы при испытаниях принята 5 мм/мин.

Результаты физико-механических испытаний углеродных полимерных стержней приведены на рисунке 3.2 и таблице 3.2.

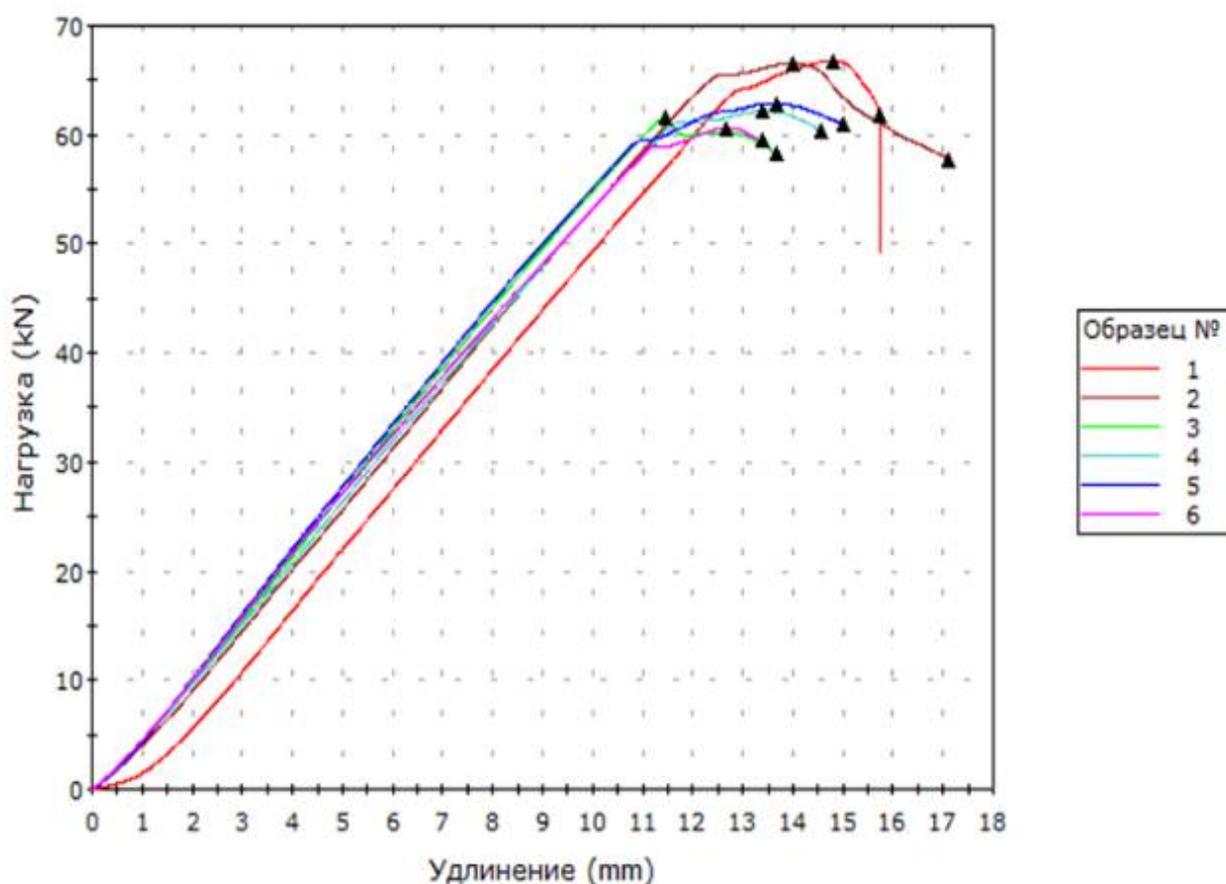


Рисунок 3.2 – Диаграмма растяжения для углеродных стержней

При испытаниях выполнялся контроль внешнего вида углеродных стержней. Перед испытаниями проводился внешний осмотр. Образцы должны были иметь ровную поверхность, без сколов, трещин, расслоений и других дефектов, характерных углеродным композитам. Образцы, размеры которых превышали допустимые отклонения, отбраковывались.

Для всех партий испытанных образцов отмечено, что сколы, расслоения, раковины и задиры стержней отсутствовали как до начала, так и после разрыва образцов.

Таблица 3.2 – Результаты испытаний стержней на растяжение до разрыва

№ образца	Диаметр $d$ , мм	Площадь $S$ , мм <sup>2</sup>	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Максимум нагрузки $P$ , кН	Модуль Юнга $E_f$ , ГПа
1	6,15	29,71	2248,72	66,80	110,11
2	6,15	29,71	2239,37	66,52	108,37
3	6,15	29,71	2073,55	61,60	121,82
4	6,15	29,71	2091,72	62,14	115,18
5	6,15	29,71	2117,53	62,90	113,88
6	6,15	29,71	2042,01	60,66	119,31
Среднее	6,15	29,71	2135,48	63,44	114,78
Мин.	6,15	29,71	2042,01	60,66	108,37
Макс.	6,15	29,71	2248,72	66,80	121,82

Деревянные элементы принимались таких размеров, которые при размещении стержней диаметром 5 мм соответствовали условиям расположения нагелей СП [6]. Для проведения эксперимента толщины крайних и средних элементов приняты одинаковыми. Схема симметричного двухсрезного нагельного соединения приведена на рисунке 3.3.

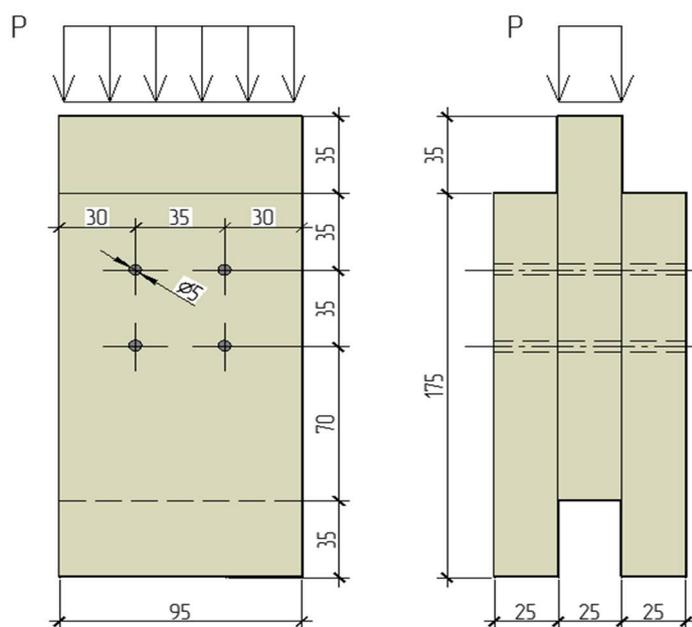


Рисунок 3.3 – Расчетная схема образцов

Оценка поведения нагельного соединения выполнялась для двух наиболее характерных случаев разрушения образцов: по материалу соединяемых элементов (по смятию либо раскалыванию древесины) либо по материалу нагеля.

Соответственно были изготовлены группы образцов с толщинами соединяемых досок равными 25 и 50 мм. В первом случае предполагается разрушение соединения, связанное с исчерпанием несущей способности древесины, во втором – связанное с исчерпанием несущей способности стального либо углепластикового нагеля.

Схемы образцов с различной толщиной соединяемых элементов приведены на рисунке 3.4.

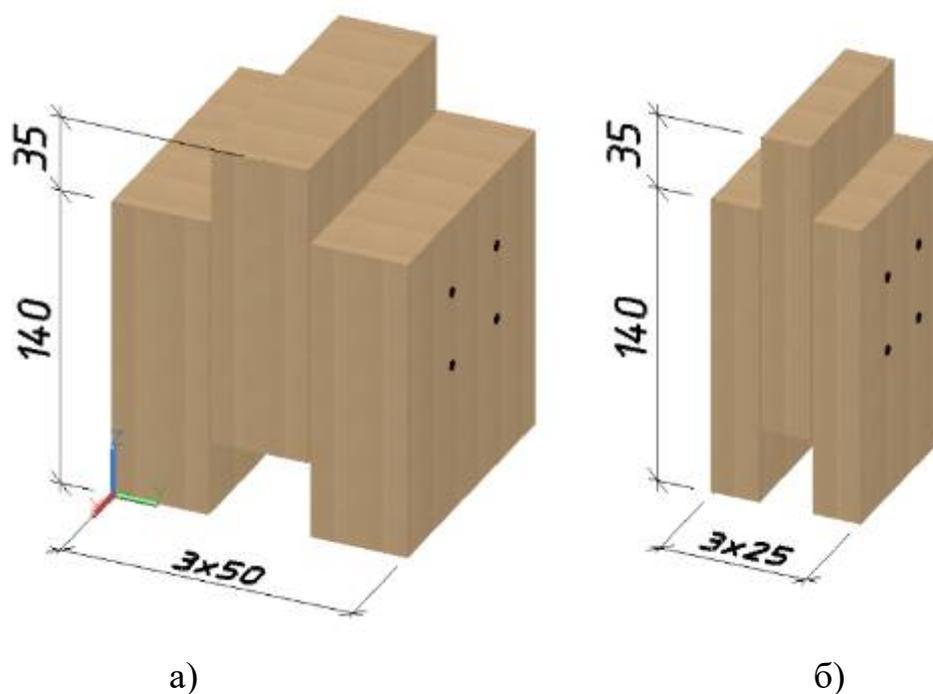


Рисунок 3.4 – Схема образцов: а) с толщиной доски 50 мм;

б) с толщиной доски 25 мм

Последовательность изготовления испытуемых образцов соединений:

- нарезка необходимой ширины и толщины досок после острожки;
- торцевание элементов и обрезка до требуемой высоты;
- разметка образцов для сверления отверстий для посадки нагелей, высверливание выполнялось перьевым сверлом по древесине, диаметр отверстий принят равным диаметру применяемых нагелей;

– забивка нагелей в посадочные отверстия с контролем обеспечения плотной посадки, без вклеивания и запрессовки для предотвращения образования локальных участков со смятием древесины;

– во избежание образования пятен контакта между средними и крайними элементами оставлены зазоры от 1 до 2 мм;

– для группы испытываемых образцов на гидравлическом прессе ПГМ-500 на образцы установлены измерители часового типа ИЧ-10 производства Челябинского Инструментального Завода с ценой деления 0,01 мм в зоне соединения (датчики установлены таким образом, чтобы измеряемый диапазон перемещений входил в диапазон измерений датчика).

Общие виды испытываемых образцов на момент сборки приведены на рисунке 3.5.

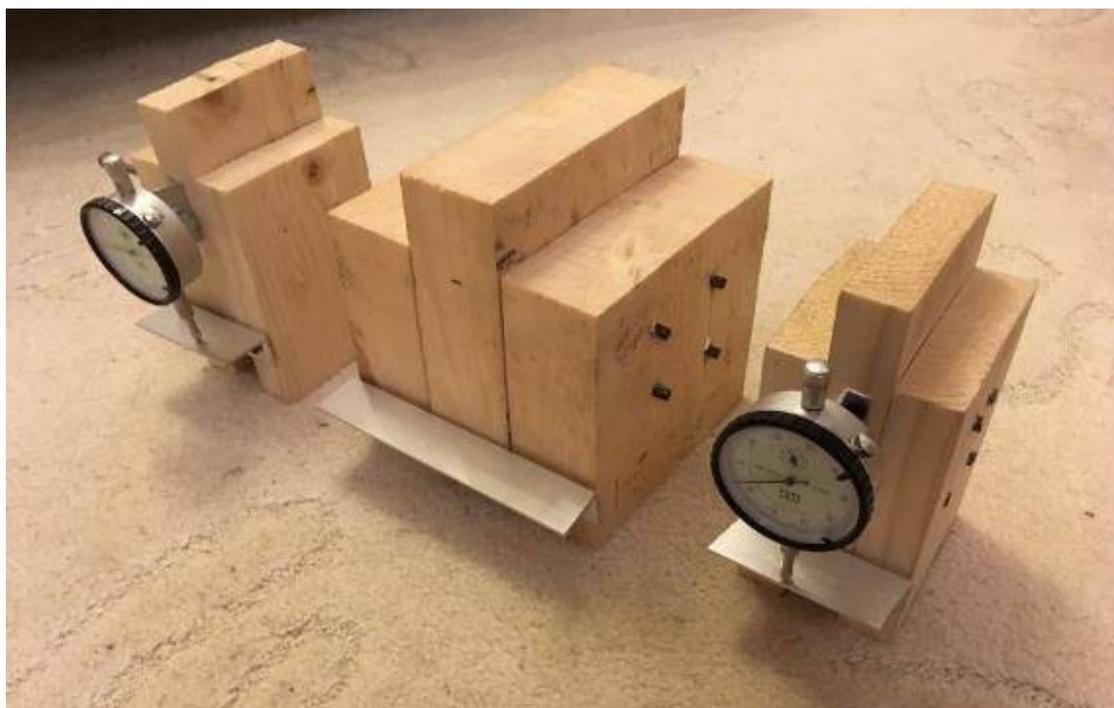


Рисунок 3.5 – Общие виды испытываемых образцов на момент сборки

Влажность испытываемых образцов определялась влагомером МГ-4 и составила 9,2 %. Температурно-влажностный режим внутри помещения определен термогигрометром МГ4-В: температура внутри помещения 21,3°C, влажность 15,7 %.

### 3.3. Расчет нагельного соединения по методике СП «Деревянные конструкции»

Расчетная несущая способность соединения определяется по методике, приведенной в СП «Деревянные конструкции» [6] в соответствии с 3.6:

$$T = T_{min} n_n n_{ш}, \quad (3.6)$$

где  $T_{min}$  – минимальная несущая способность нагеля на один шов сплачивания (условный срез);

$n_n$  – количество нагелей в соединении;

$n_{ш}$  – число условных срезов одного нагеля.

Несущая способность стального нагеля на один шов сплачивания  $T_{min}$  определяется как наименьшая одного из трех условий [6]:

– смятия древесины бокового элемента,  $T_{см}^a = 0,8ad$ ,

– смятия древесины среднего элемента,  $T_{см}^c = 0,5cd$ ,

– из условия изгиба нагеля  $T_{изг}^{наг} = 1,8d^2 + 0,02a^2$ .

В этих формулах  $d$  – диаметр нагеля,  $a$  и  $c$  – толщины крайнего и среднего элемента соответственно. Все размеры приняты одинаковыми для стальных и углепластиковых нагелей:  $d = 5 \text{ мм}$ ,  $a = c = 25 \text{ мм}$  для толщины древесины 25 мм, и  $a = c = 50 \text{ мм}$  для толщины древесины 50 мм.

Эти формулы рекомендовано применять к стальным цилиндрическим нагелям. Для углепластиковых нагелей нормативная документация отсутствует, поэтому для них применялись те же расчетные формулы с учетом того, что временное сопротивление углепластика на порядок больше, чем у стали [3].

Определенная таким образом расчетная несущая способность нагеля для образцов с толщиной деревянных соединяемых элементов равной 25 мм, равняется  $T_{min} = 5 \text{ кН}$  из условия смятия древесины среднего элемента. Фактическая разрушающая нагрузка, как правило, превышает расчетную в 1,5...2 раза [44]. Расчетную разрушающую нагрузку принимаем  $N_u = 10,0 \text{ кН}$ .

Расчетная несущая способность нагеля для образцов с толщиной деревянных соединяемых элементов равной 50 мм равняется  $T_{min} = 10 \text{ кН}$  из

условия смятия древесины среднего элемента. Расчетную разрушающую нагрузку соответственно принимаем  $N_u = 20 \text{ кН}$ .

### **3.4. Экспериментальное исследование узлового соединения**

#### **3.4.1. Испытание с использованием гидравлического пресса**

##### **ПГМ-500МГ**

Испытания проводились на прессе гидравлическом малогабаритном ПГМ-500МГ производства ООО «СКБ Стройприбор» (Россия) пошагово возрастающей нагрузкой до полного разрушения образца. Отличительной особенностью испытаний с применением пресса ПГМ-500МГ является ступенчатое пошаговое приложение нагрузки с площадкой релаксации древесины.

Такой способ испытаний позволяет избежать влияния обмятия древесины в нагельном гнезде, в отличие от испытаний с непрерывно возрастающей нагрузкой. В связи с этим результаты, полученные при ступенчатом нагружении отличаются от результатов, полученных путем приложения нагрузки через постоянно движущуюся траверсу.

Значение разрушающей нагрузки снималось с динамометра в момент, при котором наблюдался непрерывный рост перемещений нагружаемого центрального элемента нагельного соединения, а нагрузка при этом оставалась неизменной. Для фиксации величин перемещений применялись измерители часового типа ИЧ-10.

Схема образцов, используемых для проведения эксперимента нагельного соединения деревянной конструкции приведены на рисунке 3.4 (а, б). Испытуемые образцы с установленными измерительными приборами показаны на рисунке 3.6.

Сдвиговые перемещения в соединении были определены как среднее арифметическое перемещений, замеренных индикаторами  $\delta_i$  и разности перемещений  $\Delta = \delta_i - \delta(n - i)$ .



Рисунок 3.6 – Образцы в прессе ПГМ-500МГ с установленными индикаторами ИЧ-10

а) с толщиной доски 25 мм; б) с толщиной доски 50 мм

По данным, полученным в ходе испытаний для каждого материала нагелей (сталь и углепластик), построены графики зависимости сдвиговых перемещений от приложенной нагрузки (рисунки 3.7, 3.8).

Образец с толщиной досок 25 мм.

При разрушении соединения со стальными нагелями произошел изгиб нагелей и раскол среднего деревянного элемента соединения (рисунок 3.8, а).

Разрушающая нагрузка составила 11,1 кН, по достижении которой работа соединения перешла в стадию пластических деформаций, при которой наблюдалось значительное увеличение перемещений при незначительном увеличении нагрузки.

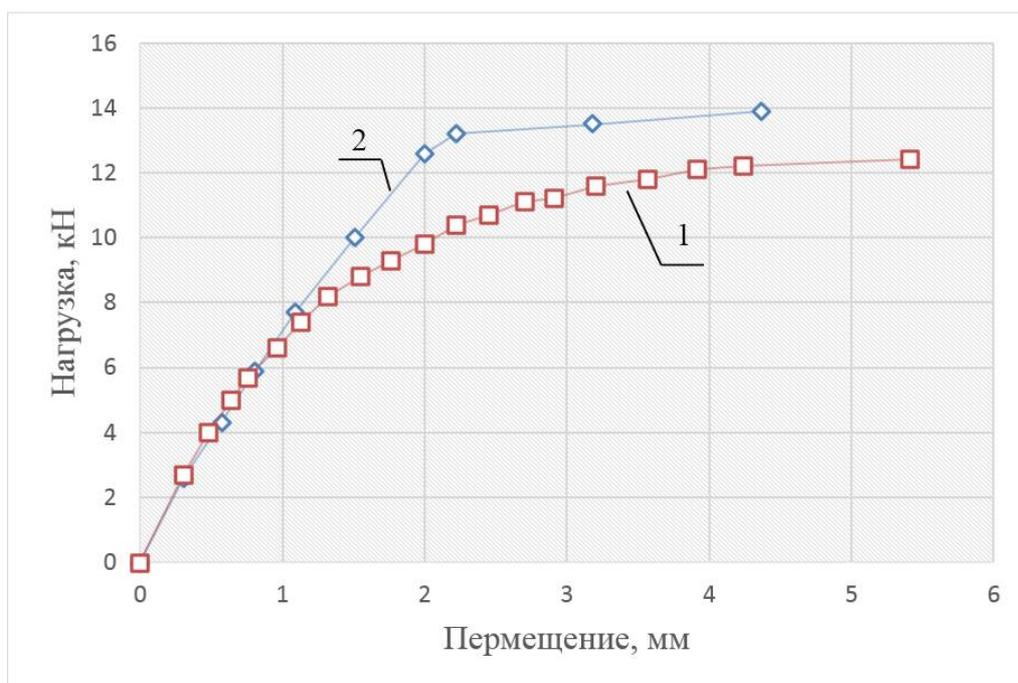


Рисунок 3.7 – Зависимости сдвиговых перемещений в соединении от нагрузки для стального (1) и углепластикового (2) нагеля по результатам испытаний образца с толщиной досок 25 мм

Разрыв (трещина со сколом по среднему элементу) зафиксирован при нагрузке в 12,7 кН.



а)

б)

Рисунок 3.8 – Характер разрушения образцов:

а) со стальными нагелями; б) с углепластиковыми нагелями по результатам испытаний образца с толщиной досок 25 мм

Для углепластиковых нагелей выявлены небольшие изгибы нагелей с незначительным растрескиванием полимерной матрицы и раскрытие образцов по плоскостям досок (рисунок 3.8, б). При этом раскалывания деревянных элементов не произошло.

Величина разрушающей нагрузки составила 12,6 кН, при достижении которой наблюдали развитие деформаций без увеличения прилагаемой нагрузки.

При нагрузке в 13,9 кН произошло разрушение образца, выраженное в смещении досок в стороны с образованием зазоров между средней и крайними досками.

Образец с толщиной досок 50 мм.

При разрушении соединения со стальными нагелями произошел изгиб нагелей и смятие древесины в местах перехода нагеля из крайних досок в среднюю (рисунок 3.10, а).

Разрушение образцов отмечено при нагрузке в 17 кН, работа соединения перешла в стадию пластических деформаций.

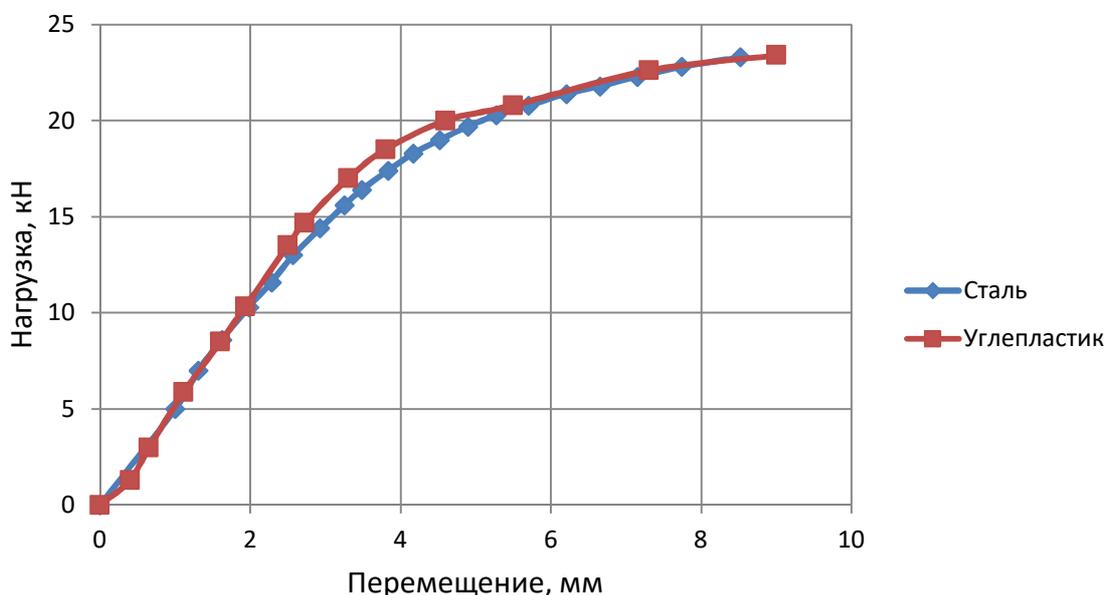


Рисунок 3.9 – Зависимости сдвиговых перемещений в соединении от нагрузки для стального и углепластикового нагеля по результатам испытаний образца с толщиной досок 50 мм

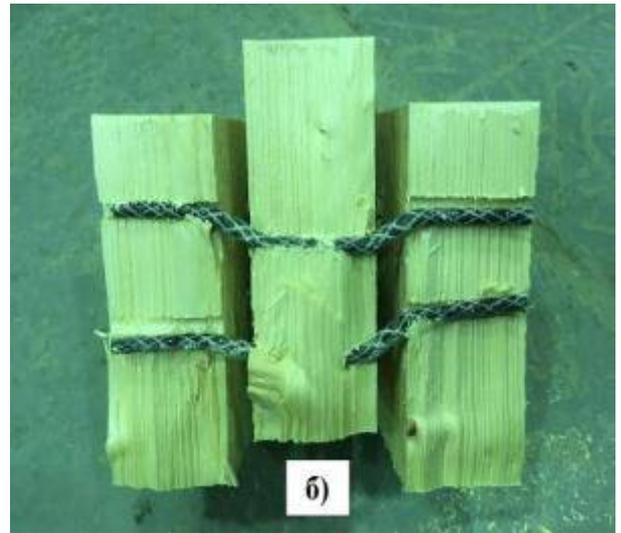
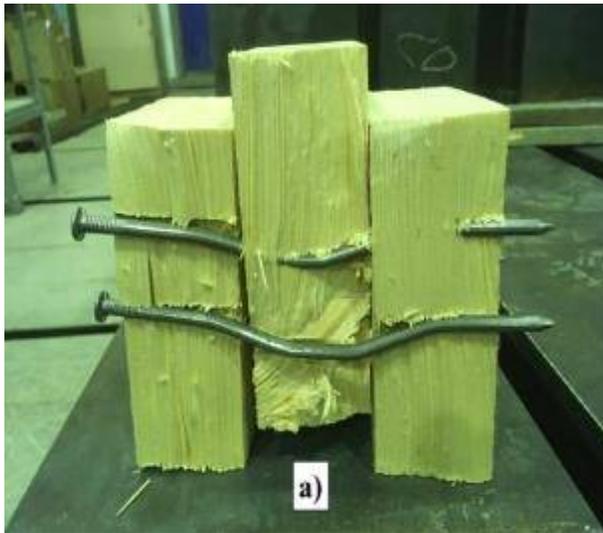


Рисунок 3.10 – Характер разрушения образцов

а) со стальными нагелями; б) с углепластиковыми нагелями

Разрушение образцов с нагелями из углепластика (рисунок 3.10, б) произошло в связи с переходом нагеля в стадию пластических деформаций. При разрушении образца углепластик переходит в стадию жесткопластических деформаций при нагрузке на образец в 18 кН.

Из рисунка 3.11 видно, что характер деформирования обоих нагелей схож, что говорит о схожем поведении нагелей из углепластика и стали в данных условиях.

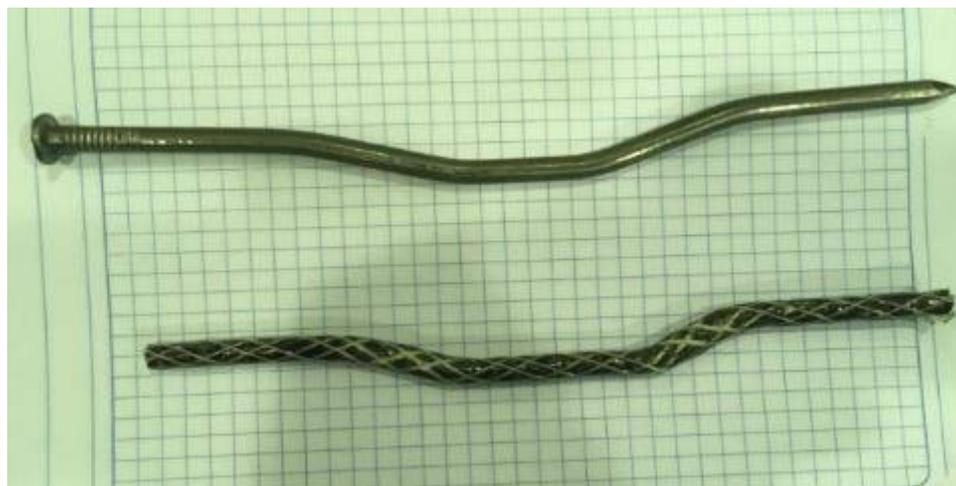


Рисунок 3.11 – Внешний вид нагелей из стали и углепластика после деформирования в образцах с толщиной досок 50 мм

### 3.4.2. Испытание с использованием универсальной испытательной машины ZWICK/Roell Z400E

Испытания проводились с использованием универсальной испытательной машины ZWICK/Roell Z400E производства Zwick Roell Group Co. (Германия).

Испытания проводились до разрушения образца постоянно возрастающей продольной силой на испытательной машине ZWICK Z400E со скоростью нагружения в 1 кН/мин. Общий вид испытуемого образца, закрепленного в испытательной машине приведен на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Образец в испытательной машине Zwick Z400E

По данным, полученным в ходе испытаний для каждого материала нагелей (сталь и углепластик), а также различных толщин соединяемых элементов построены графики зависимости сдвиговых перемещений от приложенной нагрузки (рисунок 3.13).

При загрузке образца начальное обжатие в испытательной машине принято до величины 2,5 кН.

При испытании контрольного образца со стальными нагелями равномерно возрастающей нагрузкой установлено, что стальной нагель переходит в стадию пластических деформаций при нагрузке, равной 16,0 кН.

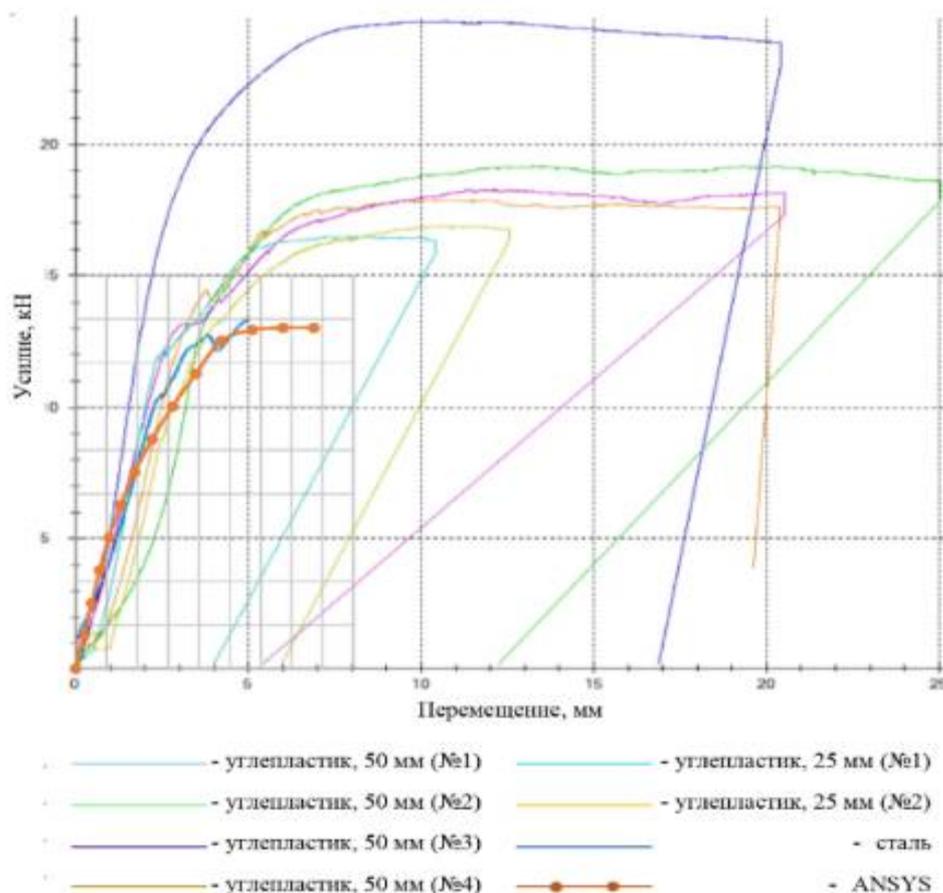


Рисунок 3.13 – Зависимости сдвиговых перемещений в соединении от нагрузки для стальных и углепластиковых нагелей по результатам испытаний

При испытании контрольного образца со стальными нагелями равномерно возрастающей нагрузкой установлено, что стальной нагель переходит в стадию пластических деформаций при нагрузке, превышающей 16,0 кН. Развитие пластических деформаций происходит в диапазоне от 17 до 23 кН, после чего происходит рост деформаций без увеличения нагрузки. При нагрузке в 18 кН и более слышен треск древесины, однако раскалывания образца не происходит. После достижения деформаций величины в 20,1 мм образец разгружается. После снятия нагрузки остаточная деформация составила 16,85 мм. Как показала практика при испытаниях образцов со стальными нагелями при скорости загрузки более 5 кН/мин происходит раскалывание древесины образца по центральному элементу.

При испытаниях образцов с углепластиковыми нагелями с толщиной древесины 50 мм установлены следующие закономерности.

Упругая работа нагеля определена в диапазоне нагрузки до 10...11 кН. После чего происходит переход нагеля из упругой в пластическую стадию работы вследствие растрескивания полимерной матрицы. При этом образец не деформируется и нагель из работы не выключается. В диапазоне нагрузок 11...16 кН нагель работает в стадии пластических деформации. По достижении нагрузки в 16 кН происходит рост деформаций без увеличения нагрузки. При достижении деформаций величины в 20 мм образец разгружается. После снятия нагрузки остаточная деформация образцов с нагелем из углепластика различна и составила от 5 до 18 мм.

При разгрузении образца видно смещение крайних элементов в стороны относительно центрального (рисунок 3.14), связанное с упругой работой нагеля.

При более быстром нагружении образца (со скоростью 5 кН/мин и более) раскалывания древесины образца не происходит.

При испытаниях образцов с углепластиковыми нагелями с толщиной древесины 25 мм установлено, что разрушение образца происходит в связи с разрушением древесины. Нагель при этом переходит в пластическую стадию работы при аналогичной нагрузке 10...11 кН, однако разница состоит в том, что растрескивания полимерной матрицы по мере увеличения нагрузки не происходит и кривая усилие-деформация (рисунок 3.13) не имеет характерных скачков.

После снятия нагрузки остаточная деформация образцов составила от 4 до 6 мм.

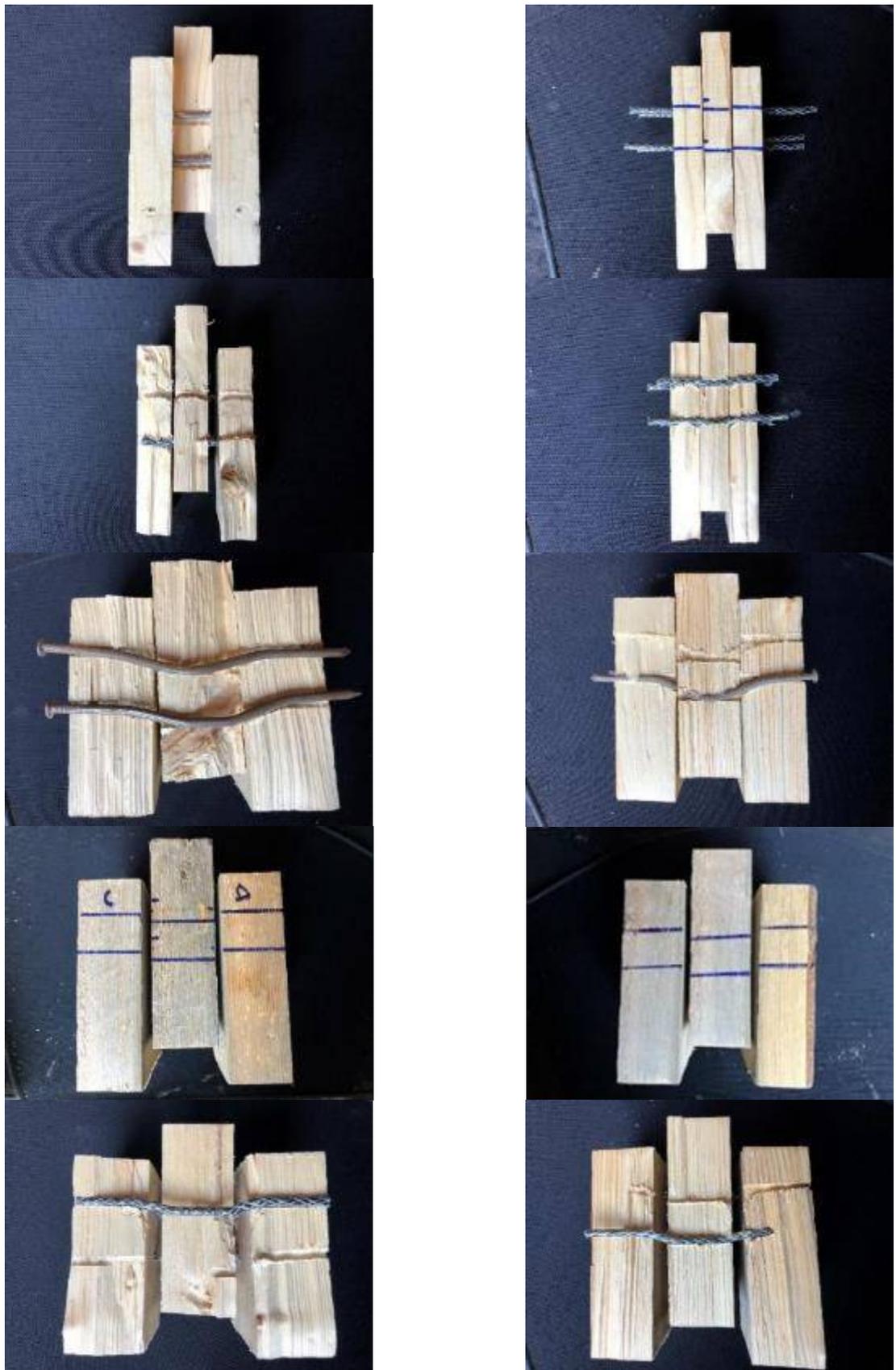


Рисунок 3.14 – Образцы для испытаний двухсрезных симметричных нагельных соединений с разными толщинами соединяемых элементов и материалом нагеля (стальные и углепластиковые стержни диаметром 5 мм)

### 3.5. Компьютерное моделирование и расчет нагельного соединения в расчетном комплексе ANSYS

Для анализа напряженно-деформированного состояния нагельного соединения и верификации полученных экспериментальных данных была создана расчетная модель образцов (древесина-сталь и древесина-углепластик) в программном комплексе ANSYS Workbench.

На рисунке 3.15 показана схема расчета в среде ANSYS со связями между компонентами: принято две геометрии расчетных схем – для толщин соединяемых элементов 25 и 50 мм (пункты А и F рисунка 3.15 соответственно). Для каждой толщины элементов были проведены расчеты несущей способности и определения напряженно-деформированного состояния соединения при применении стальных (пункты В и D) и углепластиковых (пункты С и Е) нагелей.

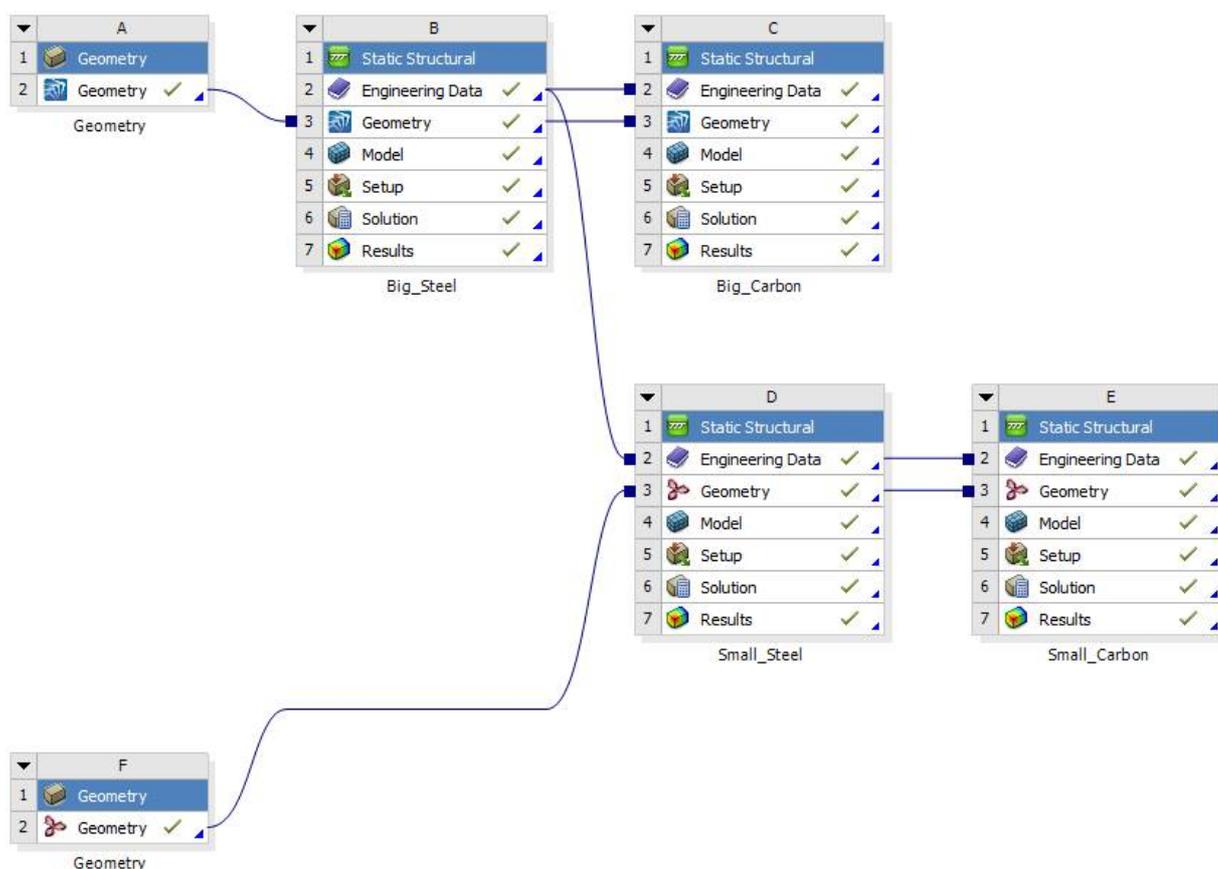


Рисунок 3.15 – Схема расчета в среде ANSYS Workbench

На рисунке 3.16 показана модель испытуемого образца с нанесенной сеткой конечных элементов.

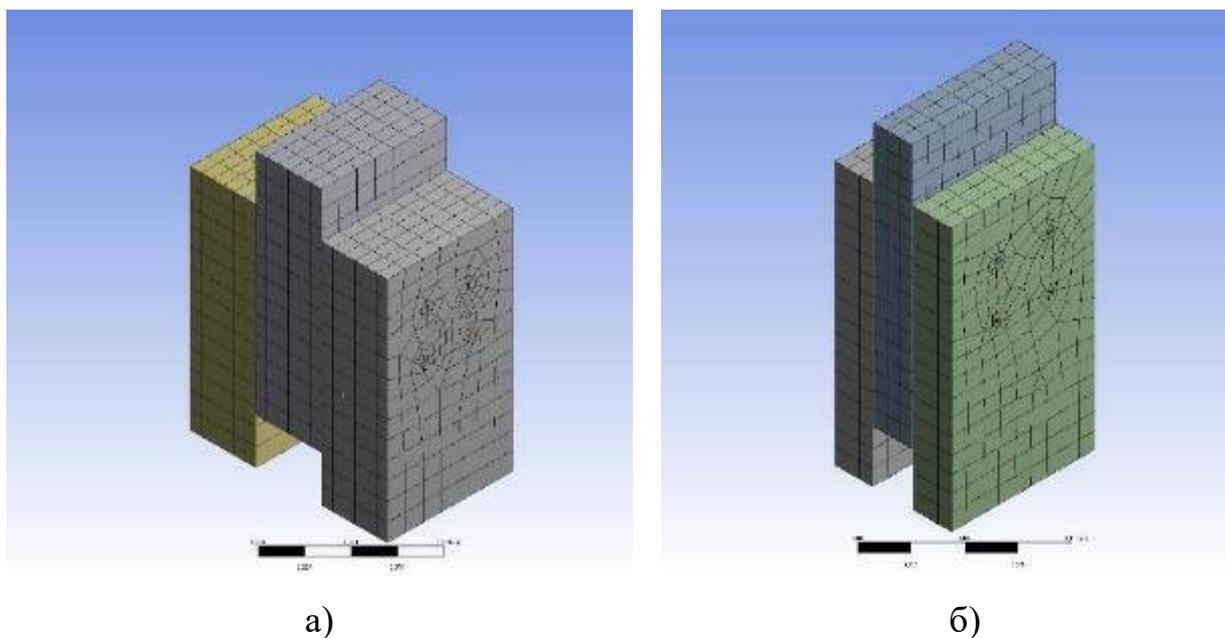


Рисунок 3.16 – Модель узла в расчетном комплексе ANSYS Workbench

Поскольку при расчете необходимо учитывать работу сил трения по плоскости соприкосновения древесина-сталь и древесина-углепластик, в модель введены специальные контактные элементы. Решалась нелинейная контактная задача типа “поверхность-поверхность”. При моделировании контактного взаимодействия использовались элементы: CONTACT173 (для поверхности древесины) и TARGET170 (для поверхности нагеля). Программа использует элементы контакта для отслеживания относительных положений двух поверхностей.

Смещение верхнего торца образца (площадка приложения нагрузки) для моделирования работы пресса выполнено с использованием уравнений совместности перемещений. Основание образца закреплено от смещений по всем направлениям.

При компьютерном моделировании, аналогично натурным испытаниям, усилие от пресса на образец передавалось пошагово (ступенями по 1 кН). Разрушающая нагрузка установлена отдельно для каждого из образцов.

По окончании расчета получены следующие результаты.

При толщине соединяемых элементов 25 мм и разрушении образца, связанном с разрушением древесины установлено следующее.

Для образца со стальными нагелями разрушающей явилась нагрузка в диапазоне 8...10 кН. Взаимное перемещение контрольных узлов деревянных элементов, расположенных в нескольких точках образца, составило 1,5 мм. Изополя распределения перемещений в древесине и нагелях приведены на рисунках 3,17 а, б соответственно.

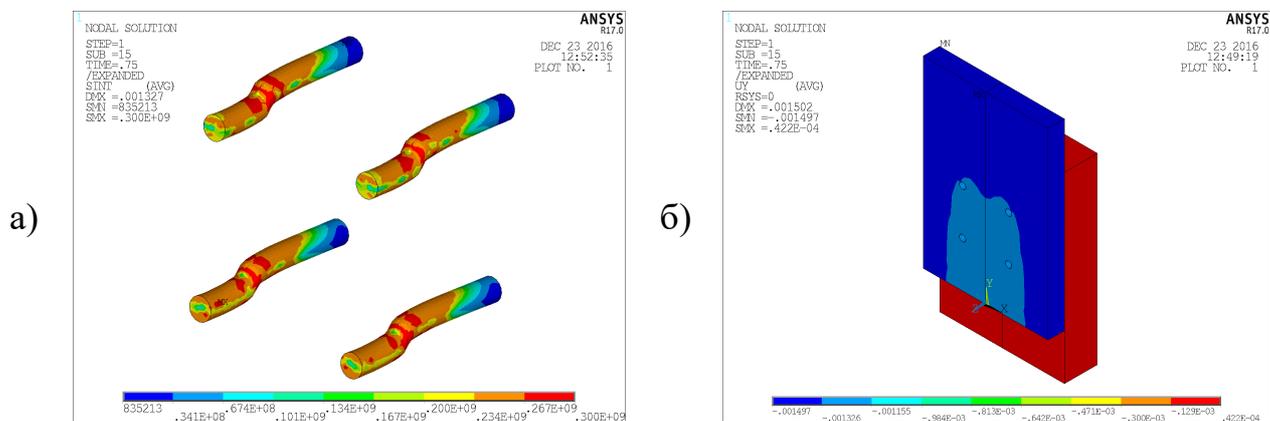


Рисунок 3.17 – Изополя усилий (а) и перемещений (б) для стального варианта нагеля при толщине соединяемых элементов 25 мм

Аналогичный расчет выполнен для нагелей, выполненных из углепластика. Разрушающая нагрузка составила 11...13 кН; взаимное перемещение контрольных узлов деревянных элементов, расположенных в нескольких точках образца составило 2,46 мм. Изополя распределения перемещений в древесине и нагелях приведены на рисунках 3,18 а, б соответственно.

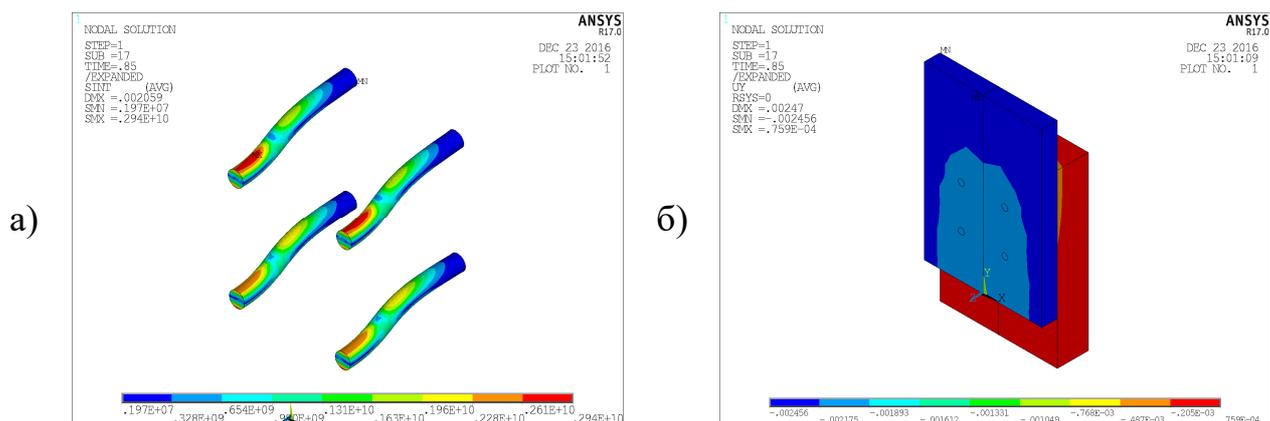
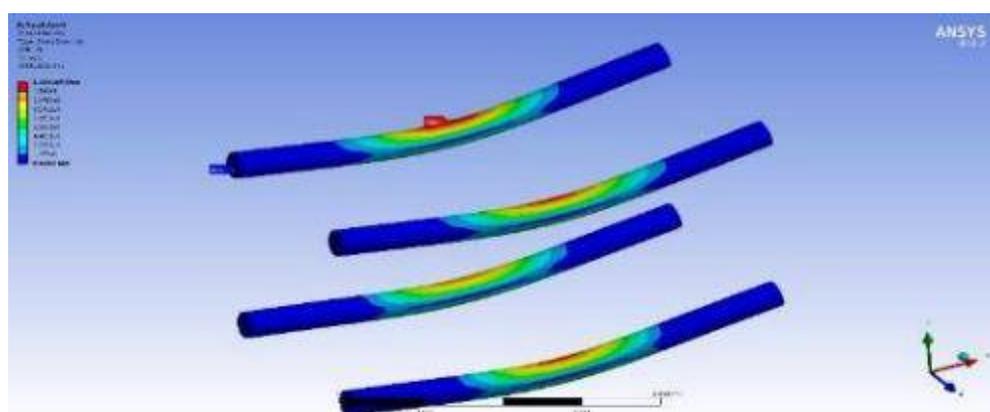


Рисунок 3.18 – Изополя усилий (а) и перемещений (б) для углепластикового варианта нагеля при толщине соединяемых элементов 25 мм

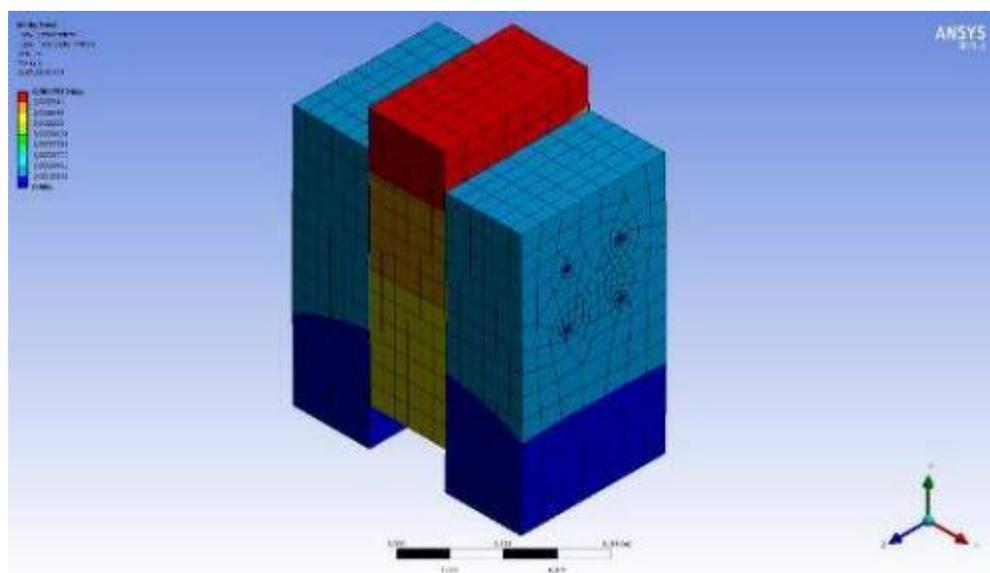
При толщине соединяемых элементов 50 мм и разрушении образца, связанном с разрушением нагеля установлено следующее.

Для стального образца разрушающей явилась нагрузка в диапазоне 16...18 кН. При этом взаимное перемещение контрольных узлов деревянных элементов, расположенных в нескольких точках образца, составило 1,8 мм.

Изополя распределения усилий и характер деформации стальных нагелей приведены на рисунке 3.19а. Изополя распределения перемещений в древесине для варианта со стальными нагелями приведены на рисунке 3.18б.



а)

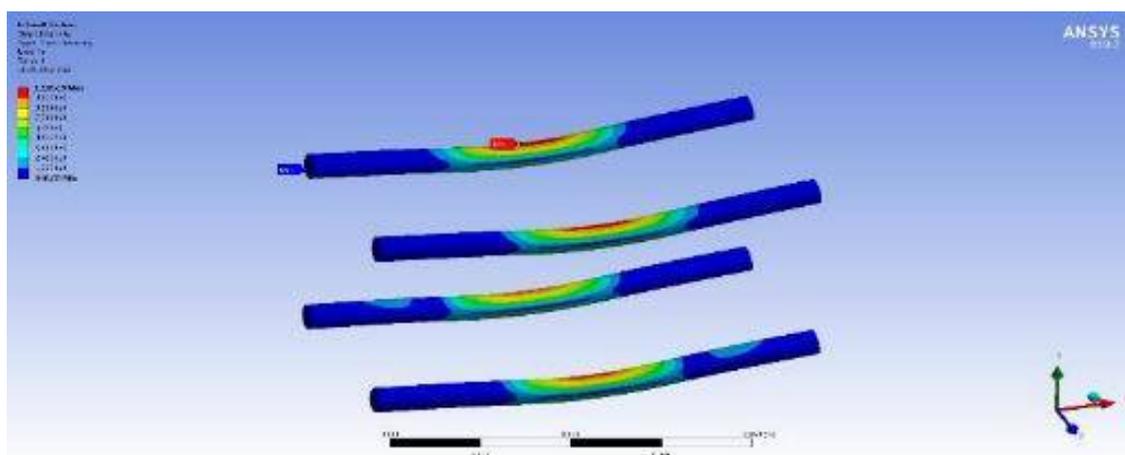


б)

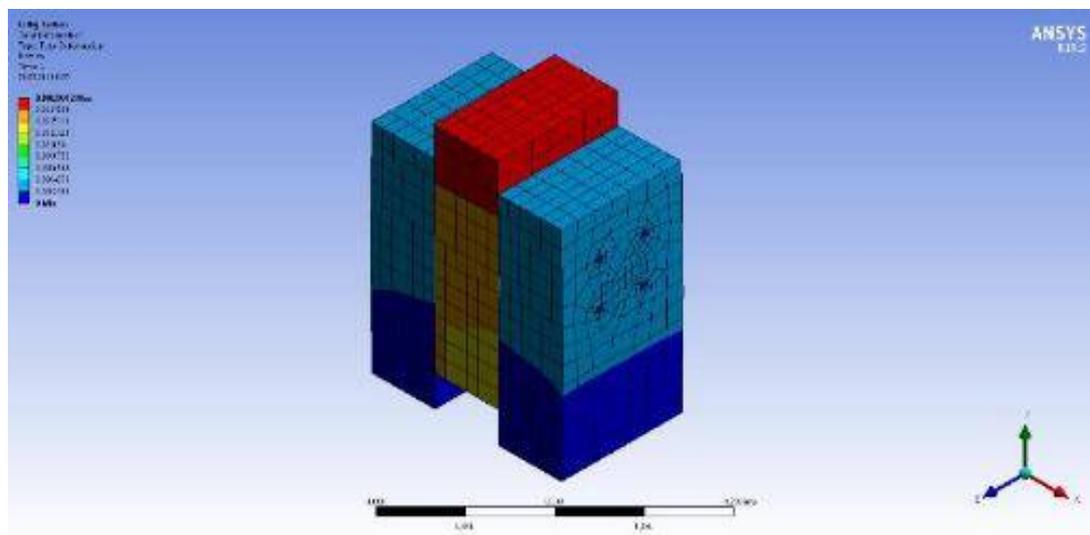
Рисунок 3.19 – Изополя усилий (а) и перемещений (б) для стального варианта нагеля при толщине соединяемых элементов 50 мм

Аналогичный расчет выполнен для нагелей, выполненных из углепластика. При этом получены следующие результаты: разрушающая нагрузка составила 12...14 кН; взаимное перемещение контрольных узлов деревянных элементов, расположенных в нескольких точках образца составило 1,97 мм.

Изополя распределения усилий и характер деформации стальных нагелей приведены на рисунке 3.20а. Изополя распределения перемещений в древесине для варианта со стальными нагелями приведены на рисунке 3.19б.



а)



б)

Рисунок 3.20 – Изополя усилий (а) и перемещений (б) для углепластикового варианта нагеля при толщине соединяемых элементов 50 мм

### 3.6. Выводы по главе

В главе приведены численные (по двум группам предельных состояний) и натурные испытания нагельного соединения с применением нагелей из углеродного композита и их сравнение со стальными аналогами. Расчеты выполнены как по действующим нормативным документам по методике СП «Деревянные конструкции», так и с применением программного комплекса ANSYS. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Теоретические данные, данные, полученные в результате эксперимента и данные, полученные с помощью программного комплекса ANSYS, коррелируют между собой. Разброс значений вызван несовершенством (пороками) структуры древесины, а также отсутствием строительных норм на проектирование конструкций из углепластика. Разрушение конструкций, согласно ожиданиям, произошло в результате деформаций древесины для образцов с толщиной соединяемых элементов 25 мм и в результате образования пластических шарниров при толщине соединяемых элементов 50 мм. Расчет по методике СП не противоречит расчету с применением программных комплексов. При этом скорость нагружения и характер деформации стержней играет значительную роль при определении несущей способности соединения и оказывает влияние на вид разрушения образца. Характер разрушения нагелей, выполненных из композита, отличается от характера разрушения стального образца. Разрушение композитного нагеля происходит в связи с образованием пластического шарнира, вызванного разрушением полимерной матрицы. До разрушения нагели работают упруго, однако после образования шарнира и характерного волнообразного скачка, видимого на кривой растяжения, образцы стремятся принять исходное положение несмотря на то, что полимерная матрица в точках с максимальными усилиями растрескалась и перестала обеспечивать жесткость соединения в целом. Разрушение образцов как со стальными, так и с композитными нагелями предсказуемо и прогнозируемо при помощи расчетных моделей строительной механики.

#### **ГЛАВА 4. Экспериментальные и теоретические исследования напряженно-деформированного состояния жестких стыков клееных деревянных конструкций с применением композитных вклеенных стержней и пластин**

Стыки конструкций из цельной и клееной древесины являются наиболее ответственным и чрезвычайно трудоемким разделом проектирования при возведении большепролетных архитектурных форм. Сложность компоновочных решений стыков и узлов соединения деревянных конструкций обусловлена совокупностью факторов, таких как анизотропия древесины, наличие естественных пороков, невозможность применения сварки и других температурных воздействий при устройстве закладных деталей, требованиями к огнестойкости конструкции, и других.

Наиболее сложными для проектирования и расчета видом соединения конструкций из цельной и клееной древесины являются узлы, испытывающие растягивающие усилия [71]. К таким соединениям относят также соединения и конструктивные элементы, подверженные действию изгибающего момента, в том случае, если в сечении не возникает зон сжатия, а по всей высоте поперечного сечения возникают лишь растягивающие напряжения. В качестве примеров можно привести узлы нижних поясов ферм, деревянных вантовых конструкций, отдельных участков большепролетных арок.

В основе методики по расчету и конструированию растянутых узлов и соединений с применением, вклеенных под углом к волокнам древесины стержней, лежит стандартная методика, приведенная в разделе «Соединения на вклеенных стержнях» СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80». Данная методика приводится для расчета жестких узлов деревянных конструкций конструируемых с применением стальных накладных деталей и стержней.

По совокупности характеристик наиболее широкое распространение получили стыки на вклеенных стержнях (система ЦНИИСК) с применением

стальных нагелей и накладок. Однако в ряде случаев (химически агрессивная среда, высокая влажность в помещении, и т.д.) такое решение не является надежным, поскольку существует риск преждевременного выхода конструкции из строя в связи с процессами коррозии стальных деталей. В работах [92-96] показана принципиальная возможность применения композитных материалов для создания равнопрочных узлов стыка деревянных конструкций [97].

Узлы на клеенных в древесину стержнях имеет ряд преимуществ [98-101]:

- повышенную прочность и жесткость, вследствие образования плотного соединения стержня с древесиной через клеевую прослойку с одновременным усилением элементов материалом стержня, оказывающего армирующий эффект препятствуя взаимному смещению слоев;

- стержни защищены от внешнего воздействия агрессивной среды и быстрого нагрева при пожаре, что повышает огнестойкость и коррозионную стойкость конструкции в целом;

- такой стык обеспечивает наиболее полное использование прочностных характеристик соединяемых материалов.

Задачей данного исследования состоит исследование стыка и определение границ применимости, уточнение методик расчета стыков, используемых при проектировании стальных узлов «системы ЦНИИСК» в рамках моделирования и расчета жестких узлов с применением композитных деталей и стержней.

На сегодняшний день отсутствует нормативная база для расчета композитов, поэтому рациональным путем решения этой задачи может являться построение математической модели с помощью метода конечных элементов. Применение современных программных комплексов и мощностей ЭВМ позволяет с высокой точностью моделировать поведение конструкции в тех или иных условиях.

В данном разделе выполнена расчетная оценка деформативности узла стыка сращенной по длине балки, состоящей из двух элементов под углом 180

градусов, с применением клеенных наклонных нагелей, выполненных из композитного материала

Испытания в рамках исследования приняты по двум вариантам:

– балочной схеме на четырехточечный изгиб;

– консольной схеме на трехточечный изгиб.

Определен характер разрушения конструкций с учетом пластических деформаций с помощью численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций в программном комплексе ANSYS, а также путем проведения натуральных экспериментов. Кроме того, выполнено сравнение с цельной балкой без стыка.

В главе приведены данные численного моделирования напряженно-деформированного состояния стыкового соединения деревянных конструкций на клеенных стержнях при различных конфигурациях расстановки нагелей.

#### **4.1. Подбор рациональных параметров стыкового соединения деревянных конструкций на углепластиковых клеенных стержнях**

В данном разделе решалась задача численного моделирования напряженно-деформированного состояния стыкового соединения деревянных конструкций на клеенных стержнях при различных конфигурациях расстановки нагелей.

Существующая методика расчета соединений «системы ЦНИИСК» сводится к сравнению минимальной несущей способности стержня из условия смятия древесины гнезда или изгиба наиболее нагруженного из стержней, но методики определения усилий в нагелях и определения наиболее нагруженного из них в нормативных документах не приводится [106, 107].

Для оценки влияния параметров стыка на НДС и определения наиболее рационального варианта узлового соединения проведены вычислительные эксперименты несущей способности и деформативности конструкции.

Создана расчетная конечно-элементная модель слоистой деревянной балки сечением  $100 \times 225 \times 3000$  мм со стыком в середине пролета, нагруженная по схеме 4-точечного изгиба двумя сосредоточенными силами  $F=1,25$  кН. (рисунок 4.1). Величина нагрузки принята в соответствии с критической силой, определенной по методике СП «Деревянные конструкции» для неразрезной балки аналогичного сечения. При  $F=1,25$  кН неразрезной образец достигает предельно допустимого расчетного значения прогиба  $f=(l/300)l=10$  мм (п. 4.3.3 [6]), запас прочности при действии изгибающего момента от данной величины нагрузки (п. 4.9 [6]) составляет 11,2 %.

Балка разрезана в середине пролета и жестко соединена накладками из двунаправленного углепластика на матрице синтетического полимерного связующего толщиной 5 мм, расположенными по верхней и нижней грани образца. Накладки закреплены к телу древесины при помощи клеенных стержней диаметром 5 мм.

Модель построена в программном комплексе AUTODESK AutoCAD® и экспортирована в ПК «ANSYS» с помощью макросов, написанных на языке параметрического программирования APDL (рисунок 4.1).

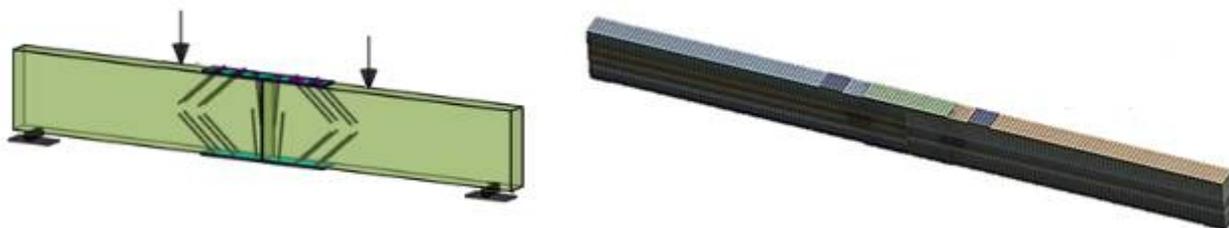


Рисунок 4.1 – Расчетная схема и конечно-элементная модель балки

Геометрия используемых при расчете конечных элементов приведена на рисунке 4.2 [64].

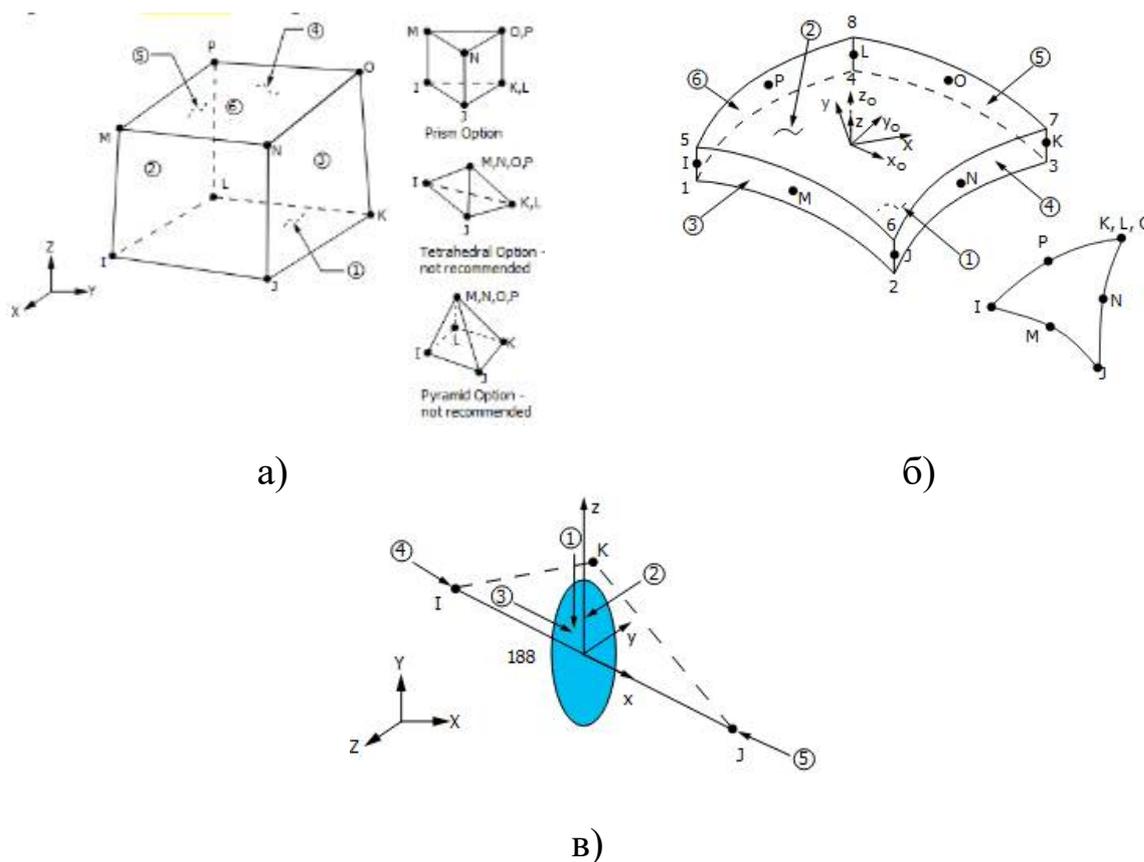


Рисунок 4.2 – Геометрия используемых при расчете конечных элементов  
 а) твердого тела SOLID185, б) пластины SHELL281,  
 в) стержневого элемента BEAM188

**Древесина** задана как ортотропный материал со следующими характеристиками:

- модуль упругости по оси  $x$ ,  $E_x=1,1 \times 10^{10}$  Па,
- модуль упругости  $E_y=E_z=4,5 \times 10^8$  Па,
- коэффициенты Пуассона  $\nu_{xy}=0,45$ ,  $\nu_{yz}=\nu_{xz}=0,018$ ;
- модуль сдвига  $G_x=G_y=G_z=6 \times 10^8$  Па.

Тело балки смоделировано 8-узловым конечным элементом SOLID185.

**Вклеиваемые стержни** – углепластиковые на полимерной матрице [66] со следующими характеристиками:

- пределом прочности при разрыве  $\sigma_b=2,248 \times 10^6$  Па;
- модуль упругости  $E=117 \times 10^9$  (Па);
- коэффициент Пуассона  $\nu_{xy}=\nu_{yx}=0,31$ .

Для стержней применен 3-узловой элемент BEAM188.

**Накладки** заданы как трансверсально-изотропный двунаправленный углепластик с направлением армирующих слоев  $\pm 45$  градусов со следующими характеристиками [67, 68]:

- предел прочности при разрыве  $\sigma_b=7,65 \times 10^6$  Па;
- модули упругости  $E_x=E_y=87,2 \times 10^9$  Па,  $E_z=65,4 \times 10^9$  Па;
- коэффициенты Пуассона  $\nu_{xy}=\nu_{yx}=0,268$ ;  $\nu_{xz}=0,018$ .

Накладки представлены 8-узловым конечным элементом SHELL281.

При моделировании клеевого соединения учитывалась нелинейность, связанная с наличием сил трения по поверхностям контакта (плоскости соприкосновения древесина-углепластик).

Рассматривались разные варианты сеток. Размер и тип сетки существенно влияет на результаты расчета. С точки зрения сходимости и скорости расчета предпочтительней сетка с измельчением в зоне контакта.

Основной особенностью рассматриваемой конструкции является контактное взаимодействие тел [102], учет которого позволяет моделировать поведение составляющих ее элементов в процессе деформирования и

разрушения. Напряженное состояние в контактных зонах крайне многообразно. Поверхности могут вступать и выходить из контакта внезапно. На напряженное состояние значительно влияет трение, и его необходимо принимать в расчет.

На совместных границах контактирующих элементов возникают распределенные поверхностные силы. Нормальная  $t_n$  и касательная  $t_t$  составляющие распределенной контактной силы, действующей на любой элемент, имеют вид:

$$t_n = t \cdot n \leq 0 \quad (4.1)$$

$$t_t = t \cdot \tau, \quad (4.2)$$

где  $n$  - внешняя нормаль к контактной поверхности тела,

$\tau$  - касательный вектор к контактной поверхности тела.

В формуле (4.1) нестрогое неравенство превращается в равенство при выходе тел из контакта и в строгое неравенство – при нахождении в контакте. Касательные контактные силы могут принимать любые значения. Приложение касательного напряжения в контакте не приводит к проскальзыванию при условии, если тела в области контакта, склеены «друг с другом» или коэффициент трения стремится к бесконечности. В этом случае касательные контактные силы не зависят от нормальных контактных сил, но и не равны нулю.

Контактирующие тела неподвижны друг относительно друга, т.е. касательные силы подчиняются закону Кулона до тех пор, пока выполняется неравенство:

$$|t_t| \leq \mu_s |t_n|, \quad (4.3)$$

где  $\mu_s > 0$  - статический коэффициент трения. При нарушении неравенства (4.1) тела начинают движение друг относительно друга. Тогда касательные контактные силы подчиняются равенству:

$$|t_t| = \mu_d |t_n|, \quad (4.4)$$

где  $\mu_d$  - динамический коэффициент трения,  $\mu_d \leq \mu_s$ . Движение будет продолжаться, пока не будет выполнено неравенство (4.5):

$$|t_t| < \mu_d |t_n|, \quad (4.5)$$

и не начнется снова до тех пор, пока вновь не нарушится неравенство (4.3).

При учете трения в зонах контакта решение задачи существенно зависит от последовательности приложения внешних нагрузок, а в точках, входящих в контакт и выходящих из него, реализуются сложные программы нагружения [103-107].

В контакте выделяют две взаимодействующие поверхности – контактную пару. Одна из поверхностей условно называется «контактной», а вторая – «целевой». Выбор модели контакта – важнейший вопрос при решении контактных задач.

В данной задаче область контакта может изменяться, и в общем случае, содержит как участки сцепления, так и участки скольжения, возникающие при превышении модулем касательной силы предельного значения силы трения (трения покоя). Для моделирования контактного взаимодействия и скольжения между трехмерными поверхностями использовалась модель «Frictional» и контактные элементы CONTA174 и TARGE170. Коэффициент трения зависит от материалов, и принят для пары «древесина-углепластик» – 0,25, а для пары «древесина-древесина» – 0,33.

Для определения влияния различных параметров стыка на напряженно-деформированное состояние узлового соединения проведены вычислительные эксперименты несущей способности и деформативности конструкции. В качестве варьируемых параметров приняты следующие

- количество нагелей в соединении ( $N=4$ , 8 либо 12 шт., рисунок 4.3);
- положение (угол вклеивания) нагеля ( $\varphi=15, 30, 45, 60^\circ$ , рисунок 4.4).

Стержни устанавливаются в два продольных ряда, расположение стержней принято в соответствии с требованиями п.7.18, 7.19 [6].

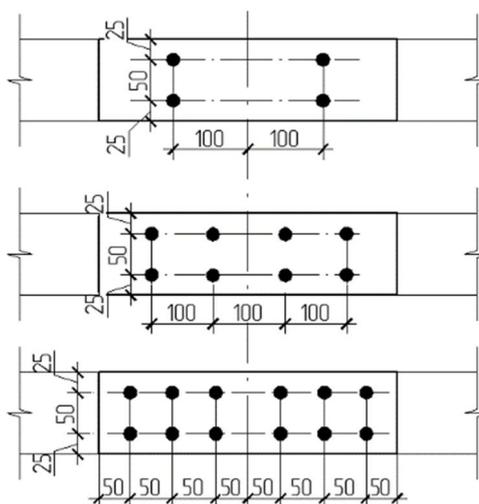


Рисунок 4.3 – Схема расстановки клеиваемых стержней

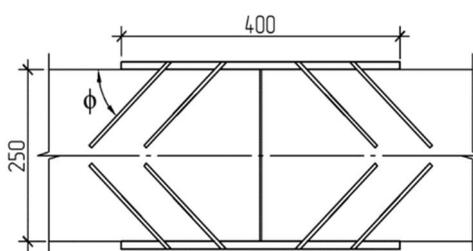


Рисунок 4.4 – Угол клеивания стержней

Численная реализация *нелинейной краевой задачи определения напряженно-деформированного состояния конструкции* осуществлялась пошаговым методом посредством замены всей нагрузки  $F$  серией ее небольших приращений.

Внутри каждого шага нагружения нагрузка может быть еще разбита на несколько подшагов решения, чтобы обеспечить постепенное приложение нагрузки. На каждом шаге решения для получения сходимости выполнялись равновесные итерации с помощью метода Ньютона-Рафсона. Проверка сходимости для сил и перемещений производилась с использованием евклидовой нормы для всех степеней свободы.

При расчете конструкции балки с нагельным соединением контролировались следующие параметры:

- напряжения в древесине (рисунок 4.5);
- напряжения в стержнях (рисунок 4.6);
- напряжения в накладках (рисунок 4.7);

– прогиб образца в вертикальной плоскости (рисунок 4.8).

Для каждой измеряемой величины и конфигурации расположения нагелей в соединении построены графики зависимости напряжений и прогибов от угла наклона вклейки нагеля.

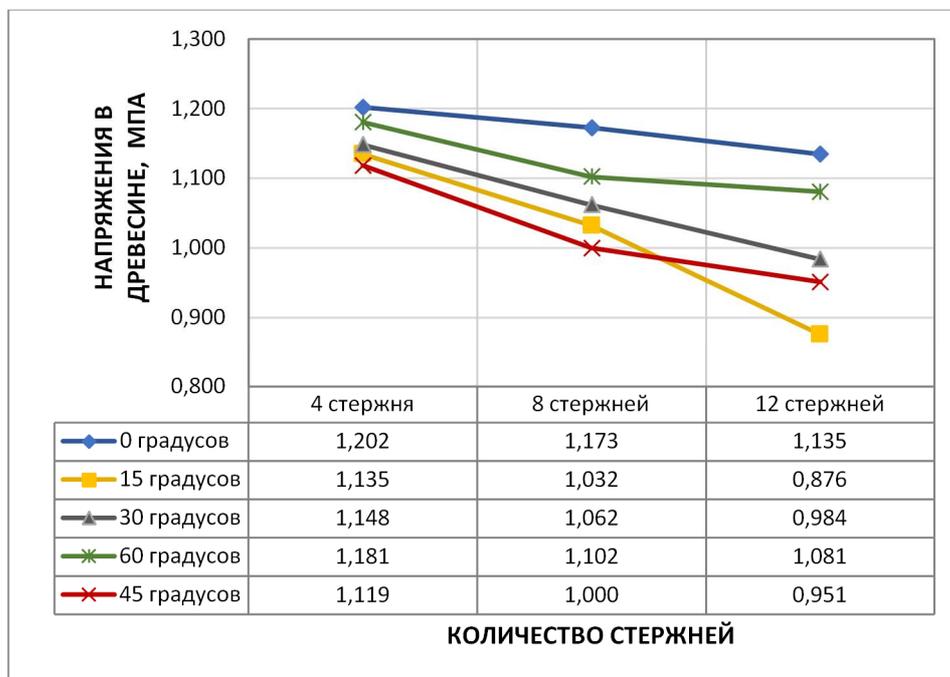


Рисунок 4.5 – График зависимости максимальных напряжений в древесине от угла вклейки и количества стержней

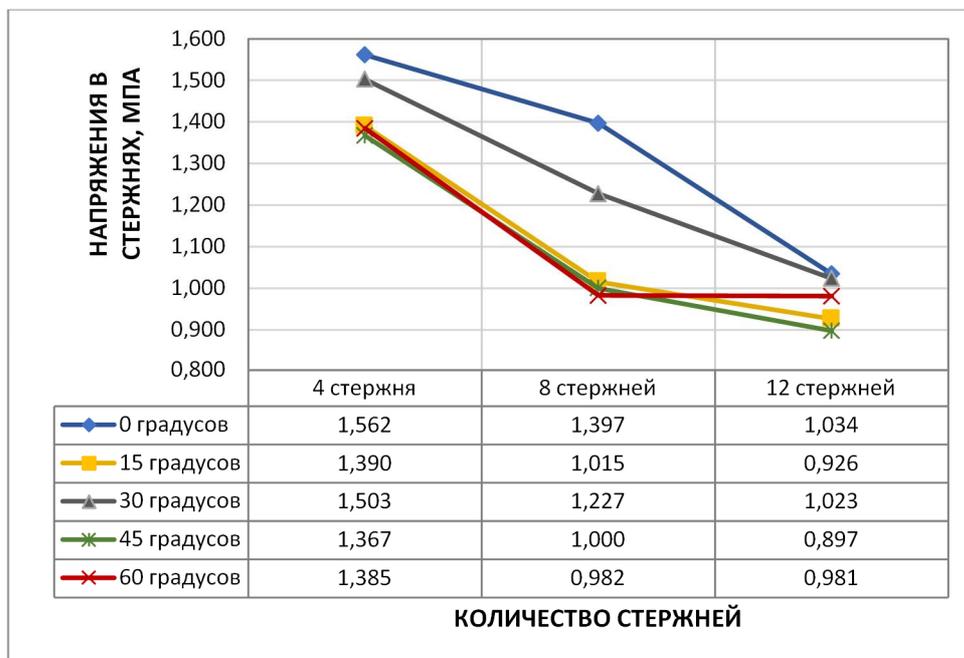


Рисунок 4.6 – График зависимости максимальных напряжений в стержнях от их количества и угла вклейки



Рисунок 4.7 – График зависимости максимальных напряжений в накладках от угла клейки и количества нагелей

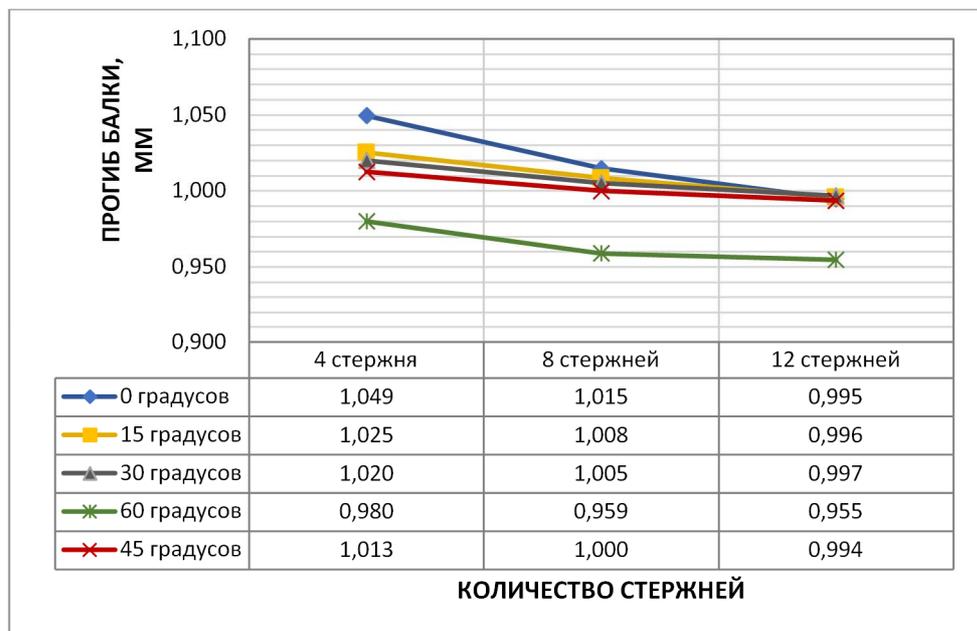


Рисунок 4.8 – Предельные вертикальные перемещения (прогибы)

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

- прогиб балки уменьшается с увеличением угла наклона стержня (логично, стержни становятся более параллельными доскам и создают продольное армирование);

– напряжения в древесине и накладках изменяются незначительно, а напряжения в стержнях и накладках тем больше, чем меньше стержней.

– наиболее рациональным вариантом конфигурации нагельного соединения образца при четырехточечном изгибе под действием критической силы  $F$  является вариант с расстановкой восьми нагелей по каждой стороне под углом  $45^\circ$  к линии, проходящей вдоль длинного края балки. Далее для этого варианта проводились вычислительные эксперименты и натурные испытания жесткого узла стыка балок (по 3 образцам) на четырехточечный и трехточечный изгиб, а также балки без стыка для сравнения.

## **4.2. Моделирование и натурные испытания жесткого узла стыка балок при испытаниях на четырехточечный изгиб**

### **4.2.1. Численное моделирование**

Вычислительные эксперименты на четырехточечный изгиб выполнялись для конструкции балки с нагельным соединением из материалов: тело балки – клееная древесина второго сорта, вклеиваемые стержни – углепластиковые диаметром 5 мм, полученные методом пултрузии; накладки по верху и низу балки – двунаправленный углепластик на матрице синтетического полимерного связующего.

Длина балки составляла 3000 мм, стык выполнен в середине пролета. Расстояние между краями центральной накладки и площадками приложения усилий в свету составляет 100 мм в каждом направлении.

Расчетная схема балки и конечно-элементная модель соответствуют приведенным в п. 4.1, рисунок 4.1.

Расчет в нелинейной постановке проводился в программном модуле ANSYS Workbench, который содержит большой набор инструментов контактной технологии, интегрированных в метод конечных элементов для проработки различных вариантов контакта, пошаговым приложением нагрузки с шагом в 1,0 кН до разрушения образца.

При нагружении образца под опорами траверсы (в зоне максимального изгибающего момента) начинают образовываться пластические деформации при нагрузке 15,4 кН (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – Участки в момент начала образования пластических шарниров под опорами траверсы

Разрушение стыка происходит при нагрузке 25,6 кН. При этом происходит раскрытие зоны стыка и отрыв соединительных планок, а также стержней в местах контакта. Увеличенный узел с качественной картиной раскрытия стыка и обрывом пластин показан на рисунке 4.10а. Увеличенный узел по результатам эксперимента – на рисунке 4.10б.

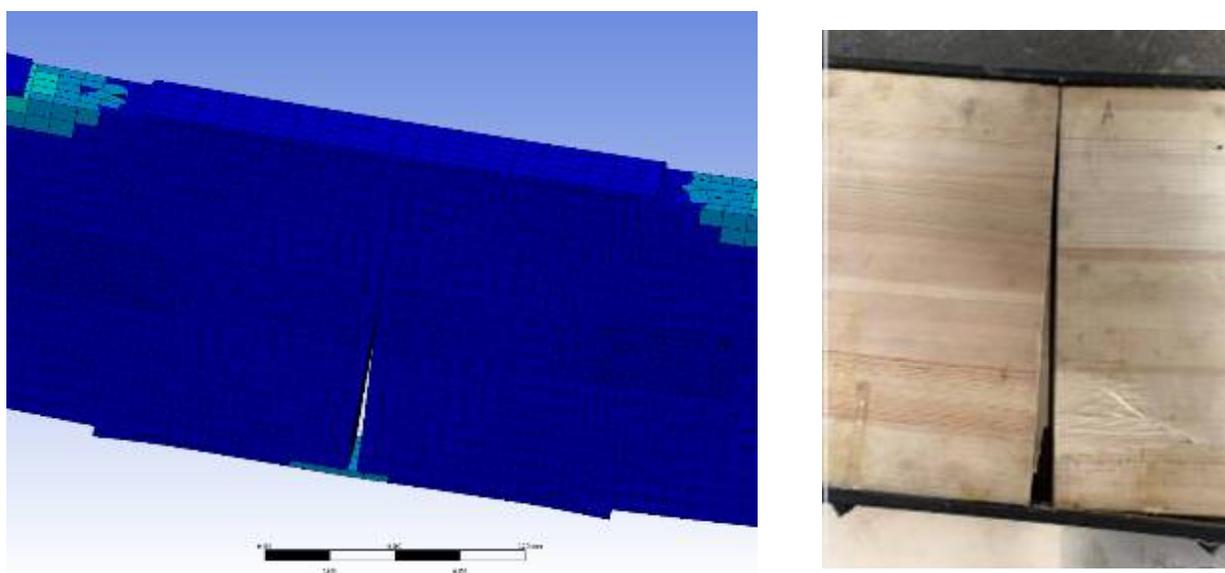


Рисунок 4.10 – Расчетный (а) и фактический (б) узел после полного разрушения

В момент разрушения образца максимальное перемещения середины пролета балки (в месте стыка) по результатам численного моделирования равнялось 9,75 мм (рисунок 4.11).

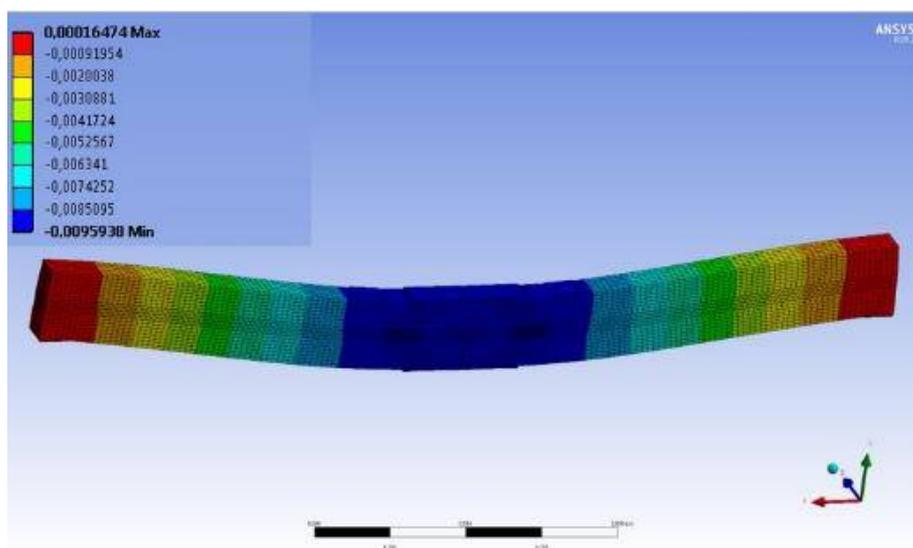


Рисунок 4.11 – Перемещение середины балки, мм

На рисунках 4.12 и 4.13 показаны изополя распределения напряжений в древесине и соединительных деталях (накладках и стержнях).

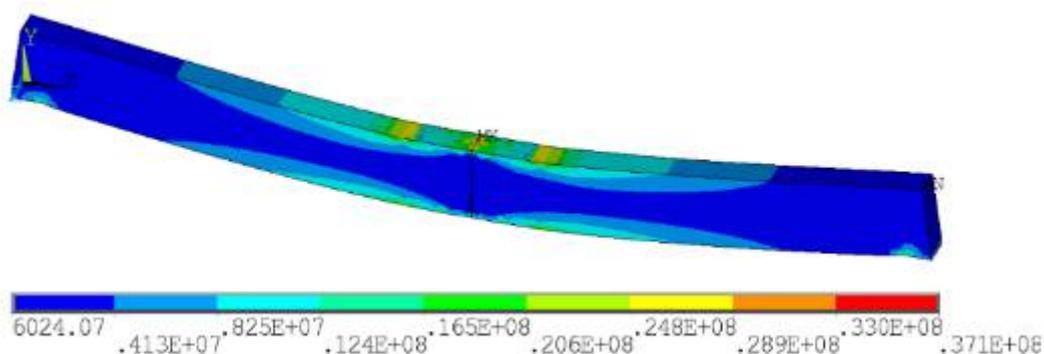


Рисунок 4.12 – Изополя распределения напряжений в теле древесины (Па)

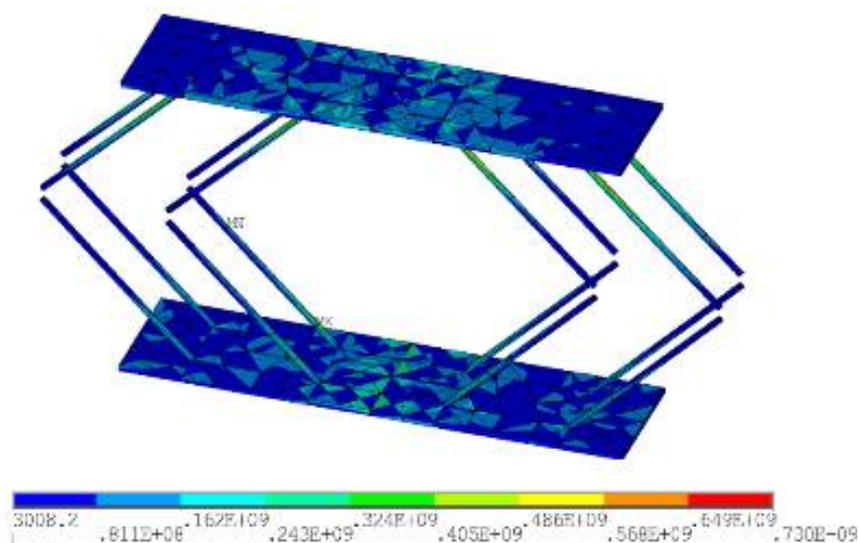


Рисунок 4.13 – Изополя распределения напряжений в соединительных деталях (Па)

Статус контактного взаимодействия элементов конструкции показан на рисунке 4.14 (оранжевым цветом отмечено проскальзывание слоев древесины друг относительно друга («SLIDING» в терминологии ANSYS), а также проскальзывание стержней в посадочных гнездах в момент разрушения образца).

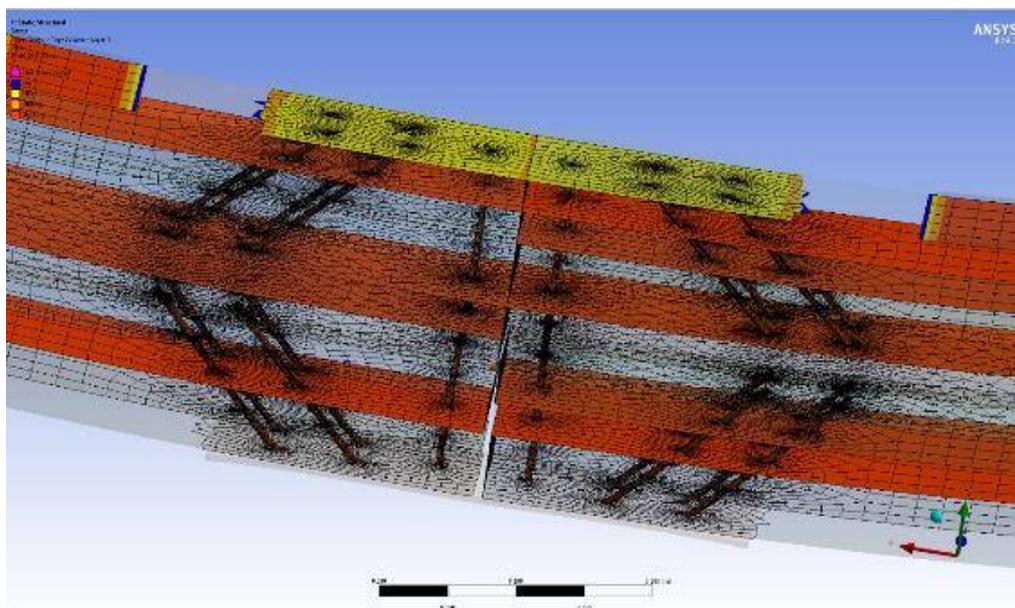


Рисунок 4.14 – Контактное взаимодействие стержней, пластин и слоев древесины в момент разрушения

Максимальные эквивалентные напряжения во вклеиваемых стержнях, образующих жесткий стык, составили 600,7 МПа. Изополя распределения напряжений в соединительных деталях приведены на рисунке 4.15.

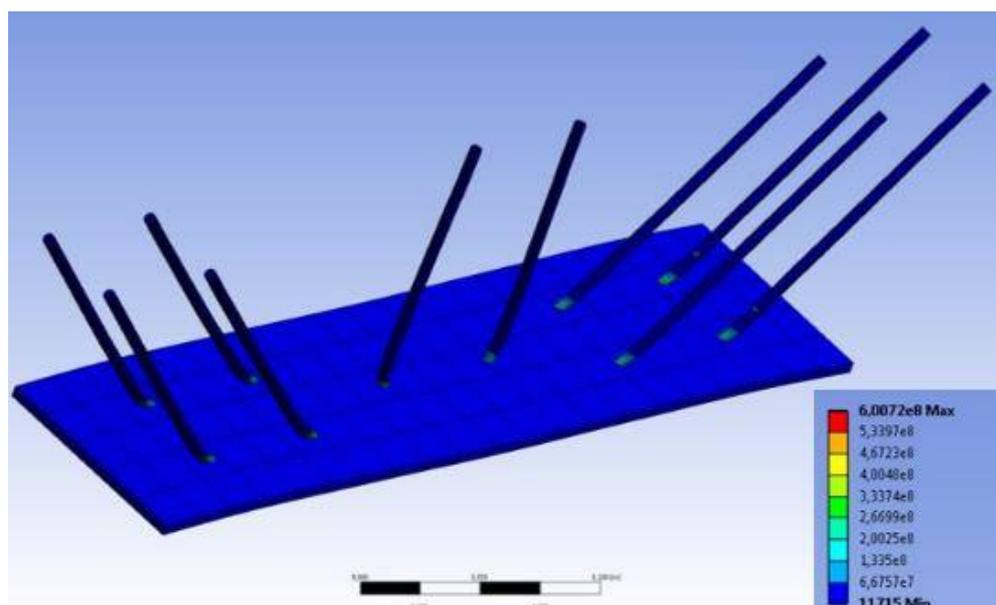


Рисунок 4.15 – Изополя напряжений в стержнях на растянутой накладке

#### 4.2.2. Натурные испытания

Схема натурных испытаний образцов соответствовала расчетной схеме. Испытания проводились до разрушения образца пошагово возрастающей нагрузкой на специально запроектированном стенде. Давление на балку передавалось посредством гидравлического универсального домкрата ДУ50П250 через траверсу, имеющую две шарнирные опоры. Значение нагрузки снималось с электронного манометра, соединенного с масляной станцией посредством шлангов высокого давления. Значение разрушающей нагрузки фиксировалось в момент, при котором наблюдался рост перемещений при падении давления на опоре домкрата. Для замера перемещений применялись индуктивные датчики линейных перемещений ДПЛ-100, подключенные к регистрирующему блоку ТЕРЕМ-4.1.

Общий вид балки на стенде приведен на рисунке 4.16 Образец, после разрушения стыка показан на рисунке 4.17.



Рисунок 4.16 – Балка на испытательном стенде



Рисунок 4.17 – Образец после разрушения стыка

Разрушающая нагрузка установлена на уровне  $\sim 25,5$  кН, перемещение в середине пролета составило при этом  $\sim 7$  мм. Сжатая (верхняя) кромка балки в месте стыка вплотную приблизилась к противоположной части балки, образовав лобовой упор. Максимальная ширина раскрытия нижней кромки в месте стыка отмечена при значении индикатора  $\sim 5,7$  мм, при величине зазора до начала испытаний 1 мм.

На рисунке 4.18 приведены графики зависимости максимальных перемещений балки от нагрузки, полученные в вычислительных и натурных экспериментах. Датчики «1» и «3» установлены под опорными пятками траверсы, передающими усилие непосредственно на балку. Датчик «2» установлен в середине пролета балки (в месте стыка).

Эксперименты проводились до полного разрушения балки и стыка с возникновением взаимных смещений слоев древесины и выдергиванием отдельных стержней. После разрушения балка не вернулась в исходное состояние.

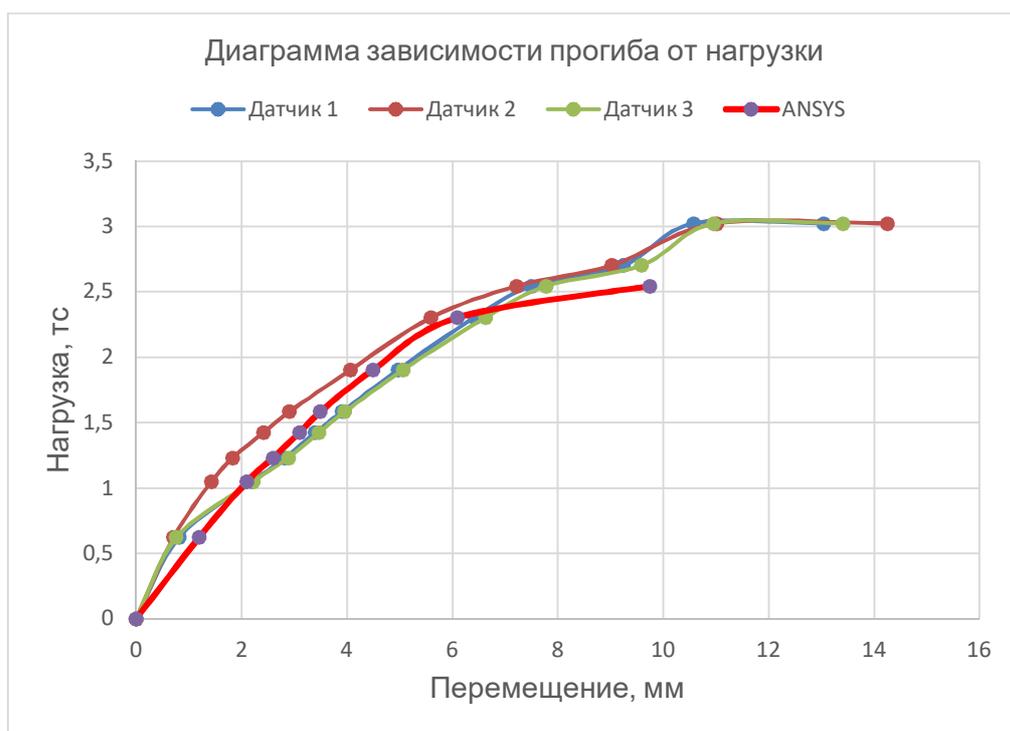


Рисунок 4.18 – Графики зависимости перемещений от нагрузки для экспериментальных и теоретических данных

Характер разрушений в натуральных испытаниях соответствует прогнозу численной модели. Конструкция разрушается в результате взаимного проскальзывания слоев клееной древесины, разрушения полимерной матрицы вклеиваемых стержней, с образования пластических шарниров под пятками траверсы и образования трещин в древесине в месте стыка.

После выключения из работы первого стержня конструкция продолжала некоторое время работать упруго, но при повышении нагрузки и резком разрушении остальных стержней произошло полное разрушение стыка конструкции. Эта информация подтверждается скачкообразным поведением кривой на графике нагрузка-перемещение с последующим ростом деформаций при падении нагрузки.

### 4.3. Численное моделирование и натурные испытания жесткого стыка балок по консольной схеме на трехточечный изгиб

#### 4.3.1. Численное моделирование

Для исследования жесткого узла стыка клееных деревянных балок по консольной схеме на трехточечный изгиб (рисунок 4.20) использованы те же материалы элементов конструкции, а также геометрические размеры поперечных сечений конструкции, что и в случае 4-точечного изгиба. Длина балки составляла 1500 мм, стык выполнен в середине пролета. Расчетная схема балки и конечно-элементная модель приведены на рисунках 4.19 и 4.20.

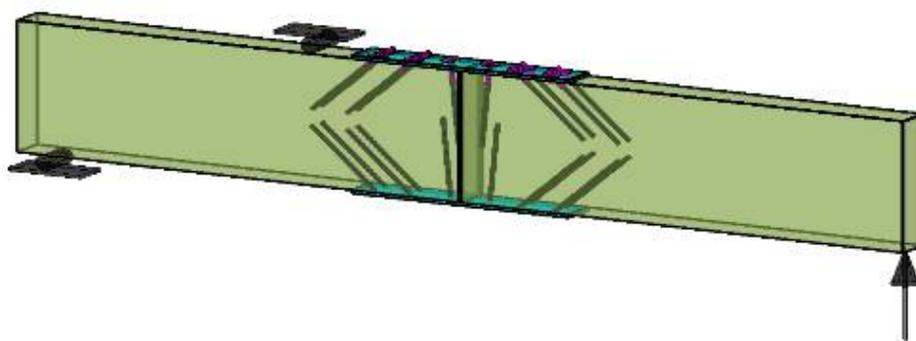


Рисунок 4.19 – Модель балки со стыком на клеенных стержнях (консольная схема)

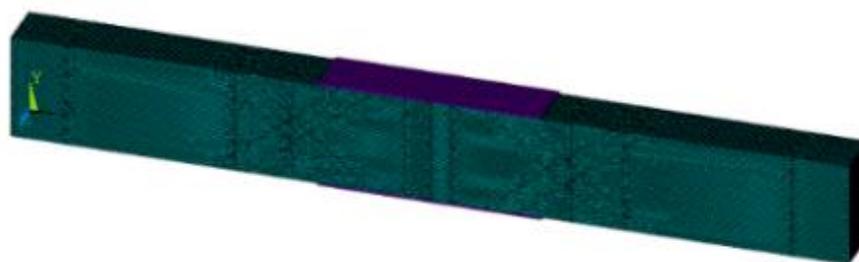


Рисунок 4.20 – Конечно-элементная модель балки со стыком на клеенных стержнях

Для сравнительного анализа также рассматривался вариант балки без стыка. Расчет в нелинейной постановке производился пошаговым приложением нагрузки с шагом в 1,0 кН. По окончании расчета получены следующие результаты.

Разрушение образца в обоих случаях начиналось в результате образования пластического шарнира в теле балки под опорной пяткой заделки в зоне максимального изгибающего момента. Пластические деформации для образца с жестким стыком (рисунок 4.21 а) возникают при нагрузке 3,6 кН, разрушение – при 11,6 кН. Для образца без стыка (рисунок 4.21 б) пластические деформации возникают при нагрузке 3,4 кН, разрушение – при 10,0 кН.

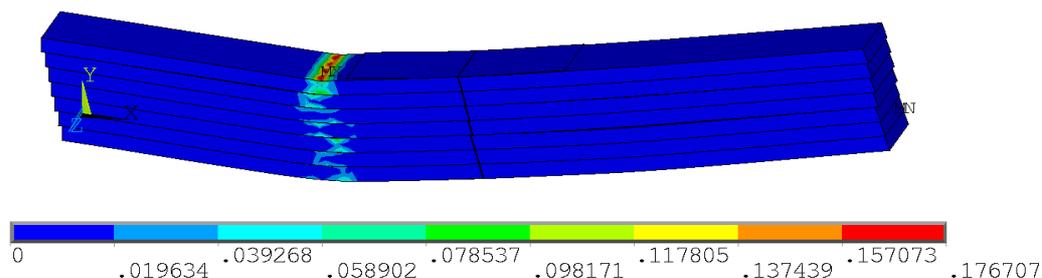


Рис. 4.21 а – Разрушение образца с образованием пластического шарнира (деформированная схема) со стыком

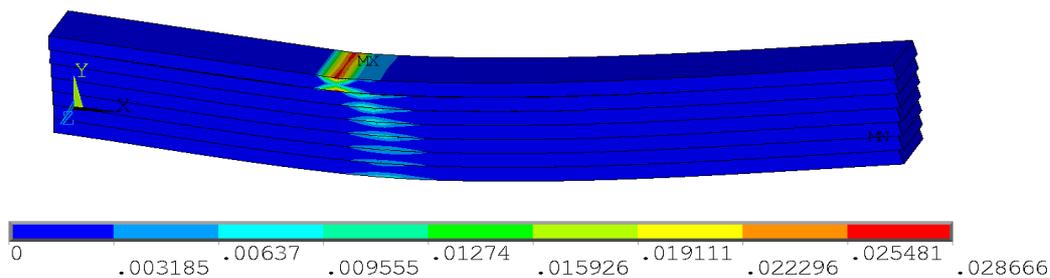


Рис. 4.21 б – Разрушение образца с образованием пластического шарнира (деформированная схема) без стыка

В момент разрушения касательные напряжения контакта в клеевом соединении для образца с жестким стыком составляют 7,48 МПа (рисунок 4.22 а). Максимальные перемещения изгибаемого конца балки составили при этом 27 мм (рисунок 4.23 а).

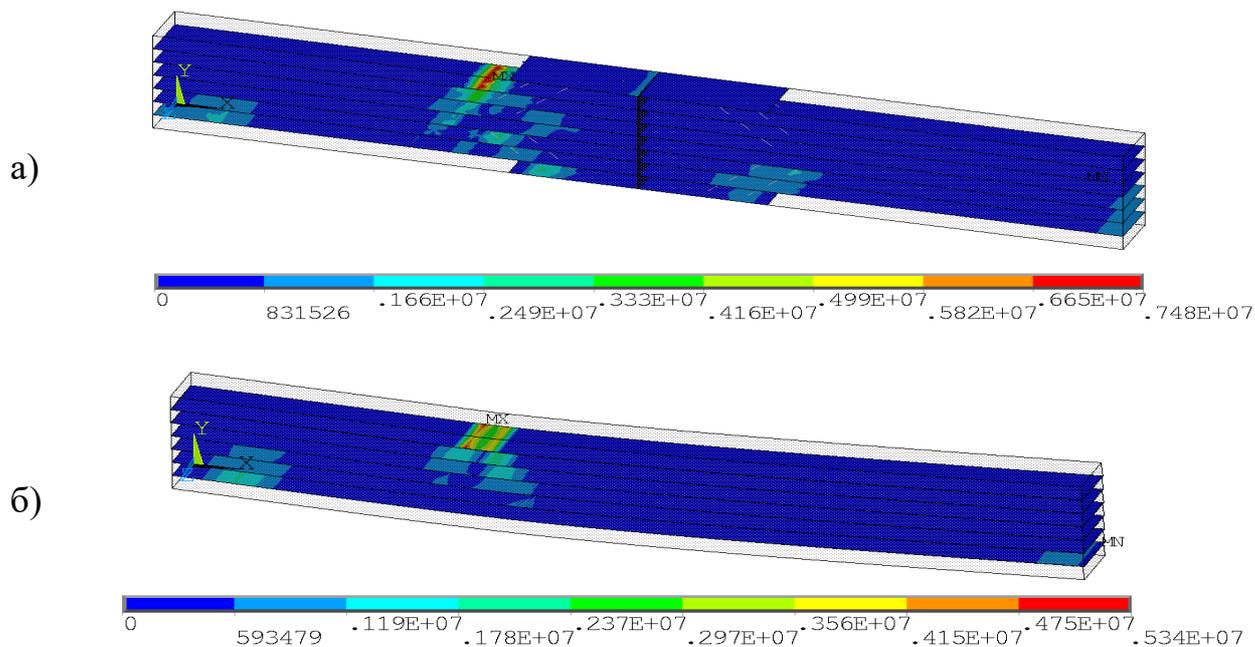


Рисунок 4.22 – Распределение касательных напряжений контакта

а) со стыком, б) без стыка

Балка из клееной древесины без стыка в момент разрушения имеет касательные напряжения 5,34 МПа (рисунок 4.22 б) и перемещения изгибаемого конца составляют 22 мм (рисунок 4.23 б).

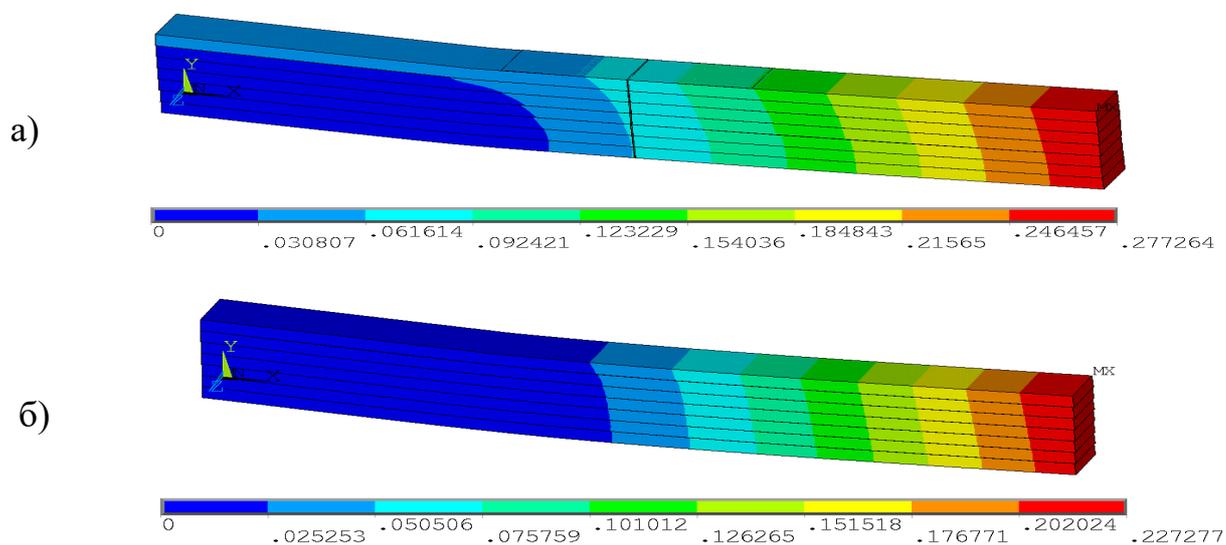


Рисунок 4.23 – Изополя суммарных перемещений в балке

а) со стыком, б) без стыка

Максимальные усилия во вклеиваемых стержнях и накладках, образующих жесткий стык, составили 697 МПа. Изополя распределения напряжений в соединительных деталях приведены на рисунке 4.24.

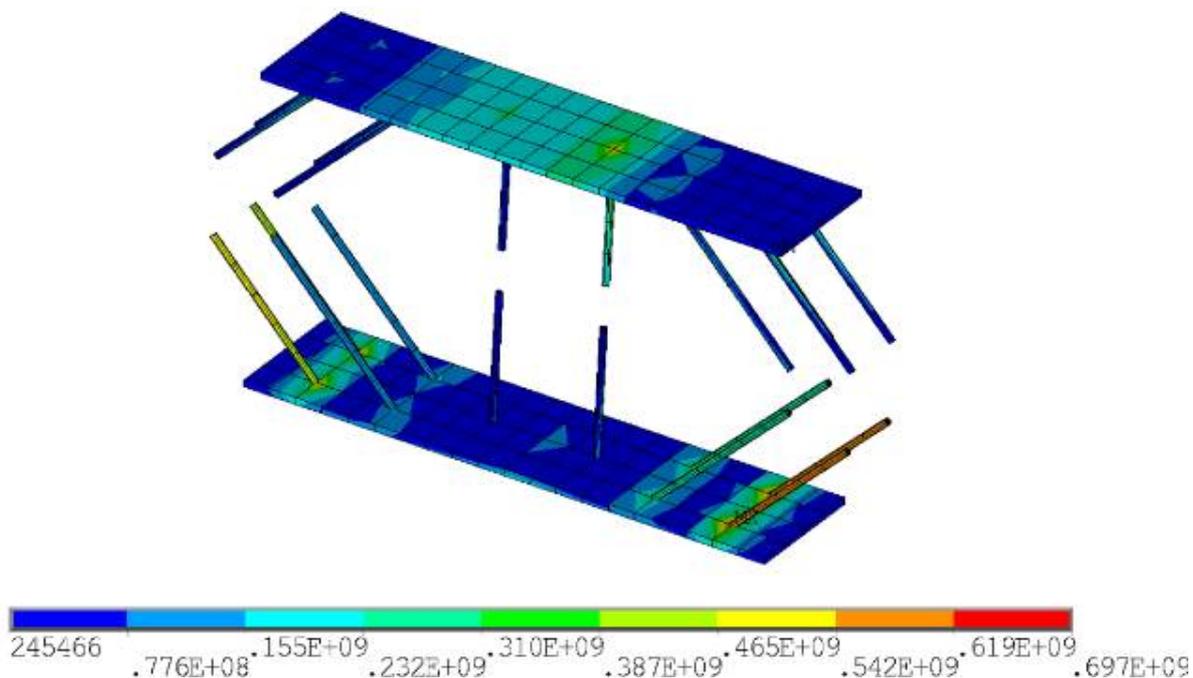


Рисунок 4.24 – Изополя распределения напряжений в накладках и стержнях

### 4.3.2. Натурные испытания

Схема натурных испытаний образцов со стыком и без стыка соответствует расчетной схеме, приведенной на рисунке 4.25. Испытания проводились до разрушения образца пошагово возрастающей нагрузкой на специально запроектированном стенде (рисунок 4.26).

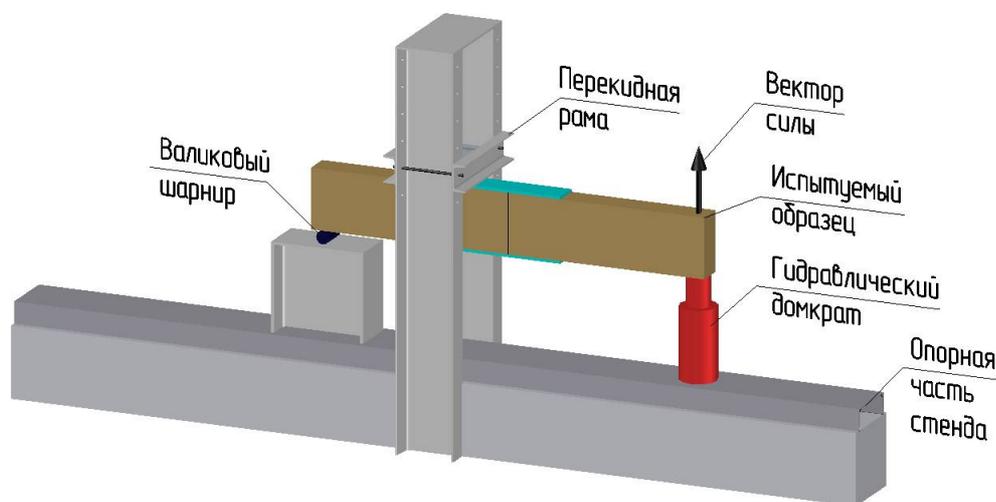


Рисунок 4.25 – Испытательный стенд



Рисунок 4.26 – Балки со стыком и без стыка на испытательном стенде

Давление на свободный конец балки передавалось посредством гидравлического универсального домкрата ДУ50П250. Значение нагрузки снималось с электронного манометра, соединенного с масляной станцией посредством шлангов высокого давления. Значение разрушающей нагрузки фиксировалось в момент, при котором наблюдался рост перемещений при падении давления на башмаке домкрата. Для замера перемещений применялись измерители часового типа ИЧ-10 и ИЧ-50, влажность образцов определялась влагомером МГ-4 и составила 8,4 %. Температурно-влажностный режим внутри помещения определен при помощи термогигрометра МГ-4В, температура внутри помещения 24,7<sup>0</sup>С, влажность 23,6 %.

При испытании неразрезной балки в качестве контролируемых параметров приняты:

- перемещение свободного конца балки;
- усилие на манометре домкрата.

При испытании стыка на углепластиковых нагелях в качестве контролируемых параметров также оценивалась ширина раскрытия зазора стыка с обеих сторон балки. Стык смонтирован с применением синтетического клея на эпоксидном связующем.

Образец после испытания стыка приведен на рисунке 4.27.



Рисунок 4.27 – Разрушение стыка, образование продольных трещин

В опорных частях видны трещины шириной раскрытия до 3 мм, по растянутой кромке трещин не выявлено (в связи с включением накладок в совместную работу).

Некоторое различие в расчетных и фактических усилиях и перемещениях связано с пороками древесины, а также использованием в качестве прочностных характеристик унифицированных расчетных величин  $\sigma_b$ , установленных [6].

При испытании балок без стыка фактическая разрушающая нагрузка составила ~12 кН, перемещение свободного конца ~22,3 мм. Характер разрушения соответствует данным численной оценки работы балки, и вызван образованием пластического шарнира под подвижной опорой в середине пролета.

Кроме того, зафиксировано обмятие балки под неподвижной опорой, а также образование трещин шириной раскрытия до 3 мм в теле древесины в опорных частях балки и по растянутой (нижней) кромке. Разрушений, связанных с взаимным смещением слоев древесины, а также с нарушением целостности клеевых швов в ходе испытаний не зафиксировано.

При испытании балки со стыком характер разрушений также соответствует расчетным значениям. Разрушающая нагрузка установлена на уровне  $\sim 13$  кН, перемещение свободного конца составило при этом  $\sim 23,5$  мм. Сжатая (верхняя) кромка балки в месте стыка вплотную приблизилась к противоположной части балки. Максимальная ширина раскрытия нижней кромки в месте стыка отмечена при значении индикатора равном 3,7 мм, величина технологического зазора до начала испытаний  $\sim 1$  мм.

Разрушение балки со стыком произошло в результате образования пластического шарнира под подвижной опорой в середине пролета, аналогично балке без стыка.

Следует отметить, что в обоих случаях после снятия нагрузки балки вернулись в исходное состояние (рисунок 4.28).



Рисунок 4.28 – Внешний вид балок после снятия нагрузки

На рисунке 4.29 приведены графики зависимости максимальных перемещений балки от нагрузки, полученные в вычислительных и натуральных экспериментах.

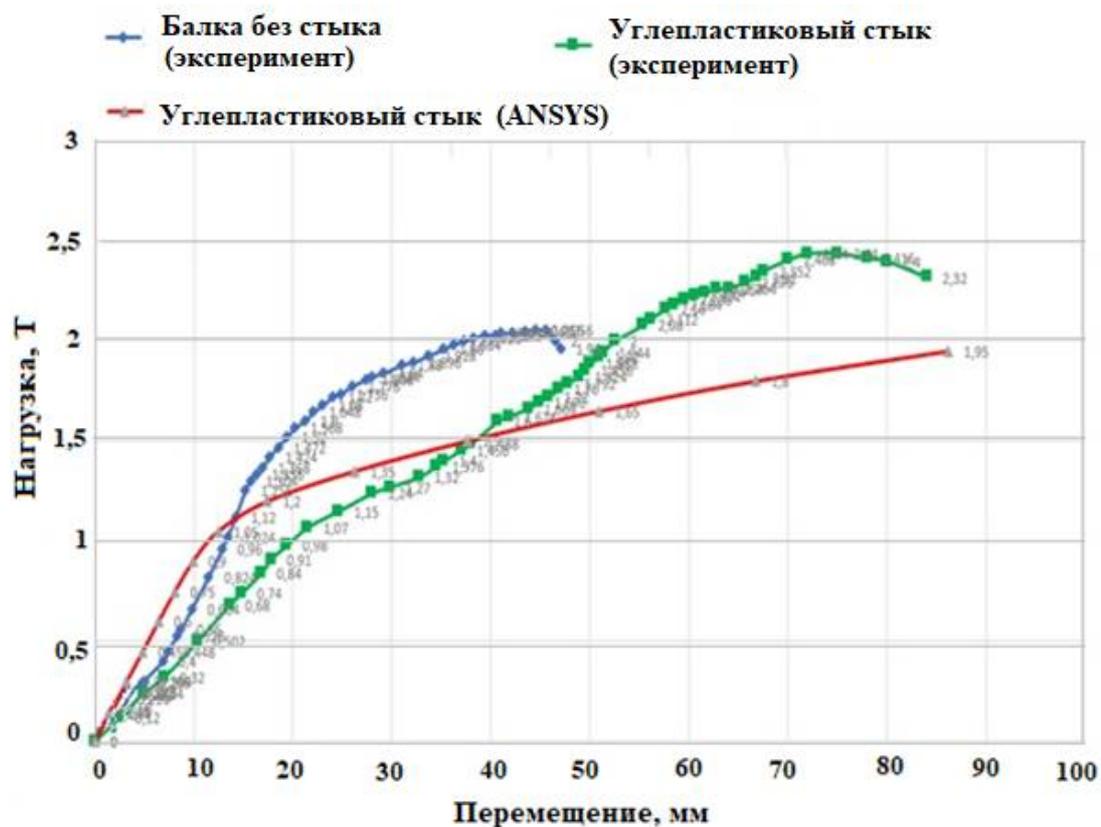


Рисунок 4.29 – Графики зависимости перемещений свободного конца балки от нагрузки в вычислительных и натуральных экспериментах

Экспериментальная оценка данных, полученных путем численного анализа, подтверждает правильность принятых решений при выборе расчетных характеристик и способа дискретизации модели в расчетном комплексе ANSYS.

Теоретические и фактические значения коррелируют между собой, разброс значений вызван несовершенством (пороками) структуры древесины, а также применением унифицированных характеристик примененных материалов.

Оценка итоговых величин усилий и перемещений в элементах конструкции показывают адекватность выбранной расчетной модели и возможность её применения для расчета реальных конструкций.

#### 4.4. Выводы по главе

В главе приведены численные и экспериментальные исследования жесткого стыка деревянных балок на вклеенных стержнях из углеродного композита – углепластика по двум схемам: балочной на четырехточечный изгиб и консольной на изгиб по трем точкам. Расчеты выполнены с применением программного комплекса ANSYS с учетом нелинейности, вызванной возникновением контактных пар по поверхностям трения и анизотропией используемых материалов. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Теоретические данные, данные, полученные в результате натурального эксперимента и данные, полученные с помощью численного моделирования и программного комплекса ANSYS, коррелируют между собой. Количественные значения, а также качественная картина перемещений, распределения напряжений и работы стыка соответствуют экспериментальным данным.

Разброс значений вызван наличием пороков древесины. Разрушение конструкций, соответственно теории, произошло в случае с четырехточечным изгибом в результате разрушения стыка, взаимного смещения слоев древесины и разрушения стержня. В случае с трехточечным изгибом разрушение произошло в связи с образованием пластического шарнира под опорой. Для обоих вариантов построены графики зависимости перемещений от нагрузки, показана картина распределения напряжений в древесине и деталях стыка, определены наиболее ответственные места вероятного разрушения конструкции.

В расчетном комплексе ANSYS построены изополя распределения напряжений и перемещений образцов, показаны контактные взаимодействия, возникающие внутри стыка, скрытые для регистрации при экспериментальном исследовании.

Исследования показали, что в определенных случаях, в условиях при которых применение стальных деталей не целесообразно, возможно применения

композитных материалов в узлах стыка изделий из цельной и клееной древесины.

Кратковременные испытания в целом показали жизнеспособные решения при проектировании узлов на клеенных стержнях, однако для полноты картины работы таких деталей необходимо проведение длительных экспериментов, включая огневые испытания и испытания на вибрационную нагрузку. Необходимо учесть старение композитов. Также длительный эксперимент призван показать совместную работу композита и древесины, поскольку, к примеру, стальные стержни со временем образуют оксидную коррозионную оболочку и после нескольких лет эксплуатации перестают обеспечивать изначальную совместную работу в гнездах древесины. Предполагается, что композитные решения стыков клееных деревянных конструкций будут лишены таких недостатков.

## **ГЛАВА 5. Расчет экономического эффекта от внедрения карбонового узла**

Непрерывно возрастающие объемы промышленного строительства, реконструкция предприятий и интенсификация производства требуют наиболее рационального использования средств с обеспечением нормальной эксплуатации производственных зданий и сооружений.

Здания и сооружения, как конечная продукция строительного производства, составляют значительную часть основных фондов и рассчитаны на длительную эксплуатацию. Они должны обеспечить размещение и нормальную эксплуатацию технологического оборудования, а также нормальную жизнедеятельность людей в условиях производства. Совокупность эксплуатационных свойств зданий и сооружений в значительной степени обеспечивается качеством и долговечностью строительных конструкций.

Качество строительных конструкций определяется совокупностью свойств несущих, ограждающих, несуще-ограждающих или специальных конструкций и конструктивных элементов, обуславливающих их пригодность удовлетворять определенным требованиям на стадии строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Качество строительных конструкций, деталей и изделий на стадии строительства зданий и сооружений должно отвечать требованиям нормативных документов по выполнению строительно-монтажных работ с минимальными трудовыми и материальными затратами.

Качество строительных конструкций на стадии эксплуатации зданий и сооружений характеризуется их техническими эксплуатационными свойствами, которые обеспечиваются безотказностью, ремонтпригодностью и долговечностью конструкций и конструктивных элементов, а также свойствами применяемых материалов. Совокупность этих свойств определяет надежность работы здания или сооружения в целом при заданных режимах эксплуатации и в заданном отрезке времени (сроке службы).

Долговечность строительных конструкций определяется свойством длительно сохранять работоспособность с необходимыми перерывами на ремонт, вплоть до предельного состояния, при котором их дальнейшая эксплуатация становится невозможной из-за физического износа, а восстановление экономически нецелесообразно. Качество и долговечность строительных конструкций способствуют качественному выполнению строительно-монтажных работ и сокращению количества ремонтов конструкций в течение срока службы здания или сооружения.

### **5.1. Методология расчета экономической эффективности**

Определение экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций является частным случаем определения эффективности использования новой техники. Поэтому установление оптимальных показателей качества и долговечности строительных конструкций с точки зрения их экономичности решается сопоставлением различных вариантов.

По каждому из сравниваемых вариантов рассчитываются затраты по формуле 5.1:

$$Z = Z_n + Z_o, \quad (5.1)$$

где  $Z_n$  – затраты, осуществляемые до начала эксплуатации зданий или сооружений;

$Z_o$  – затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации зданий или сооружений за срок службы  $T_c$ .

Затраты, осуществляемые до начала эксплуатации, это затраты на возведение сравниваемых конструкций. В них отражены прямые затраты на выполнение строительно-монтажных работ, определяемые по сметным нормам, ценникам и прейскурантам. При этом учитывается стоимость изготовления, затраты на транспортировку и монтаж конструкций, а также себестоимость их

отделки, защиты от коррозии и других работ, связанных с повышением качества и долговечности конструкций.

Затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации.

При сравнении строительных конструкций, срок службы которых равен сроку службы зданий или сооружений, затраты и издержки, осуществляемые в процессе эксплуатации зданий и сооружений, учитываются за весь срок их службы и определяются по формуле 5.2:

$$Z_э = C_{кр} + C_{тр} + C_{зк}, \quad (5.2)$$

где  $C_{кр}$  – затраты на один капитальный ремонт строительных конструкций;

$C_{тр}$  – затраты на один среднегодовой текущий ремонт конструкций;

$C_{зк}$  – затраты, связанные с восстановлением и поддержанием качества и долговечности конструкций, а также с проведением технического обслуживания (содержания) зданий или сооружений, не учтенного в составе капитальных и текущих ремонтов.

На начальной стадии опытного применения новых материалов и мероприятий, повышающих межремонтные сроки службы строительных конструкций, определение предварительного годового эффекта рекомендуется производить по формуле 5.3:

$$Э_{год} = (C1 - C2) A2, \quad (5.3)$$

где  $C1$  – себестоимость строительной конструкции с исходным уровнем долговечности;

$C2$  – скорректированная себестоимость конструкции повышенной долговечности (с увеличенным межремонтным сроком службы).

При этом себестоимость конструкции повышенной долговечности  $C2$  условно корректируется по формуле 5.4:

$$C_2 = C_{2пл} \frac{T_{ск}}{T_{нк}}, \quad (5.4)$$

где  $C_{2пл}$  – расчетная (плановая) себестоимость конструкций повышенной долговечности;

$T_{ск}$  и  $T_{нк}$  – межремонтные сроки службы конструкций соответственно прежней и повышенной долговечности.

Значение  $T_{ск}$  принимается по фактическим данным эксплуатации строительных конструкций в определенных условиях воздействия нагрузок и окружающей среды.

Значение  $T_{нк}$  прогнозируется на основе результатов предварительных экспериментальных или натуральных исследований.

## **5.2. Расчет экономической эффективности карбонового узла**

Оценка эффективности проекта выполнена в соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов», утвержденными Приказом Минэкономики России № ВК 477 от 21.06.1999 [72]. Определение экономической эффективности выполнено последовательным расчетом показателей:

- затраты, осуществляемые до начала эксплуатации;
- затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации;
- годовой экономический эффект;
- срок окупаемости.

Оценка эффективности выполнена путем сравнения вариантов: эталонного и предлагаемого. Эталонный вариант предусматривает применение стального узла для крепления несущих деревянных конструкций склада арочного типа и в дальнейшем обозначается как «Стальной узел». Предлагаемый вариант предусматривает применение узла из углепластиковых деталей и обозначается как «Карбоновый узел».

В качестве объекта для проведения мероприятий по применению строительных конструкций рассматривается типовой склад гранулированного хлористого калия.

Стоимость стального узла приведена в таблице 5.4, карбонового узла в таблице 5.2.

### 5.2.1. Определение экономической эффективности повышения качества и долговечности карбоновых узлов соединения

Исходные данные для расчета экономической эффективности приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатель	Ед. изм.	Стальной узел	Композитный узел	Примечание
Склад гранулированного хлористого калия				
Размеры склада	м <sup>2</sup>	210x45x30,2	210x45x30,2	
Площадь склада (210mx45м)	м <sup>2</sup>	9450	9450	
Количество арок	шт.	40	40	
Расстояние между арками	п.м.	6	6	
Количество узлов крепления на 1 арку	шт.	4	4	
Количество узлов крепления арок на склад	шт.	160	160	
Стоимость строительства, 1 м <sup>2</sup>	тыс. руб./м <sup>2</sup>	30	30	Аналог «Склад руды арочного типа»
Инвестиции в строительство склада	тыс. руб.	283578,40	283 500,00	-78,40
Горизонт расчета	годы	50	50	0
Срок эксплуатации склада	годы	25	50	25
Срок эксплуатации узла крепления	годы	10	50	40

Определение экономической эффективности повышения качества и долговечности карбоновых узлов соединения выполняется по формуле 5.5:

$$Z = Z_n + Z_o, \quad (5.5)$$

где  $Z_n$  – затраты, осуществляющимися до начала эксплуатации;

$Z_o$  – затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации.

Затраты на приобретение и монтаж узлов крепления являются затратами, осуществляющимися до начала эксплуатации ( $Z_H$ ) и затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации ( $Z_3$ ) сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Затраты, осуществляемые до начала и в процессе эксплуатации

Показатель	Ед. изм.	Стальной узел	Композитный узел	Отклонение: - экономия, + перерасход
<b>Затраты, осуществляемые до начала эксплуатации (<math>Z_H</math>)</b>				
Стоимость одного узла крепления, в том числе:	тыс. руб.	157,85	157,36	-0,49
стоимость материалов	тыс. руб.	73,92	153,27	79,35
стоимость монтажа	тыс. руб.	48,52	4,09	-44,43
стоимость антикоррозионной защиты	тыс. руб.	35,41	0,00	-35,41
<b>Стоимость узлов для всего склада, в том числе (<math>Z_H</math>) :</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>25 256,00</b>	<b>25 177,60</b>	<b>-78,40</b>
стоимость материалов	тыс. руб.	11 827,20	24 523,20	12 696,00
стоимость монтажа	тыс. руб.	7 763,20	654,40	-7 108,80
стоимость антикоррозионной защиты	тыс. руб.	5 665,60	0,00	-5 665,60
<b>Затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации (<math>Z_3</math>)</b>				
<b>Затраты на капитальный ремонт</b>				
Периодичность капитальных ремонт стальных узлов	годы	10	-	10
Количество капитальных ремонт стальных узлов	количество	1	0,00	1
Затраты один на капитальный ремонт стальных узлов, в том числе	тыс. руб.	33 019,20	0,00	-33 019,20
затраты на демонтаж	тыс. руб.	7 763,20	0,00	-7 763,20

Показатель	Ед. изм.	Стальной узел	Композитный узел	Отклонение: - экономия, + перерасход
затраты на капитальный ремонт (равны стоимости установки нового узла)	тыс. руб.	25 256,00	0,00	-25 256,00
Затраты на капитальный ремонт на весь срок эксплуатации	тыс. руб.	33 019,20	0,00	<b>-33 019,20</b>
Затраты на капитальный ремонт стальных узлов на 1 год эксплуатации	тыс. руб. / год	<b>3 301,92</b>	0,00	-3 301,92
Затраты на текущий ремонт				
Затраты на текущий ремонт стальных узлов, 20 % от стоимости капитального ремонта на весь срок эксплуатации	тыс. руб.	6 603,84	0,00	<b>-6 603,84</b>
Затраты на текущий ремонт стальных узлов на 1 год эксплуатации	тыс. руб. /год	<b>660,38</b>	0,00	-660,38
Затраты на инженерное обследование стальных и композитных узлов				
Периодичность инженерного обследования стальных и композитных узлов	годы	5	5	0,00
Количество инженерных обследований стальных и композитных узлов	количество	9	9	0,00
Стоимость инженерного обследования склада	тыс. руб.	4 000,00	4 000,00	0,00
Стоимость одного инженерного обследования стальных и композитных узлов (принята пропорционально сметной стоимости склада)	тыс. руб.	355,24	355,24	0,00

Показатель	Ед. изм.	Стальной узел	Композитный узел	Отклонение: - экономия, + перерасход
Затраты на инженерное обследование на весь срок эксплуатации	тыс. руб.	3 208,00	1604,00	-1604,00
Затраты на инженерное обследование на 1 год эксплуатации стальных узлов	тыс. руб. /год	<b>320,80</b>	160,40	<b>-160,40</b>
<b>Затраты на антикоррозийную защиту стального узла</b>				
Периодичность антикоррозийной защиты стальных узлов	годы	10	0,00	-10
Количество антикоррозийной защиты стальных узлов	количество	4	0,00	-4
Стоимость одной антикоррозийной защиты стальных узлов	тыс. руб.	5 665,60	0,00	-5 665,60
Затраты на антикоррозийную защиту на весь срок эксплуатации	тыс. руб.	22 662,40	0,00	<b>-22 662,40</b>
Затраты на антикоррозийную защиту стальных узлов на 1 год эксплуатации	тыс. руб. /год	<b>2 266,24</b>	0,00	-2 266,24
<b>Всего затрат, осуществляемых до начала и в процессе эксплуатации</b>				
Итого затрат, осуществляемых в процессе эксплуатации в расчете на год ( $Z_3$ )	тыс. руб. /год	6 549,34	160,40	-6 388,94
Всего затрат, осуществляемых в процессе эксплуатации на весь срок службы склада – 50 лет ( $Z_3$ )	тыс. руб.	327 467,00	8 020,00	-319 447,00
Затраты, осуществляемых до начала эксплуатации ( $Z_H$ )	тыс. руб.	283 578,40	283 500,00	-78,40
<b>Всего затрат (<math>Z = Z_H + Z_3</math>)</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>611 045,40</b>	<b>291 520,00</b>	<b>319 525,40</b>

Таким образом, при сравнении затрат, осуществляемых до начала и в процессе эксплуатации, экономия от применения карбоновых узлов за весь эксплуатационный срок составляет 319,53 млн руб.

### 5.2.2. Годовой экономический эффект

Определение предварительного годового эффекта выполняется по формуле 5.6:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = (C_1 - C_2) A_2, \quad (5.6)$$

Результаты расчета приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Годовой экономический эффект повышения долговечности карбоновых узлов

Показатель	Ед. изм.	Стальной узел	Композитный узел	Отклонение: - экономия; + перерасход
Годовой экономический эффект ( $\mathcal{E}_{\text{год}}$ )				
Амортизация 1 узла соединения	тыс. руб. /год	6,31	3,15	-3,17
Затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации в расчете на год	тыс. руб. /год	40,93	1,00	-39,93
Итого себестоимость стального узла соединения ( $C_1$ ) и расчетная (плановая) себестоимость композитного узла ( $C_{2\text{пл}}$ )	тыс. руб. /год	47,25	4,15	-43,10
Межремонтные сроки службы узлов соединения прежней и повышенной долговечности, ( $T_{\text{ск}}$ и $T_{\text{нк}}$ )	годы	10	50	+40
Коэффициент корректировки расчетной (плановой) себестоимости за счет увеличения долговечности, ( $T_{\text{ск}} / T_{\text{нк}}$ )	коэффициент	-	0,5	-

Скорректированная расчетная (плановая) себестоимость карбонового узла, ( $C_2$ )	тыс. руб. /год	-	2,075	-
Количество узлов соединения ( $A_2$ )	шт.	160	160	-
Себестоимость всего объема	тыс. руб.	7560,00	322,0	-7228,0
Годовой эффект $\mathcal{E}_{\text{год}} = (C_1 - C_2) A_2$	тыс. руб.	-	7228,0	-
Стоимость карбоновых узлов для всего склада, ( $Z_H$ )	тыс. руб.	-	25 177,60	-
Срок окупаемости карбоновых узлов	годы	-	3,48	-

Таким образом годовой экономический эффект применения карбонового узла составляет 7,23 млн руб. срок окупаемости равен 3,48 года.

Расчеты сметной стоимости стального и карбоновых узлов приведены в приложении 1.

### 5.3. Выводы по главе

Применение углепластиковых соединительных элементов по сравнению с использованием традиционных стальных в длительном рассмотрении оказывается более экономически целесообразным.

Изначально более высокая стоимость деталей и работ до начала эксплуатации компенсируется в будущем более низкой стоимостью эксплуатации. Это связано с менее дорогостоящими затратами на капитальные и текущие ремонты, инженерные обследования, антикоррозионную обработку и другими.

Расчетный срок окупаемости композитных узлов в текущих ценах на 2 квартал 2019 года составил 3,48 года по сравнению со стальными аналогами.

## Библиографический список

1. Дорожная карта «Использование нанотехнологии в производстве углеродных волокон и продуктов на их основе» / ГК «РОСНАНОТЕХ», 2010
2. М.М. Гаппоев, И.М. Гуськов, Л.К. Ермоленко, В.И. Линьков, Е.Т. Серова, Б.А. Степанов, Э.В. Филимонов. Конструкции из дерева и пластмасс. Учебник. – М: Издательство АСВ, 2004. – 440 с.
3. Лихтарников Я.М., Летников Н.С., Левченко В.Н, Техно-экономические основы проектирования строительных конструкций.- Киев-Донецк: Вища школа. – 1980. – С. 197-199.
4. Сарычев В.С. Эффективность применения железобетонных, металлических и деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1977. – С. 223.
5. Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте. / Материалы III Международной научно-технической конференции. – Самара, 2005. – 270 с.
6. СП 6 4.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». – М.: 2011. – 87 с.
7. Helifix. Stress Free Structural Solutions. London, 2001.
8. Helifix. Systemy naprawy i wzmocnienia konstrukcji murowych. Budosprzet. Bytom, 2001.
9. Столповский, Г. А. Соединение элементов деревянных конструкций быстровозводимых зданий и сооружений винтовыми крестообразными нагелями [Электронный ресурс] / Столповский Г. А., Жаданов В. И., Руднев И. В. // Вестник Оренбургского государственного университета, 2010. - № 5, май. - С. 150-154. - Библиогр.:с. 153-154. Электронный источник
10. Столповский, Г. А. Эволюция совершенствования нагельных соединений деревянных конструкций / Столповский Г. А., Шведов В. Н.,

Муртазина Л. А. // Прочность и разрушение материалов и конструкций : материалы V Междунар. науч. конф. , 12-14 марта 2008 г., Оренбург / науч. ред. С. Н. Летута, Г. В. Клевцов. - Электрон. дан. - Оренбург : ГОУ ОГУ, 2008. - Т. 2. - С. 157-161. . - 5 с. Электронный источник

11. Столповский, Г. А. Оценка влияния конструктивных параметров витого стержня крестообразного поперечного сечения на его несущую способность при выдергивании [Электронный ресурс] / Столповский Г. А., Лисов С. В., Аркаев М. А. // Известия высших учебных заведений. Строительство ,2013. - № 6 (654). - С. 130-136. . - 7 с. Электронный источник

12. Бойтемиров Ф.А., Зубарев Г.Н., Головина В.М. Испытание деревянной арки с соединениями на клеенных стержнях // Изв.вузов. Строительство и архитектура. 1983. – №126.

13. Бондин В.Ф, Евдокимов Б.И. Расчет прочности на выдергивание стальных стержней, клеенных в древесину // Изв.вузов. Стр-во и архитектура. – 1974. – №7. – С. 32-37.

14. Бондин В.Ф., Ардеев В.Н. Определение усилий и деформаций в деревянных балках, армированных на части длины // Облегченные конструкции покрытий зданий: Сб. науч. тр. / Ростовский инж.-строит. ин-т. – 1981. – С. 173-178.

15. Бондин В.Ф., Вылегжанин Ю.Б. О прочности на сдвиг клеевых соединений стальных стержней с древесиной // Изв. вузов Стр-во и архитектура. – 1976. – №11. – С. 20-25.

16. Бондин В.Ф., Вылегжанин Ю.Б. О расчете клеевых соединений стальных стержней с древесиной в сборных узлах и укрупнительных стыках клеенных деревянных конструкций // Строительные конструкции и архитектура: Тр. / Краснояр. политехн. ин-т. – 1975. – Вып.3. – С. 36-38.

17. Вдовин, В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: моногр. / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.

18. Вдовин, В.М. Экспериментальные исследования жёстких узлов балочных структур из клеёных деревянных элементов / В.М. Вдовин, Д.Д. Ишмаева // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 130-137.
19. Горбунов А.И, Неразрушающие методы контроля клеевых соединений строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1975. – 172 с.
20. Николаи Б.Л. Теория расчета нагельных соединений в деревянных конструкциях. – Харьков, Гостехиздат, 1935. – 62 с.
21. Власов, В. В. Метод начальных функций в задачах теории упругости и строительной механики // В. В. Власов. – М.: Стройиздат, 1975. – С. 223.
22. Пинайкин И.П. Работа стальных стержней, вклеенных поперек волокон древесины, в узлах деревянных конструкций: автореф. дис. канд. тех. наук. – Новосибирск, 1988. – 15 с.
23. Ву Ба Кiem. Исследование прочностных и деформационных свойств эпоксидных клеев и клеевых соединений на их основе: Автореф. Дис. канд. техн. наук. – М., 1989. – 15 с.
24. Вуба К.Т. Температурные напряжения в клеевых соединениях разнородных материалов // Изв.вузов. Стр-во и архитектура. – 1973. – №10. – С. 27-30.
25. Зубарев Г.Н., Логинова М.П., Головина В.М. Испытание и расчет соединений деревянных конструкций: Сб. науч. тр. / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 1981. – С. 83-92.
26. Иванов Ю.М., Линьков И.М., Соротокин В. М. Исследование влияния армирования на прочность и жесткость деревянных изгибаемых элементов // Разработка и исследование клеёных деревянных и фанерных армированных конструкций: Тр. / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 1972. – Вып.24. – С.13-30.
27. Касабьян Л.В., Шенгелия А.К. Конструкция клеештыревого соединения сжато-изгибаемых деревянных элементов на муфтах // Стр-во и архитектура.

Сер.8. Строит. конструкции: Экспресс-информ. (Отеч. И зарубеж. опыт) / ЦНИИС Госстроя СССР. – 1979. – Вып.9. – С. 19-22.

28. Овчинникова И.Г. Исследование клеенных деревянных ферм на клеенных стержнях // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – №4. – С. 70-83.

29. Овчинникова И.Г. Клееные деревянные конструкции с соединениями на клеенных стальных стержнях // Эффективное использование древесины и древесных материалов в современном строительстве: тезисы докладов Всесоюзного совещания. – М.: 1980. – С. 189-192.

30. Овчинникова И.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния клеенных в древесину стержней при выдергивании // Несущие деревянные конструкции: Сборник научных трудов / – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1981. – С. 25-28.

31. Соротокин В.М., Шолохова А.Б., Фрейдин А.С. О прочности и деформативности клеевого соединения арматуры с древесиной // Разработка и исследование клеенных деревянных и фанерных армированных конструкций: Тр. / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М. 1972. – Вып.24. – С. 40-46.

32. Турковский С.Б., Саяпин В.В. Исследование монтажных узловых соединений клеёных деревянных конструкций // Несущие деревянные конструкции: Сборник научных трудов / ЦНИИСК им. Кучеренко, – М., 1981. – С. 92-105.

33. Турковский С.Б., Ломакин А.Д., Погорельцев А.А. Зависимость состояния клееных деревянных конструкций от влажности окружающего воздуха // Промышленное и гражданское строительство. Труды института. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. 2012. – №3. – С. 30-32.

34. Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно клеенных стержней // Промышленное и гражданское строительство. Труды института. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2007. – №3. – С. 6-8.

35. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). – М.: РИФ «Стройматериалы», 2013. – 308 с.
36. Поспелов Н.Д., Тумас Е.В. О новых клеештыревых стыках несущих элементов деревянных пролетных строений мостов. – Балашиха. Московской области.: СоюздорНИИ, 1970. – С. 43.
37. Чихаев Н.А. Деревянные конструкции. – М., 1947. – 54 с.
38. Поспелов Н.Д., Тумас Е.В. О новых клеештыревых стыках несущих элементов деревянных пролетных строений мостов. – Балашиха. Московской области.: СоюздорНИИ, 1970. – С. 43.
39. Вылегжанин Ю. Б. Исследование работы соединений на клеенных в древесину стальных стержнях: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1980. – 18 с.
40. Колпаков С.В., Грохотов В.Н. Определение оптимального процента армирования и границ экономической эффективности применения армированных деревянных конструкций // Изв.вузов. Стр-во и архитектура. – 1978. – №2. – С. 25-29.
41. Дмитриев П.А. Исследование клеештырных рам со сборными узлами / Дмитриев П.А., Бондин В.Ф., Добрынин Ю.А., Сипаренко В.Г. // Изв.вузов. Стр-во и архитектура. – 1975. – №3. – С. 23-25.
42. Касабьян Л.В., Шенгелия А.К. Конструкция клеештыревого соединения сжато-изгибаемых деревянных элементов на муфтах // Стр-во и архитектура. Сер.8. Строит. конструкции: Экспресс-информ. (Отеч. и зарубеж. опыт) /ЦИНИС Госстроя СССР. – 1979. – Вып.9. – С. 19-22.
43. Шенгелия А.К. Исследование клеештыревых соединений деревянных элементов // Несущие деревянные конструкции. – М.: 1981. – С. 60-70.
44. Калугин А. В. Деревянные конструкции: учебное пособие для вузов. – М.: Издательство АСВ, 2008. – 286 с.
45. Гаппоев М. М. Конструкции из дерева и пластмасс – М.: Издательство АСВ, 2004. – 440 с.

46. Арленинов Д. К. Конструкции из дерева и пластмасс –М.: Издательство АСВ, -2002 г.
47. Иванов Ю.М. Длительная прочность древесины по результатам испытания образцов крупных размеров/ Ю.М. Иванов//ИВУЗ. Лесной журнал.- 1978.-№1,- С. 77-83.
48. Белостоцкий А.М. О вопросах автоматизации систем мониторинга для оценки текущего состояния строительных конструкций зданий и сооружений / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. - 2016. № 12. С. 26-34.
49. Бойко М.Д. Техническая эксплуатация зданий и сооружений/ М.Д. Бойко.- Кн. вторая.- М., Военное изд. Мин. обороны СССР, 1969. - 346 с.
50. Травуш В.И. О возможном квантовом характере деформации и разрушения композитов./ В.И. Травуш, В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина // Промышленное и гражданское строительство. – 2016 -№9. – С.94-100.
51. Хеммонд Р. Аварии зданий и сооружений /Р. Хеммонд. – М.: Госстройиздат, 1961.- 188с.
52. Шардаков И.Н. Натурное испытание строительных сооружений – шаг к повышению деформационной безопасности / И.Н. Шардаков // Вестник Пермского научного центра УрО РАН.- Пермь, 2014.-№4.-С.4-11
53. Баранов А.К. Пример применения наблюдательного метода при проектировании мероприятий / А.К. Баранов, И.Г. Анисимов, Н.Н. Фокин // Вестник НИЦ «Строительство» .- 2017.-№2(13).- С.6-15
54. М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова. Оценка влияния агрессивной среды на долговечность клееных деревянных конструкций // Строительство и реконструкция —2017 — №1(69) — стр. 100–103.
55. Иванов Ю.М. О точности определения параметров длительной прочности древесины/ Ю.М. Иванов//ИВУЗ. Лесной журнал.- 1984.- № 4. -С. 62-66.

56. Овчинский, А.С. Процессы разрушения композиционных материалов: имитация микро- и макромеханизмов на ЭВМ/ А.С. Овчинский.- М.: Наука, 1988.- 278 с.
57. Кононов Г.Н. Химия древесины и ее основных компонентов, учеб. для вузов, , М., изд. МГУЛ, 1999, -247 с., с ил.
58. Строение, свойства и качество древесины - 2000: Материалы III Междунар. симп.: 11-14 сент. 2000 г., Ин-т леса Карел. НЦ РАН, Петрозаводск, Россия. - Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. -309 с. Ин-т леса Карел. НЦ РАН, Моск. гос. ун-т леса. с.306-309. Рез. рус., англ.
59. Боровиков А.М. , Уголев Б.Н. Справочник по древесине, М., Лесная промышленность, 1989.
60. Ханов А.М., Сиротенко Л.Д., Храмцов Ю.Д. и др. Прогнозирование свойств термомеханически модифицированной древесины., Екатеринбург, – 1997. -142с.: ил.. - В надзаг.:Рос.АН. Урал.отд-ние. Ин-т техн.химии.
61. Джексон А., Дэй Д. Библия работ по дереву; пер. с англ. Ю.Е.Суслова.- Москва: АСТ: Кладезь, 2015. - 320 с. [ил.] - (Мастер Золотые руки).
62. Уголев Б. И. Древесиноведение с основами товароведения / Б. И. Уголев. - М. : МГУЛ, 2001. - 340 с.
63. Simpróle моделирование лесных полюсов механическое поведение / Альфредо MPGDias, Хосе S.Mahado, Жоао Н.Negrao // Утилиты полюс моделирование, биоресурсов. - 2012. - № 7 (3). - П.3439-3451.
64. Авдеев Ю. М. Сучковатость древесных стволов в насаждениях различного породного состава / Ю. М. Авдеев, С. А. Корчагов, Ю. Р. Осипов, Р. С. Хамитов // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса : междунар. науч.-техн. конф., 9-12 сентяб. 2012 г.: материалы конф. -Кострома, 2012. - С. 7-8.
65. Пинчевська А. Относительно технологии сушки круглых лесоматериалов / А. Пинчевська, В. М. Гловач, Н. В. Буйских // Вестник

Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. - 2013. - Вий. 185, Ч. 2. - С. 190-197

66. Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям: ГОСТ 16483.0-89 - [Введ.01.07.90]. - М. : Издательство стандартов, 1999. - 10 с.

67. Шолохова А.Б., Беккер А.В. Стойкость деревянных конструкций в агрессивных средах. – Состояние и перспективы исследований в области деревянных строительных конструкций. Сб. научн. трудов. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1983. – 157с.

68. Демешкин А. Г., А. А. Шваб. Влияние агрессивной щелочной среды на прочностные свойства технических волокон // Вестн. Сам. Гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – Новосибирск. –2013. – №2(31). –С. 36-41.

69. Демешкин А. Г., А. А. Шваб. Исследование механических свойств непрерывного базальтового волокна применительно к производству композитных материалов волокон // Вестн. Сам. Гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – Новосибирск. –2011. – №3(24). –С. 185-188.

70. Михайлов К. В. Перспективы применения неметаллической арматуры в пред напряжённых бетонных конструкциях // Бетон и железобетон. –2003. –№5. – С. 29-30.

71. Jongsung Sim, Cheolwoo park, Do Young Moon. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures // Composites Part B: Engineering. –2005. –Vol.36. –no 6-7. –Pp. 504-512.

72. Андреев, С.А. Применение стержневых соединений в деревянных конструкциях // Стройиндустрия. – 1930. – № 7, 8.

73. Маслов В.Н. Расчет болтового, работающего на разрыв стыка деревянной фермы как упругой системы // Сб. тр. Моск. ин. инж. трансп.- 1926.- Вып. 2. -С.114-119.

74. Иванов В.Ф. Исследование работы нагельных соединений в пределах упругости / В.Ф. Иванов, Л.И. Мальцев // Тр. Ленингр. инст. инженер, коммунал. строит., -1939.-С. 167-175.

75. Николаи Б.А. Теория расчета нагельного сопряжения в деревянных конструкциях / НДТВЧ, 1935.-164с.
76. Леняшин А. В. Исследование сопряжений на нагелях: научно-технический отчет лаборатории деревянных конструкций ЦНИИПС .- 1934 -1935 .-№ 4412-5100.
77. Донченко В. Г. Нагельные соединения в автодорожных мостах .- М.: Дориздат, 1952.- 255 с.
78. Слицкоухов Ю.В. Исследование работы симметричных сопряжений элементов деревянных конструкций на нагелях из круглой стали: автореф. дисс. канд. техн. наук .- М., 1956 .- 12с.
79. Коченов В.М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1953.- 320с.
80. Старцев О.В., Махоньков А.Ю., Молоков М.В., Ерофеев В.Т., Гудожников С.С. Исследование молекулярной подвижности и температуры стеклования полимерных композитов на основе древесины методами динамической механической спектроскопии. //Фундаментальные исследования. №5. 2014 г. – с. 1177-1182.
81. Bucur V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. Berlin, 2003
82. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI, 1994. 40 p
83. Чубинский А.Н., Медов В.С. Обоснование методики испытаний клеевых соединений древесины на прочность при скалывании. // Известия Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии им. С.М. Кирова - СПб.: СПбГЛТУ, 2015. Вып. 210, 180 - 189 с.
84. Дунаев В.Ф. Об изменчивости модуля упругости и предела прочности древесины в технологическом цикле // Лесной журнал. №3. Архангельск, 2014. С. 106-112.
85. Чубинский А.Н., Медов В.С., Славик Ю.Ю. К вопросу оценки долговечности деревянных клееных конструкций // Известия

СанктПетербургской лесотехнической академии. Вып. 206. СПб.: ЛТУ, 2013. С. 128-134.

86. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

87. Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций. - Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1972, № 2, С. 6-12.

88. Линьков В.И. Несущая способность и деформативность соединений деревянных конструкций на наклонных стержнях без применения клея .— Автореф. на соиск. уч. ст. к.т.н. – М.: МИСИ .–1988

89. Методы статических испытаний армированных пластиков. Справочное пособие .– «Зинатие», Рига, 1972.

90. Белянкин, Ф.П. Метод расчета деревянных конструкций по предельным состояниям и задачи исследования длительной сопротивляемости древесины // Исследования прочности и деформативности древесины: сб.-М., 1956.- С. 198-259.

91. Белянкин, Ф.П., Яценко В.Ф. Деформативность и сопротивляемость древесины как упруго-вязко-пластического тела / Изд. АН УССР, 1957- 194 с.

92. Кашеварова Г. Г., Водяников М.А., Численное и экспериментальное моделирование жесткого стыка слоистых деревянных конструкций // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering .– 2017 .– № 2 .– С. 84-92.

93. Vodiannikov M., Kashevarova G., Analysis of Wood Structure Connections Using Cylindrical Steel and Carbon Fiber Dowel Pins // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [Электронный ресурс]. - 2017. - Vol. 205.

94. М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова. Сравнительный анализ работы соединений деревянных конструкций на стальных и углепластиковых нагелях // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук — 2017 — №20

95. М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова. Анализ возможностей совместного применения углепластиков и клееной древесины, работающих в

агрессивной среде // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии — 2016 — №6.

96. М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова, П.С. Штро. Деформативность и несущая способность узлов стыка деревянных конструкций на стальных и углепластиковых нагелях // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии — 2017 — №9.

97. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах. – М : КомпьютерПресс. – 2002. —224 с.

98. М. А. Водяников. Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния стыкового соединения деревянных конструкций на углепластиковых нагелях // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering — 2018 — iss. 2 — pp. 48–56

99. М. А. Водяников, А. В. Воробьев. Оценка работы соединений деревянных конструкций на стальных и углепластиковых цилиндрических нагелях // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика — 2017 — №1 — стр. 159–169

100. М. А. Vodiannikov, G. G. Kashevarova. Composite Materials in the Fasteners of glued wooden Structures Pins // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering — 2018 — Vol. 456

101. М. А. Vodiannikov, G. G. Kashevarova. Composite Solutions For Glulam Joints // Key Engineering Materials — 2019 — Vol. 801

102. Станкевич И. В., Яковлев М. Е., Си Ту Хтет. Математическое моделирование контактного взаимодействия упругопластических сред .- М.: НП «Нейкон» .- 2012.

103. Перепелкин К. Е. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы – СПб.: Издание СПГУТД. – 2008. – 354 с.

104. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. – М.: ФИЗМАТЛИТ. - 2013. – 352 с.

105. Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. Монография. - Киев: Наук. Думка. - 1989. — 232 с.

106. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология, М: Техносфера. – 2004. – 408с.

107. Симамура С. Углеродные волокна. Пер. с япон., М. : Мир. – 1987/

108. G. Gugutsidze, F. Draskovic // Slovak Journal of Civil Engineering. -2010. №2, -Р. 1-6.

109. *М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова.* Композитные решения стыков клееных деревянных конструкций // Сборник трудов РААСН – 2018 –Том 2.

# Приложение 1



Акционерное общество «ВНИИ Галургии»  
(АО «ВНИИ Галургии»)



## АКТ

об использовании результатов  
кандидатской диссертационной работы  
Водяникова Михаила Алексеевича

Комиссия в составе:

председатель Дроздов А.А.

члены комиссии: Агапов В.Н., Фаизов И.Н., Тонков Ю.Л.

составили настоящий акт о том, что методика расчета безметалльных узлов сопряжения деревянных конструкций, разработанная в диссертационной работе «**Несущая способность и деформативность углепластиковых нагельных соединений деревянных конструкций, работающих в агрессивной среде**» предоставленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, является эффективной и планируется для использования в проектно-конструкторской деятельности АО «ВНИИ Галургии» при проектировании большепролетных складов хранения соли.

Использование результатов исследования позволяет повысить надежность и долговечность клееных деревянных конструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде калийных предприятий.

Председатель комиссии:

Дроздов А.А.	/		/	17.12.2019г
		подпись		дата

Члены комиссии:

Агапов В.Н.	/		/	17.12.2019
		подпись		дата
Фаизов И.Н.	/		/	17.12.2019
		подпись		дата
Тонков Ю.Л.	/		/	17.12.2019
		подпись		дата

## **Приложение 2**

Расчеты сметной стоимости стального и композитного узлов

## Расчет стоимости стального узла

Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат	Ед. изм.	Кол-во	Общая стоимость, руб.	
				в базовых ценах 2001 г.	в текущих ценах 2 кв. 2019 г.
Спецификация элементов на отправочную полуарку ПА1 (количество-43 шт.)					
<b>ФЕР07-01-044-04</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Установка монтажных изделий массой: более 20 кг (детали Д1, Д2, Д5, Д6)	т	19,3156	227182	1 583 459
<b>ФССЦ-07.2.07.12-0006</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	<i>Конструктивные элементы вспомогательного назначения: с преобладанием профильного проката собираемые из двух и более деталей, с отверстиями и без отверстий, соединяемые на сварке</i>	т	-19,32	-194069	-1 352 661
<b>ФССЦ-08.4.01.02-0013</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Детали закладные и накладные изготовленные: с применением сварки, гнутья, сверления (пробивки) отверстий (при наличии одной из этих операций или всего перечня в любых сочетаниях) поставляемые отдельно	т	19,3156	131346	915 482
<b>ФЕР07-01-044-03</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Установка монтажных изделий массой: до 20 кг (детали Д4, Д7)	т	1,923	23590	164 422
<b>ФССЦ-07.2.07.12-0006</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Конструктивные элементы вспомогательного назначения: с преобладанием профильного проката собираемые из двух и более деталей, с отверстиями и без отверстий, соединяемые на сварке	т	-1,923	-19317	-134 639
<b>ФССЦ-08.4.01.01-0022</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Анкерные детали из прямых или гнутых круглых стержней с резьбой (в комплекте с шайбами и гайками или без них),: поставляемые отдельно	т	1,923	19422	135 371
<b>ФССЦ-01.7.15.11-0021</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Шайбы	т	0,0516	413	2 879
<b>ФССЦ-01.7.15.05-0017</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Гайки шестигранные диаметр резьбы: 24 мм	т	0,43	3541	24 681
<b>ФЕРр69-2-4</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Сверление отверстий: в деревянных конструкциях электродрелью диаметром до 10 мм глубиной до 20 см (для детали Д4)	100 шт.	8,6	1756	12 239

Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат	Ед. изм.	Кол-во	Общая стоимость, руб.	
				в базовых ценах 2001 г.	в текущих ценах 2 кв. 2019 г.
<b>ФЕРр69-2-5</b> <i>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Сверление отверстий: на каждые 5 см глубины свыше 20 см добавлять к расценке 69-2-4: к=2 до глубины 30 см (для детали Д4)	100 шт.	8,6	880	6 134
<b>ФЕРр69-2-6</b> <b>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</b> <i>прим.</i>	Сверление отверстий: на каждые 10 мм диаметра свыше 10 мм добавлять к расценке 69-2-4: к=2 до диаметра 26 мм (для детали Д4)	100 шт.	8,6	1231	8 580
<b>ФЕРр69-2-4</b> <i>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Сверление отверстий: в деревянных конструкциях электродрелью диаметром до 10 мм глубиной до 20 см (для детали Д7)	100 шт.	6,88	1404	9 786
<b>ФЕРр69-2-6</b> <b>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</b> <i>прим.</i>	Сверление отверстий: на каждые 10 мм диаметра свыше 10 мм добавлять к расценке 69-2-4 до диаметра 21 мм (для детали Д7)	100 шт.	6,88	492	3 429
<b>Установка полуарок</b>					
<b>ФЕР07-01-044-04</b> <i>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Установка монтажных изделий массой: более 20 кг (деталь Д8)	т	27,8141	327138	2 280 152
<b>ФССЦ-07.2.07.12-0006</b> <i>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Конструктивные элементы вспомогательного назначения: с преобладанием профильного проката собираемые из двух и более деталей, с отверстиями и без отверстий, соединяемые на сварке	т	-27,81	-279351	-1 947 076
<b>ФССЦ-08.4.01.02-0013</b> <i>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Детали закладные и накладные изготовленные: с применением сварки, гнутья, сверления (пробивки) отверстий (при наличии одной из этих операций или всего перечня в любых сочетаниях) поставляемые отдельно	т	27,8141	189136	1 318 278
<b>ФЕР13-06-002-01</b> <i>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Очистка кварцевым песком: сплошных наружных поверхностей	м2	82,56	4964	34 599
<b>ФЕР13-06-004-01</b> <i>Приказ Министра России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Обеспыливание поверхности	м2	82,56	202	1 408

Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат	Ед. изм.	Кол-во	Общая стоимость, руб.	
				в базовых ценах 2001 г.	в текущих ценах 2 кв. 2019 г.
<b>ФССЦ-04.3.02.09-1101</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Состав анкерный цементный гибкий безусадочный "БИРСС 59 С- 1" (марка М600)	т	8,4211	30863	215 115
<b>ФССЦ-01.7.03.01-0001</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Вода	м3	1,1166	3	21
<b>ФЕР46-08-003-03</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Приготовление ремонтного состава	м3	4,2106	528	3 680
<b>ФЕР46-08-012-05</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Установка анкеров в отверстия глубиной 100 мм с применением химического анкера, диаметр анкера: 20 мм и более (диам.24 мм)	100 шт.	3,44	1356	9 451
<b>ФЕР46-08-012-10</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	На каждые 10 мм изменения глубины отверстия добавлять (уменьшать) к расценке: 46-08-012-05: к=2 до глубины 310 мм	100 шт.	3,44	246	1 715
<b>Прайс-лист</b>	Шпилька HIT-V-R M24x450 с гайкой	шт.	344	257739	1 796 441
<b>Прайс-лист</b>	Химический анкер HIT-RE 500 V3 500 мл	шт.	81	62881	438 281
<b>Антикоррозионная защита металлоконструкций</b>					
<b>ФЕР13-07-001-02</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Обезжиривание поверхностей уайт-спиритом	100 м2	9,2805	4209	29 337
<b>ФЕР13-06-002-02</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Очистка кварцевым песком: решетчатых поверхностей	м2	928,05	70266	489 754
<b>ФССЦ-02.3.01.07-0004</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Песок кварцевый ЛПК-5	кг	35265	9169	63 908
<b>ФЕР13-06-004-01</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Обеспыливание поверхности	м2	928,05	2268	15 808
<b>ФЕР13-03-002-13</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Огрунтовка металлических поверхностей за один раз: покрытием Amercoat 236	100 м2	9,2805	9746	67 930
<b>ФЕР13-03-004-11</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Окраска металлических огрунтованных поверхностей: покрытием Amercoat 236 за 1 раз	100 м2	9,2805	9077	63 267
<b>Прайс-лист</b>	Эпоксидное покрытие Amercoat 236 (расход-0,375 л/м2 на 2 слоя толщ. 300 мкм)(к=4,98 3 кв.2018г.)	л	382,8206	47558	331 479

Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат	Ед. изм.	Кол-во	Общая стоимость, руб.	
				в базовых ценах 2001 г.	в текущих ценах 2 кв. 2019 г.
<b>Прайс-лист</b>	Разбавитель Amercoat 65 (10% от кол-ва краски) (к=4,98 3 кв.2018г.)	л	382,8206	27977	195 000
	<b>Всего по смете</b>			973 846	6 787 707
	<b>на 1 узел (43 шт.), в том числе:</b>			<b>22 648</b>	<b>157 854</b>
	материалы			10 605	73 918
	монтаж			6 963	48 529
	антикоррозионная защита металлоконструкций			5 080	35 406

### Расчет стоимости карбонового узла

Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат	Ед. изм.	Кол-во	Общая стоимость, руб.	
				в базовых ценах 2001 г.	в текущих ценах 2 кв. 2019 г.
<b>ФЕР46-08-012-05</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Установка анкеров в отверстия глубиной 100 мм с применением смесей серии MASNERFLOW, обеспыливание, заполнение составом, установка анкеров	100 шт.	222	53	372
<b>ФЕР46-08-012-10</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	На каждые 10 мм изменения отверстия добавлять (уменьшать) к расценке: 46-08-012-05	100 шт.	180	43	301
<b>Прайс-лист</b>	Стержень из углепластика д.18 мм, дл. - 1000 мм	шт.	15	361	2 518
<b>ФССЦ-14.1.05.04-0107</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Клей эпоксидный	кг	73	473	3 298
<b>ФЕР07-01-044-03</b> <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Установка монтажных изделий массой: до 20 кг пластина, углепластик	т	11 140	490	3 416
<b>Прайс-лист</b>	Пластина из углепластика 2500x280x20 мм	шт.	10 578	21 156	147 458
	<b>Всего по смете на 1 узел, в том числе:</b>			<b>22 577</b>	<b>157 362</b>
	Материалы			21 990	153 273
	Монтаж			587	4 090