

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

Деревянные конструкции с применением когтевых
шайб и учетом начальных напряжений древесины

В. Н. Глухих, А. Г. Черных, Е. В. Данилов

В. Н. Глухих, А. Г. Черных, Е. В. Данилов

Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины

Монография

Санкт-Петербург
2018 г.

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

В. Н. Глухих, А. Г. Черных, Е. В. Данилов

**ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
КОГТЕВЫХ ШАЙБ И УЧЕТОМ НАЧАЛЬНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ**

Монография

Санкт-Петербург
2018

УДК 674.047

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор В. И. Онегин
(Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет);
д-р техн. наук, профессор Б. В. Лабудин
(Северный арктический федеральный университет)

Глухих, В. Н.

Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины: моногр. / В. Н. Глухих, А. Г. Черных, Е. В. Данилов; СПбГАСУ. – СПб., 2018. – 284 с.

ISBN 978-5-9227-0880-7

Раскрываются особенности появления начальных напряжений в древесине, их влияние на качество и прочность строительных конструкций и их деталей.

Показано, что применение теории наследственности деформаций вязкоупругих тел для нагельных соединений с когтевыми шайбами в инженерной древесине позволяет учесть давление кратковременных и длительных нагрузок на характер деформируемости. Предложены методики, имеющие практическое значение для проектирования сечений клееных конструкций и расчета ферм из однонаправленного клееного шпона, подтвержденные результатами экспериментальных исследований.

Предназначена для специалистов, занятых в области изготовления клееных деревянных конструкций и строительства зданий и сооружений с применением конструкций с узловыми соединениями, включающих участие когтевых шайб.

Ил. 148. Табл. 27. Библиогр.: 151 назв.

ISBN 978-5-9227-0880-7

© В. Н. Глухих, А. Г. Черных, Е. В. Данилов, 2018
© Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, 2018

Введение

Древесина издавна используется человеком в самых разных отраслях народного хозяйства, в частности в строительстве. При этом все более полно используются природные особенности древесины как стройматериала.

В природе дерево находится под действием нагрузки от собственного веса, веса кроны и осадков, а также ветровой нагрузки. В процессе роста строение и форма ствола формируются таким образом, чтобы достичь максимальной прочности при продольном сжатии и изгибе. В значительной степени именно эти свойства всегда использовались при строительстве сооружений и зданий, производстве механизмов, предметов быта и кораблей.

Природа в процессе эволюции создала совершенные биологические конструкции, обладающие высокой прочностью. Человек в процессе производства стремится создавать подобное и добиться максимальной прочности при минимальном весе конструкции, используя материалы с заранее заданными свойствами. В природе же подобные материалы формируются естественным путем: наиболее прочные волокна древесины совпадают по направлению с главными напряжениями и деформациями.

Используя изучение природных конструкций, можно работать над созданием материалов с наперед заданными свойствами. Примерами таких высокопрочных конструкций из дерева могут служить фанера, клееные балки из шпона, фермы, гнутоклееные конструкции и т. д. Наибольшее развитие получает создание композиционных материалов с использованием полимеров, металлов, волокон углерода и т. д. Широкое применение в технике получают изделия, изготовленные из стеклопластиков, в том числе и намоточных, которые своим строением

с цилиндрической анизотропией похожи на древесину с ее годичными слоями.

Дерево представляет собой предварительно напряженную стержневую конструкцию, которая соответственно находится в напряженно-деформированном состоянии. Ему соответствуют размеры и форма сечений ствола, оно проявляет себя в технологии производства изделий из древесины и в процессе эксплуатации готовых изделий.

На данный момент существует исчезающе малое количество исследований, в которых изучались бы влияние напряженно-деформированного состояния, сформировавшегося в процессе роста дерева, на прочность и жесткость изделий и заготовок из древесины, а также их качество. Продольные напряжения в периферийных зонах сечений ствола дерева и в их центре достигают предельных значений; таким образом, речь идет о пределах прочности древесины при сжатии (в центре ствола) и растяжении (в периферийной зоне сечений).

Неизвестным остается также напряженно-деформированное состояние каждой доски, выпиливаемой из бревна. Начальные напряжения в доске могут кардинально повлиять на ее качество в процессе технологической обработки. Например, практика сушки пиломатериалов подтверждает, что 3–5 рядов в верхней части сушильного штабеля практически полностью состоят из покоробленных досок, которые уходят в брак, так как их дальнейшее использование проблематично. Объемы потерь при сушке древесины велики, что отмечается в большинстве работ, посвященных сушке древесины.

Равномерное распределение конечной влажности по сечению пиломатериалов, отсутствие в них заметных остаточных напряжений (при использовании современных сушильных камер и режимов сушки с учетом компьютерных технологий) не могут предотвратить появляющегося в досках коробления, особенно при сушке до конечной влажности в 10–12 %.

В древесине, как в природном материале с криволинейной анизотропией, даже при отсутствии градиента

гигроскопической влажности возникнут напряжения, причиной которых будут анизотропия свойств древесины и наличие начальных напряжений, сформировавшихся в процессе роста дерева. Такие начальные напряжения и являются главной причиной появления продольного по пласти и кромке коробления пиломатериалов.

Если воспользоваться условной классификацией причин образования дефектов на две группы [7], то по первой группе существует большой перечень работ отечественных и зарубежных исследователей, чего нельзя сказать о второй группе причин. Первая группа – технологические причины, связанные с технологией формирования сушильных штабелей, совершенством конструкций сушильных камер и режимов сушки; вторая связана с анизотропией древесины и ее влиянием на качество получаемых сухих пиломатериалов. Сюда же входит влияние анизотропии сушки, анизотропии физико-механических характеристик древесины и наличия поля начальных напряжений, сформировавшихся в процессе роста дерева, на качество получаемого материала.

Обе группы причин поддаются управлению, регулированию и совершенствованию: первая – изменением технологии сушки и улучшением конструкций сушильных камер, вторая – путем составления и применения таких схем раскроя бревна, которые позволят получить пиломатериалы с менее резко выраженной анизотропией с учетом напряженно-деформированного состояния, образовавшегося в момент распиловки бревна.

Не существует полных исследований, изучающих влияние начальных напряжений, сформировавшихся в процессе роста дерева, на прочность пиломатериалов, в том числе клееных балок. Все еще остается нерешенным вопрос большого брака при сушке древесины (от 10 до 44 % по разным источникам).

Одно из наиболее широко применяемых видов закреплений элементов строительных конструкций из древесины – нагельное соединение. С применением новых материалов, повышающих несущую способность (в сравнении с цельной

древесиной или КДК) используется меньшее сечение, при котором не всегда возможно разместить необходимое число нагелей ввиду недостаточной площади для постановки соединителей. В таких ситуациях целесообразно использование когтевых шайб, обеспечивающих высокую несущую способность соединения при малой используемой площади постановки крепежа. Характер работы данных шайб в соединениях деревянных конструкций на данный момент изучен недостаточно.

С начала XX века на многих учебных и производственных предприятиях мира разрабатывались и исследовались конструкции с использованием когтевых шайб. В Советском Союзе разработкой новых видов и методик расчета когтевых шайб занимались такие ученые, как Леннов В. Г., Котов Н. Ф. Серьезный вклад в развитие методик расчета соединений с когтевыми шайбами внесли европейские ученые, такие как *Blass H. J., Schlager M. N., Mettem C. J., Page A. V., Hirashima Y., Rimantas C.* На основании результатов этих исследований были изданы нормативные документы и рекомендации на проектирование и производство соединений конструкций на когтевых шайбах, нашедшие отражение в *Eurocode 5*. С развитием отрасли появляются новые виды инженерной древесины, которые имеют повышенные прочностные и эксплуатационные характеристики по сравнению с цельной. Зарубежный опыт применения конструкций из инженерной древесины с когтевыми шайбами показал большую эффективность получаемых строительных изделий по сравнению с использованием нагельных соединений. Были сокращены сроки строительства, увеличены прочность и жесткость соединений конструкций.

Специальных исследований, направленных на повышение эффективности расчета соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из инженерной древесины, в нашей стране не проводилось. Отсутствуют исследования длительной несущей способности соединений с когтевыми шайбами в конструкциях, нет информации о коэффициентах постели при использовании инженерной древесины и штампах

различных форм. Существующие стандарты позволяют выполнить прогноз деформативности соединений только для длительного периода времени (более 50 лет) и только для соединителей, выполненных по стандарту *EN 912*; при этом используется значительный запас прочности, учитывающий фактор неизученности работы соединения.

В работе приведены математические модели изгибающих моментов по пласти и по кромке досок, позволяющие оценить прочность клееных деревянных конструкций при изгибе. Полученные аналитическим путем уравнения устанавливают взаимосвязь между пределами прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон при распределении начальных напряжений по объему ствола дерева по закону параболоида 4-го порядка.

Также в работе представлена методика теоретических и экспериментальных исследований соединений конструкций из инженерной древесины с использованием когтевых шайб, рассмотрена полезная модель конструкции для запрессовки когтевых шайб, описано авторское оборудование для выполнения экспериментальных исследований.

Глава 1. АНИЗОТРОПИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ КАК ПРИРОДНОГО СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Древесина – материал неоднородного строения, причем эта неоднородность является результатом роста дерева; свойства древесины по ее объему распределены неравномерно.

В таком материале с криволинейной анизотропией даже при равномерном по всему объему снижении гигроскопической влажности (или температуры) возникнут внутренние напряжения, в отличие от изотропных тел. Величина этих напряжений полностью зависит от неодинаковости физико-механических свойств в различных структурных направлениях. Появляющиеся внутренние напряжения являются первопричиной многих дефектов и препятствуют улучшению качества технологических режимов обработки древесины.

Экспериментальные исследования такого материала, как древесина, показывают большое различие между характеристиками упругости, прочности, коэффициентами усушки в различных структурных направлениях. Древесина является сильно анизотропным материалом; материалы, созданные на основе древесины, можно рассматривать как анизотропные.

В большинстве случаев круглые сортименты перед дальнейшим использованием вначале распиливают на пиломатериалы и заготовки, которые затем высушивают до нужной конечной влажности в специальных сушильных камерах. Для лесопиления и сушки существуют специально разработанное оборудование и компьютерные технологии, которые позволяют получать материалы достаточно высокого качества для дальнейшего использования.

При раскрое бревен на пиломатериалы получают доски с различно выраженной анизотропией в зависимости от угла наклона годовичных слоев к пласти; таким образом получают радиальные, полурadiальные и тангенциальные пиломатериалы.

Современные станки позволяют распиливать бревна по индивидуальным схемам раскроя и учитывать размерно-качественные зоны пиловочника при выпиливании каждой доски. Сушильные камеры с компьютерным управлением режимами и параметрами сушки позволяют получать сухие пиломатериалы с равномерным распределением конечной влажности по их толщине при отсутствии заметных остаточных напряжений. Тем не менее, даже при наличии подобного оборудования и в таких условиях часть сухих пиломатериалов понижает свою сортность, а часть переходит в технический брак из-за различного вида покоробленности и торцово-пластовых и пластовых трещин.

Практика сушки пиломатериалов говорит о том, что доски, расположенные в одном и том же ряду сушильного штабеля, могут разительно отличаться по качеству друг от друга. Чаще всего сохраняют свое качество радиальные и полурadiальные пиломатериалы. Тангенциальные пиломатериалы понижают сортность из-за пластовых трещин; сердцевинные доски высушивать без пластовых трещин практически невозможно.

В практике сушки, например, известно, что при камерной сушке значительно снижается качество тангенциальных пиломатериалов, хорошее же качество сохраняют радиальные и полурadiальные пиломатериалы. Это является практическим подтверждением влияния свойств анизотропии древесины на ее напряженное состояние в процессах дальнейшей обработки.

Основными дефектами сушки являются: торцово-пластовые и пластовые трещины, коробление, значительные остаточные напряжения. Нереализованное поперечное коробление доски при сушке в зажатом состоянии влияет на величину напряжений усушки, и из-за этого возрастает

опасность появления пластевых трещин. Исследования Глухих В. Н. доказывают, что сила, необходимая для предотвращения поперечного коробления, сильно зависит от места расположения доски в поставе при составлении схемы раскроя бревна.

Стоит отдельно выделить, что напряжения усушки возникнут в древесине как анизотропном теле независимо от характера снижения гигроскопической влажности по сечению. Второй случай будет лишь усугублять в той или иной степени напряженное состояние, причем этот случай будет являться результатом воздействия режима сушки. В зависимости от его жесткости внутренние напряжения в пиломатериалах за счет градиента гигроскопической влажности по толщине могут быть безопасными или, суммируясь с напряжениями, возникшими за счет анизотропии усушки древесины, превысить предельные значения, что закономерно приведет к появлению трещин и изменению формы сечения.

Возникающие в пиломатериалах напряжения усушки являются главным препятствием для ужесточения режимов сушки. Сильная анизотропия усушки приводит к тому, что необходимо поддерживать минимальный градиент влажности по толщине доски на всем протяжении сушки.

При механической обработке покоробленных сухих досок может произойти раскалывание их по пласти от воздействия падающих вальцов в станках.

Известно, что для снижения остаточных напряжений усушки в пиломатериалах можно применить прокатку их под нагрузкой специальными валками. А для выбора наиболее эффективной схемы прокатки – по пласти или по кромке – необходимо знать закономерности распределения напряжений в таких случаях по сечению доски.

Существуют теоретические исследования, анализирующие и дополняющие стандартные методики определения постоянных упругости и коэффициентов сушки для получения более полной информации об анизотропии древесины.

Прочность при изгибе пиломатериалов конструкционного назначения можно установить по величине модуля

продольной упругости как это делается при прочностной сортировке конструкционных пиломатериалов.

При выборе пиломатериалов конструкционного назначения необходимо оценивать не только их прочность, но и усушку их пластей. Количественно усушка оценивается коэффициентом усушки, который зависит, как и модуль упругости, от угла наклона волокон и годовичных слоев древесины.

В согласии с теоретическими выкладками в круглых пластинках из сосновой древесины напряжение усушки при отсутствии градиента гигроскопической влажности составляет не менее 35,6% от напряжения из-за градиента влажности.

Так как древесина – анизотропный материал, ее прочность различается в разных направлениях; различаются пределы прочности при сжатии вдоль волокон, растяжении и изгибе.

1.1. Строительные материалы на основе использования древесины. Достоинства и недостатки

На данный момент существует большое разнообразие строительных материалов на основе древесины: бревна, различного вида пиломатериалы, фанера, древесно-стружечные плиты (листовые композиционные материалы), клееные и гнутоклееные конструкции, в том числе и *LVL*, клееные конструкции с армированием стальными и полимерными стержнями и сетками, обработанные пиломатериалы различными пропитками и технологическими способами, защищенные с внешней стороны полимерами-оболочками, и т. д.

Обыкновенные пиломатериалы отличаются простотой технологического производства (в сравнении иными материалами на основе древесины), но в отношении прочности и других эксплуатационных свойств они проигрывают.

Соответственно, различного вида композиционные материалы на основе древесины показывают намного более

высокую прочность, нежели простые клееные строительные материалы, но производство подобных сложных конструкций требует дополнительных экономических вложений, в том числе и трудозатрат.

Существуют исследования, показывающие зависимость повышения прочности и грузоподъемности строительных деревянных конструкций (в т. ч. клееных балок) от использования более тонких заготовок-досок в пакете конструкции.

В данном исследовании приведены теоретические выкладки подобной зависимости, а также зависимости повышения прочности и грузоподъемности балки от ориентации годовых колец заготовок-досок в пакете балки. Таким образом, теоретически доказывается возможность повышения прочности строительных конструкций при использовании тех же исходных материалов без необходимости дополнительных капитальных вложений.

1.2. Обоснование причин появления дефектов в конструкционных пиломатериалах и изделиях из них в технологическом процессе их производства

Отечественное лесопиление имеет сравнительно низкий уровень экономии древесины. При выпуске экспортных пиломатериалов попутная продукция составляет 25–30 % – это пилопродукция низших сортов. Одна из причин высокого объема попутной пилопродукции – дефекты сушки и механической обработки. Для повышения выхода и качества продукции необходимы разработка и освоение современных ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих индивидуально-дифференцированный подход к раскрою каждого бревна.

Коробление пиломатериалов является наиболее ярко выраженным дефектом сушки. Как считается, источниками коробления являются анизотропия свойств древесины и неодинаковая усушка по различным структурным направлениям. Усушка и коробление – это характерные недостатки

древесины как материала. Считается, что коробление может быть структурным, то есть возникающим от анизотропии усушки, и влажностным – вызванным неравномерным распределением влажности по сечению материалов.

Кроме того, могут быть выделены особые виды коробления – от напряжений произрастания и от остаточных напряжений при сушке, проявляющиеся, в частности, при механической обработке пиломатериалов и заготовок. Коробление происходит от негоризонтальности подштабельной базы, разнотолщинности прокладок и других подобных причин.

На практике часто не соблюдается расстояние между прокладками в штабеле и материал укладывают при меньшем их количестве. Получаемый при этом ущерб из-за коробления в десятки и сотни раз превышает «экономия» на прокладках.

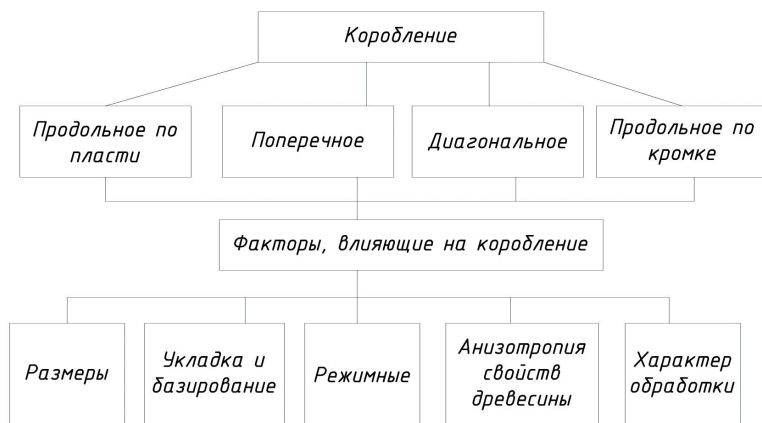


Рис. 1.1. Факторы, влияющие на коробление материалов при сушке

Брак от коробления при сушке экспортных пиломатериалов по данным исследований составляет 9,5 %. И. С. Стриха отмечает, что потери буковой древесины из-за продольного коробления составляют (в зависимости от размеров по длине) 10–15 % от объема в заготовках. По данным В. С. Ясинского, брак от коробления часто превышает 25 %

от объема высушиваемого материала, и из всех видов технологического брака коробление составляет около 44 %.

Брак от коробления при сушке пиломатериалов в современных сушильных камерах с применением совершенных управляемых компьютерной программой режимов остается преобладающим.

По возможности необходимо стремиться к уменьшению количества брака, так как это экономия не только материала, но и труда. По оценке Р. Е. Калитиевского, повышение выхода пилопродукции при ее выработке из тех же объемов сырья на 2–8 % равнозначно увеличению производительности труда примерно в 2 раза.

1.3. Повышение прочности деревянных клееных дощатых балок за счет использования некоторых природных особенностей древесины

В настоящее время древесина используется в различных отраслях народного хозяйства. Значительные объемы ее расходуются в строительстве в качестве строительных деталей и изделий. Возросли требования к качеству и эффективности способов обработки древесины.

Незнание природных свойств и особенностей древесины приводит к снижению качества и прочности изделий из нее, к неоправданно высоким потерям в процессе технологической обработки.

До сих пор считается, что деформации древесины объясняются ее усушкой и разбуханием при изменении влажности. При действии внешних нагрузок появляющиеся деформации определяются известными расчетными методами. Крайне редко упоминается в литературе о том, что в древесине, как материале растительного происхождения, в процессе роста дерева формируются начальные напряжения, которые, как отмечают исследователи, по величине достигают предельных значений. Отечественный ученый А. И. Кузнецов и немецкий Н. Kubler обосновали в своих трудах важность и необходимость исследования появления и развития этих начальных напряжений.

При распиловке бревен на пиломатериалы остающимся в них начальным напряжениям соответствует изменяющаяся форма заготовок. В процессе, например, сушки в пиломатериалах появляется продольное и поперечное коробление, которое часто делает их непригодными для дальнейшего использования.

При силовой сортировке пиломатериалов конструкционного назначения для изготовления строительных конструкций не учитывается их начальная напряженность, и оценка их прочности по прогибу при изгибе без учета начальных напряжений не приводит к получению достоверной информации. При такой сортировке прочность пиломатериалов оказывается либо завышенной, либо неоправданно заниженной.

Поскольку древесина является «реагирующим» материалом и на нее, как и на все материалы растительного происхождения, распространяется основной принцип бионики – принцип регулирования напряженного состояния в процессе роста дерева, – прочность формируется в ответ на внешние воздействия, к которым относятся собственный вес ствола, кроны и атмосферных осадков и (в особенности) ветровая нагрузка. В ответ на внешние воздействия формируются размеры клеток и толщина их стенок, ориентация волокон по направлению главных напряжений. Этим достигается высокая прочность по направлениям внутренних усилий и соответствующие им плотность и величина модуля упругости. Древесина в процессе роста дерева формируется как анизотропный материал, свойства которого по разным направлениям заметно различаются, и эта природная особенность должна быть использована в процессе технологической обработки. Из любой части объема неоднородного сортимента может быть выделен элемент, свойства которого наилучшим образом будут соответствовать требуемым со стороны заказчика.

Исследование начальных напряжений и свойств анизотропии древесины и древесных материалов, их влияние на физико-механические и технологические свойства имеет важное научное и практическое значение.

Начальные напряжения, формирующиеся в процессе роста в стволе дерева, уравновешены в пределах его объема. При распиловке бревна равновесное состояние нарушается и каждый выпиливаемый сортимент оказывается в новом равновесном состоянии, когда в его сечениях равнодействующая и момент начальных напряжений будут равны нулю. Этому новому равновесному состоянию будет соответствовать изменение размеров и формы сортимента.

Исследуя появляющиеся при выпиливании пиломатериалов деформации, можно методами сопротивления материалов определить величину начальных напряжений. При этом можно вычислить начальные напряжения в поперечном и продольном направлениях по отдельности, независимо друг от друга.

Как следует из анализа литературных источников, на устойчивость при воздействии ветровой нагрузки оказывают значительное влияние (кроме формы стволов деревьев и их внутреннего строения) внутренние напряжения, формирующиеся в ответ на внешние воздействия.

Образующая ствола дерева как тела вращения может быть описана, как это отмечается в исследованиях С. В. Белова и А. И. Кузнецова, параболой Нейля в нижней части. В средней части ствол представляет собой усеченный, а в верхней части – правильный конус.

Большинством авторов признается первостепенное значение прочности ствола при изгибе для обеспечения жизнестойкости дерева.

Начальные напряжения в древесине, формирующиеся в процессе роста дерева, условно можно разделить на напряжения первого, второго и третьего рода, как и в других материалах (например, в металлах). Напряжения третьего рода уравновешиваются в пределах субмикроскопических объемов одного порядка с размерами клеток.

Напряжения второго рода уравновешиваются в микроскопических объемах, охватывающих взаимодействие нескольких клеток.

Напряжения первого рода характеризуют взаимодействие макрообъемов, групп клеток, имеющих ориентацию в соответствии с геометрией заготовки либо изделия.

Наименее изученными являются напряжения второго и третьего рода в связи со сложностью строения древесины.

Пиломатериалы для изготовления строительных конструкций, выпиленные из напряженного ствола дерева, оказываются напряженными и это отражается на изменении их геометрической формы – появляется различного вида покоробленность, которая самопроизвольно не исчезает в процессе технологической обработки и в готовых изделиях.

А. И. Кузнецов экспериментально исследовал появляющееся кромочное коробление пиломатериалов, полученных при продольном раскрое сердцевинных досок толщиной 19 мм (табл. 1.1). Прогиб на кромку в среднем у сосновых и еловых пиломатериалов превышает допустимое стандартное значение для отборного, первого и второго сортов.

Таблица 1.1

Величина прогиба по кромке доски из-за действия начальных напряжений

Порода древесины	Средняя величина прогиба на расстоянии от вершинного конца досок, мм				
	1 м	2 м	3 м	4 м	5 м
Сосна	16	26	30	26	16
Ель	16	26	30	27	17

При этом автор отмечает, что кромочное коробление появляется сразу при продольном раскрое доски посередине на обрезном станке. Кромки досок не всегда представляют собой плавные кривые, причинами этого, по мнению автора, служила неточность расположения пропила по отношению к сердцевине, а также наличие креновой древесины.

По предварительным расчетам А. И. Кузнецова, начальные напряжения в досках, бревнах и стволах деревьев

достигают 30–40 кг/см², что, например, для сосны составляет почти 20 % от предела прочности при сжатии вдоль волокон.

С увеличением диаметра ствола кромочное коробление пиломатериалов уменьшается. С понижением влажности древесины кромочное коробление пиломатериалов имеет, как отмечает А. И. Кузнецов, «заметные» значения.

Автор экспериментально подтвердил наличие начальных напряжений в поперечных сечениях пиломатериалов и показал, что начальные напряжения в поперечных сечениях пиломатериалов действуют только при высокой влажности древесины. При снижении влажности они уменьшаются за счет появления деформаций усушки.

Начальные напряжения в продольном направлении имеют активный характер и взаимно дополняют друг друга. Напряжение растяжения заболонной зоны способствует увеличению напряжения сжатия ядровой зоны, а рост напряжения сжатия ядровой зоны, в свою очередь, вызывает увеличение напряжения растяжения периферийной зоны.

А. И. Кузнецов отмечает, что неодинаковое сопротивление древесины растяжению и сжатию в заболонной и ядровой зонах позволяет предположить, что сопротивление радиальному изгибу должно зависеть от направления изгибающей нагрузки (табл. 1.2).

По причине действия начальных напряжений, при раскрое толстых досок на тонкие и узкие, получаемые заготовки приобретают заметную кривизну по кромкам. Листы строганного шпона приобретают чашеобразную форму, листы лущенного шпона – волнистую.

Несмотря на то, что вопрос появления начальных напряжений в деревьях в процессе их роста не является новым, он и на сегодняшний день остается малоизученным. Вопросы усушки и разбухания древесины, коробления, растрескивания, образования различных дефектов в процессе роста (метиковых трещин, отлупа, образования смоляных кармашков, косослоя и др.) нельзя рассматривать без учета образования и развития начальных напряжений.

Отдельное исследование должно быть посвящено формированию прочности древесины при растяжении и сжатии вдоль волокон, статическом изгибе, распределению модуля упругости и плотности древесины по объему ствола дерева с учетом появления и развития начальных напряжений.

Начальные напряжения в клееных деревянных конструкциях могут привести к понижению (или повышению) их нагрузочной способности и долговечности, к изменению формы и размеров в процессе эксплуатации.

Использование машин для силовой сортировки конструкционных пиломатериалов без учета начальных напряжений может привести к ошибочному назначению класса их прочности.

Таблица 1.2

**Деформации изгиба по кромке пиломатериалов
по данным А. И. Кузнецова**

Порода древесины	Средние значения прогиба пиломатериалов по кромке на расстоянии от вершинного конца доски, мм					
	1 м	2 м	3 м	4 м	5 м	M_{z0}^*
Сосна	10	16	19 (12,26*)	17	10	2,9
Ель	7	11	13	7	4	

Вычисленные начальные напряжения для сосны при модуле упругости $50\,000\text{ кг/см}^2$ составляют 15 кг/см^2 (максимальное значения – 36 кг/см^2) и для ели – 17 кг/см^2 (максимальное значения – 54 кг/см^2) при модуле упругости $70\,000\text{ кг/см}^2$. При более новых значениях модуля упругости – для сосны $89\,000\text{ кг/см}^2$ напряжения составляют $26,7\text{ (}64,08\text{) кг/см}^2$.

А. И. Кузнецов приводит данные о влиянии диаметра бревен на продольное коробление по кромке (табл. 1.3).

Результаты эксперимента доказывают, что с увеличением диаметра пиловочника уменьшаются и начальные напряжения, и величины кромочного коробления.

Таблица 1.3

**Влияние диаметра ствола дерева на величину
кромочного коробления**

Порода древесины	Диаметр бревен, см	Длина бревен, м	Количество бревен в партии, шт.	Кромочное коробление на расстоянии от вершинного конца, мм					Максималь- ное напряже- ние, кг/см ²
				1 м	2 м	3 м	4 м	5 м	
Ель	28	4	14	5,0	7,6	5,7	-	-	18,6
	33	4	16	2,7	4,3	3,8	-	-	12,4
	38	4	12	2,5	4,0	3,5	-	-	13,3
	43	4	4	2,6	3,8	3,2	-	-	14,3
Сосна	12	6	5	19	32	37	33	21	12,8
	18	6	19	15	25	29	25	16	14,5
	30	6	41	8,0	12	14	13	8	11,7

Автор отмечает, что при сушке радиальных секций деформации изгиба по кромке являются вполне заметными, однако специальных исследований не проводилось.

Как отмечает А. И. Кузнецов [14], учитывая величину начальных напряжений в растущих деревьях, цельные стволы обладают большей жесткостью, чем небольшие отрезки, свободные от начальных напряжений. Это косвенно подтверждается результатами сравнительных испытаний образцов малых и строительных размеров при статическом изгибе, предоставленными в табл. 1.4.

Различие в механических свойствах крупных и малых образцов разные исследователи относят к наличию пороков в древесине. Однако, можно согласиться с А. И. Кузнецовым [14], что различное сопротивление сжатию и растяжению центральной и периферийной зон связано с направлением изгибающего момента от начальных напряжений. Нагружать балку в виде бруса, доски выгоднее со стороны сердцевины.

Таблица 1.4

**Результаты сравнительных испытаний образцов
строительных и малых размеров**

Единицы измерения	Предел пропорциональности		Предел прочности		Модуль упругости	
	Строительные размеры	Малые образцы	Строительные размеры	Малые образцы	Строительные размеры	Малые образцы
кг/см ²	277	438	520	726	103636	167707
%	63	100	72	100	96	100

Теоретически доказано предположение А. И. Кузнецова [14], что различие в механических свойствах древесины в зависимости от направления силы при изгибе относительно годовичных слоев в наибольшей мере проявляется во влажной древесине. С повышением влажности сопротивление сжатию вдоль волокон снижается, а сопротивление растяжению не изменяется.

Предполагая, что влага в древесине служит своеобразной смазкой, обеспечивающей проявление упругих (пружинящих) свойств древесины, то в процессе сушки роль «смазки» снижается и внутреннее трение возрастает. Это приводит к некоторому «торможению» деформаций, появившихся за счет начальных напряжений, но не к исчезновению самих напряжений.

Внешне механические воздействия не могут ослабить или нейтрализовать начальные напряжения в древесине. Они могут исчезнуть либо значительно уменьшиться только в случае появления пластических деформаций. Это может быть достигнуто при пропаривании древесины.

А. И. Кузнецов в своей работе отмечает, что «...поперечные напряжения усиливаются с набуханием древесины в воде и после высыхания ее не исчезают. Продольные напряжения в нормальных стволах и вызываемые ими деформации изгиба сохраняются и в сухой древесине».

1.4. Влияние начальных напряжений на прочность клееных деревянных балок

В работе Р. И. Агафоновой отмечается, что в период роста дерева в его стволе появляются начальные напряжения, оказывающие влияние на прочность деревянных конструкций. Чем меньше толщины склеиваемых досок, тем прочнее конструкция. Речь здесь идет о напряжениях в поперечных сечениях. С автором можно согласиться, поскольку с уменьшением толщины склеиваемых досок снижается градиент напряжений, поэтому прочность возрастает.

Ковальчук Л. М. и Пискунов Ю. В. рекомендуют при изготовлении многослойных конструкций назначать толщину слоев не более 35–40 мм. В большинстве случаев эта толщина не должна превышать 25–30 мм. Прочность при этом в среднем на 13% выше по сравнению с конструкциями из элементов 35–40 мм.

При изготовлении клееных деревянных балок все доски оказываются в условиях, подобных тем, в которых они находились в составе ствола дерева, то есть в начальном напряженном состоянии.

В зависимости от толщины пиломатериалов, диаметра пиловочника, из которого они выпилены, положения на схеме распиловки бревна в них появляются соответствующие начальные напряжения.

А. И. Кузнецов считает, что начальные напряжения распределены по объему ствола дерева по закону параболоида 2-й степени, причем центральная ядровая зона испытывает сжатие в продольном направлении, а периферийная (заболонная) – растяжение. Н. Kubler считает, что начальные напряжения распределены по логарифмическому закону.

В исследованиях В. Н. Глухих и А. Л. Акопян теоретически обоснована взаимосвязь размера ядровой зоны с характером распределения начальных напряжений по объему ствола, что позволяет учитывать индивидуальные особенности каждого сортамента при распиловке его на пиломатериалы. Распределение начальных напряжений может быть

описано функциями параболоида более высокого порядка, либо достаточно сложными математическими функциями. В любом случае, в лесопильных производствах получают пиломатериалы в напряженном состоянии, что несомненно повлияет на прочность заготовок и изделий из них.

Лишь в одной работе отмечается, что начальные напряжения в пиломатериалах можно значительно уменьшить путем их пропарки.

Таким образом, с увеличением толщины пиломатериалов начальные напряжения возрастают, причем в продольном направлении досок они оказывают влияние на прочность клееных деревянных балок таким же образом, как и в поперечных направлениях.

Многими исследователями экспериментально доказано, что свойства древесины по объему ствола заметно различаются, при этом можно отметить, что единственной причиной этого являются напряжения, формирующиеся в стволе дерева в процессе его роста. Ствол дерева приобретает форму стержня равного сопротивления с необходимой прочностью и жесткостью, обеспечивающими его жизнестойкость. Главным стимулятором развития клеток являются механические раздражители – собственный вес ствола и кроны, атмосферные осадки, ветровая нагрузка – действие которых приводит к появлению напряжений в стволе дерева, на что указывают авторы целого ряда исследований, отечественных и зарубежных.

Система сформировавшихся начальных напряжений не исчезает при распиловке бревен на материалы. Величина начальных напряжений в стволах деревьев весьма значительная, и, как отмечают А. И. Кузнецов, Н. Kubler, С. В. Белов, А. Iinen, она достигает предельных значений при растяжении и сжатии вдоль волокон. Присутствие таких напряжений в пиломатериалах и заготовках конструкционного назначения понижает их нагрузочную способность и изгибную жесткость.

Рассмотрим в сравнении напряжения в клееных балках сечением 100×200 мм, изготовленных из пиломатериалов толщиной 25 и 50 мм (рис. 1.2–1.9).

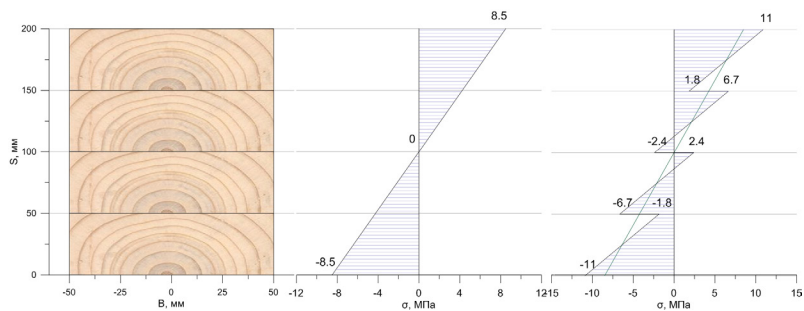


Рис. 1.2. Напряжения в балке из 4 досок (1-й вариант расположения)

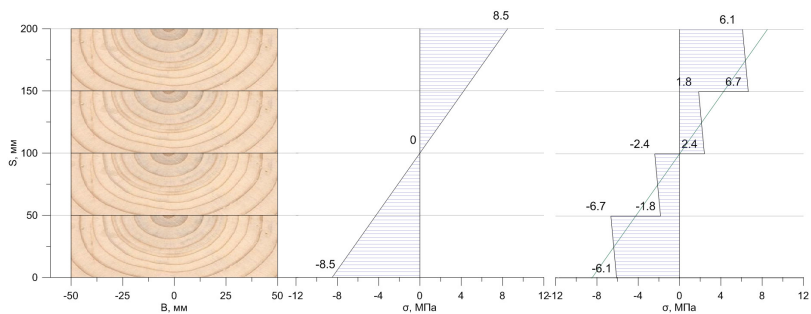


Рис. 1.3. Напряжения в балке из 4 досок (2-й вариант расположения)

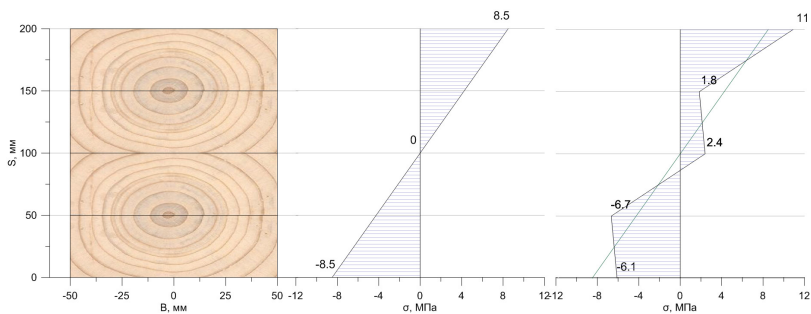


Рис. 1.4. Напряжения в балке из 4 досок (3-й вариант расположения)

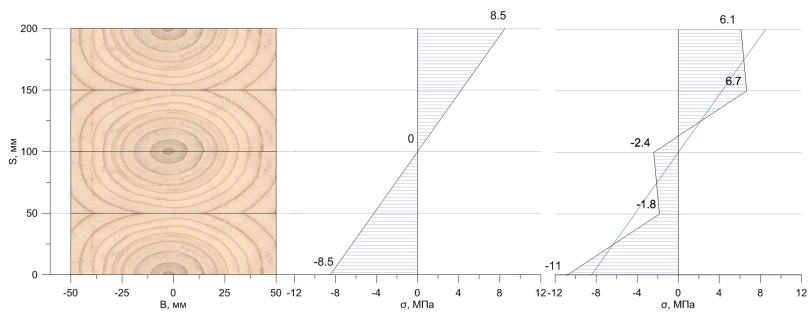


Рис. 1.5. Напряжения в балке из 4 досок (4-й вариант расположения)

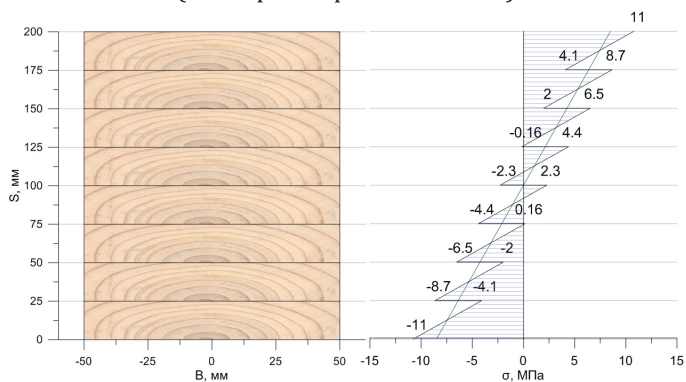


Рис. 1.6. Напряжения в балке из 8 досок (1-й вариант расположения)

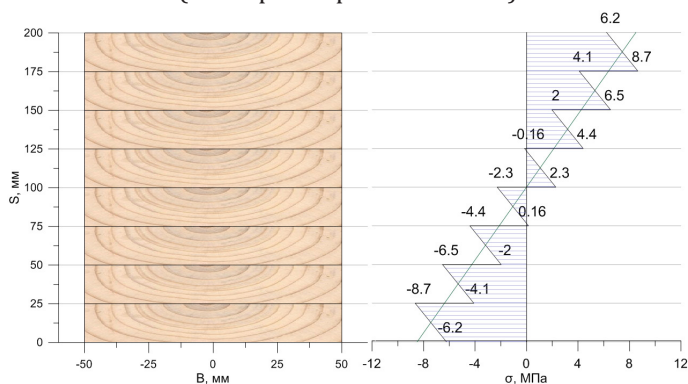


Рис. 1.7. Напряжения в балке из 8 досок (2-й вариант расположения)

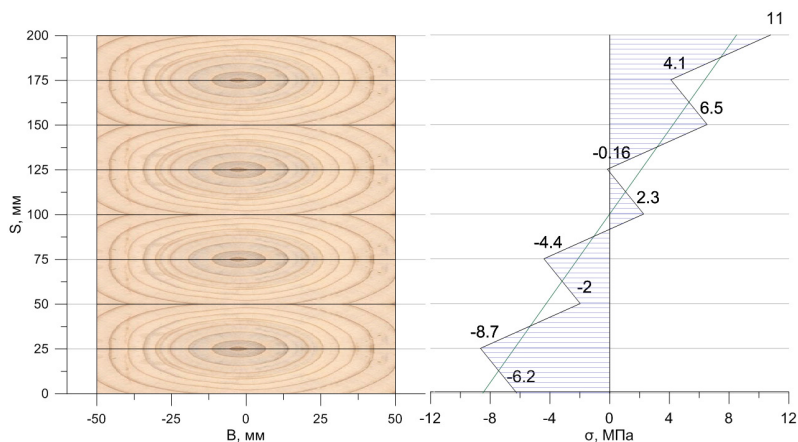


Рис. 1.8. Напряжения в балке из 8 досок (3-й вариант расположения)

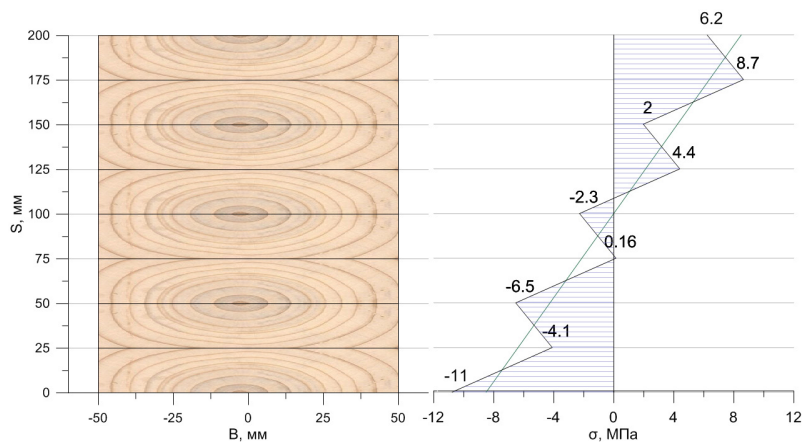


Рис. 1.9. Напряжения в балке из 8 досок (4-й вариант расположения)

Исходя из предположения, что доски подобраны с близкими свойствами, средние значения изгибающих моментов по пласти и начальных напряжений составляют (расчет рассмотрен более подробно в главе 2):

- для толщины 25 мм: $M_{y0} = 17722,6 \text{ Н}\cdot\text{мм};$
 $\sigma_{\text{H}} = 1,701 \text{ МПа};$
- для толщины 32 мм: $M_{y0} = 37985 \text{ Н}\cdot\text{мм};$
 $\sigma_{\text{H}} = 2,226 \text{ МПа};$
- для толщины 40 мм: $M_{y0} = 75978 \text{ Н}\cdot\text{мм};$
 $\sigma_{\text{H}} = 2,849 \text{ МПа};$
- для толщины 50 мм: $M_{y0} = 152760 \text{ Н}\cdot\text{мм};$
 $\sigma_{\text{H}} = 3,666 \text{ МПа}.$

В зависимости от положения годичных слоев в досках, входящих в изделие, суммарное напряжение в верхней доске будет различным для разной толщины. При наружной пластине верхней доски, выходящей на поверхность балки в зоне растяжения, суммарное напряжение составит (рис. 1.7):

- при $S=25$ мм: $\sigma_{\text{max}}^{\text{p}} = [\sigma] + \sigma_{\text{H}} = 10 + 1,701 = 11,701 \text{ МПа};$
- при $S = 32$ мм: $\sigma_{\text{max}}^{\text{p}} = 10 + 2,226 = 12,226 \text{ МПа};$
- при $S = 40$ мм: $\sigma_{\text{max}}^{\text{p}} = 10 + 2,849 = 12,849 \text{ МПа};$
- при $S = 50$ мм: $\sigma_{\text{max}}^{\text{p}} = 10 + 3,666 = 13,666 \text{ МПа}.$

В зоне сжатия максимальное напряжение будет меньше, чем в зоне растяжения:

- при $S = 25$ мм: $|\sigma_{\text{max}}^{\text{c}}| = 10 - 1,701 = 8,299 \text{ МПа};$
- при $S = 32$ мм: $|\sigma_{\text{max}}^{\text{c}}| = 10 - 2,226 = 7,774 \text{ МПа};$
- при $S = 40$ мм: $|\sigma_{\text{max}}^{\text{c}}| = 10 - 2,849 = 7,151 \text{ МПа};$
- при $S = 50$ мм: $|\sigma_{\text{max}}^{\text{c}}| = 10 - 3,666 = 6,334 \text{ МПа}.$

Из этих соображений рациональным будет размещение пиломатериалов только при одной схеме, когда наружные пласти верхней и нижней досок выходят на внешние стороны балки (рис. 1.9). В этом случае в более растянутой зоне суммарное напряжение будет больше, чем в более слабой сжатой зоне. Ниже приведены соотношения этих напряжений в балках, склеенных из досок разных толщин:

- при $S = 25$ мм: $\frac{\sigma_{\text{max}}^{\text{p}}}{|\sigma_{\text{max}}^{\text{c}}|} = \frac{11,701}{8,299} = 1,41;$

- при $S = 32$ мм: $\frac{\sigma_{\max}^p}{|\sigma_{\max}^c|} = \frac{12,226}{7,774} = 1,573$;
- при $S = 40$ мм: $\frac{\sigma_{\max}^p}{|\sigma_{\max}^c|} = \frac{12,849}{7,151} = 1,797$;
- при $S = 50$ мм: $\frac{\sigma_{\max}^p}{|\sigma_{\max}^c|} = \frac{13,666}{6,334} = 2,157$.

В зависимости от ориентации годовичных слоев в верхней и нижней доске клееной балки можно определить, является ли такая балка рациональной. Рациональная балка будет в том случае, когда отношение наибольших напряжений в растянутой и сжатой зонах будет равно отношению пределов прочности древесины при изгибе и при сжатии вдоль волокон.

Сравнивая максимальные напряжения в рациональной балке, склеенной из досок соответствующей толщины, получим соотношения:

- для толщин 40 и 25 мм: $\frac{12,849}{11,701} = 1,098$;
- для толщин 25 и 32 мм: $\frac{12,226}{11,701} = 1,045$;
- для толщин 25 и 50 мм: $\frac{13,666}{11,701} = 1,168$;
- для толщин 32 и 50 мм: $\frac{13,666}{12,226} = 1,118$.

Расчет показывает, что при использовании более тонких досок (толщиной 25 мм, 32 мм) прочность клееной балки может быть повышена от 10 до 17% по сравнению с толщиной 50 мм.

Выводы

Вопросы усушки, коробления, растрескивания нельзя рассматривать отдельно от изучения начальных напряжений, поскольку эти явления связаны друг с другом единым происхождением. В этих явлениях заключаются природные особенности древесины, имеющие биологическое

и техническое значение. Многие дефекты конструкционных пиломатериалов происходят не из-за усушки, как это принято считать, а вследствие действия начальных напряжений, сформировавшихся в процессе роста дерева.

Прочность клееной балки может быть повышена до 17% при использовании более тонких досок в пакете этой балки.

При учете ориентации годичных слоев (расположения доски в пакете клееной балки) можно спроектировать балку наиболее рациональной конструкции, что приведет к более экономичному использованию древесины и повышению грузоподъемности балки.

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ РОСТА В СТВОЛАХ ДЕРЕВЬЕВ И ВЛИЯНИЯ ИХ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Древесина широко используется в качестве строительного материала и запасы ее практически неисчерпаемы. Дерево использовалась с незапамятных времен всеми народами для строительства жилья, плотов, лодок, кораблей, мостов, защитных сооружений, для изготовления оружия, посуды, мебели, фундаментов зданий, винных бочек, емкостей для воды. До сих пор древесину широко используют для отопления жилищ и приготовления пищи, для изготовления шпал при укладке железнодорожных путей.

Если раньше древесину часто использовали в виде бревен, то в последние десятилетия все шире стали применять в строительстве клееные деревянные конструкции в виде балок, ферм. Широкое распространение получает производство клееных деревянных брусьев для домостроения. Арочные клееные деревянные своды, например, являются украшением не только зала заседаний Европарламента, но и различных дворцов, музеев, торговых и спортивных комплексов. Покрытие велотрека в Крылатском к Олимпийским Играм в г. Москва в 1980 г. было изготовлено из выпиленных по определенной схеме пиломатериалов из древесины лиственницы взамен дорогостоящих тропических пород.

2.1. Разработка математической модели начальных напряжений в стволе дерева наиболее распространенных и значимых для практики случаях

В последние годы все чаще исследователи обращают свое внимание на древесину как природный композиционный

материал с высокими физико-механическими свойствами в соответствующих структурных направлениях, обеспечивающими сохранение жизнестойкости деревьев в процессе их роста с учетом внешних воздействий. К таким воздействиям можно отнести ветровой напор и собственный вес ствола дерева, кроны и атмосферных осадков. Древесина в процессе роста дерева является «реагирующим» материалом, отвечающим на внешние воздействия изменением своей структуры, плотности, прочности, жесткости. В наиболее напряженные части ствола возрастает приток питательных веществ, что приводит к увеличению толщины стенок клеток и повышению их сопротивления растяжению и сжатию в соответствующих направлениях. Под внешними воздействиями происходит формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) дерева в процессе его роста.

Согласно бионическому принципу траекториального строения наиболее прочные волокна древесины размещаются в соответствии с геометрией поля перемещений; такие волокна ориентированы по направлению главных напряжений, которые зависят в свою очередь от внешних воздействий.

В процессе роста дерева в периферийной зоне ствола в продольном направлении формируются напряжения растяжения, в центральной зоне – напряжения сжатия. У многих пород деревьев эти зоны отличаются по цвету: сжатая зона (ядровая) имеет более темный цвет по сравнению с растянутой (заболонной).

Сформировавшееся напряженно-деформированное состояние в процессе роста дерева оказывает влияние на качество и прочность пиломатериалов, получаемых при последующей распиловке круглых сортиментов. В пиломатериалах сохраняется соответствующее напряженно-деформированное состояние, способствующее появлению в них изменения формы – различного вида поперечной и продольной покоробленности, являющейся основной причиной понижения их сортности и перехода в технический брак.

Принимая в первом приближении форму ствола дерева в виде правильного конуса для наиболее распространенных размеров ядра и заболони, можно представить изменение начального напряжения в стволе по закону параболоида 4-й степени (рис. 2.1):

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{\sigma_R + \sigma_0}{R^4} (y^2 + z^2)^2 - \sigma_0, \quad (2.1)$$

где σ_R, σ_0 – начальные напряжения в точках на контуре сечения и в его центре соответственно, МПа; R – радиус сечения ствола, мм.

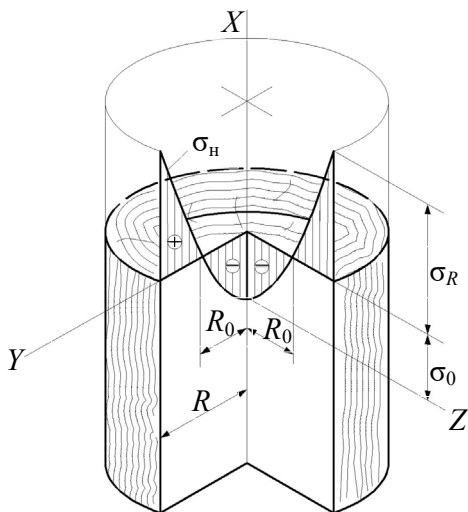


Рис. 2.1. Распределение начальных напряжений по сечению ствола дерева:

σ_R, σ_0 – начальные напряжения в точках на контуре сечения и в его центре соответственно, МПа;

$\sigma_{\text{н}}$ – функция распределения начальных напряжений; R – радиус сечения ствола, мм;

R_0 – радиус ядровой зоны, мм

Размер ядровой зоны можно найти из (2.1), приравнявая к нулю начальные напряжения в точках на границе ядра и заболони (рис. 2.2):

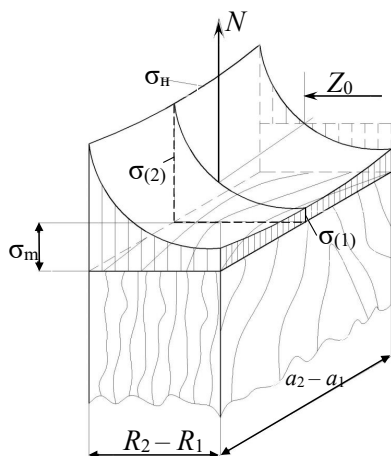


Рис. 2.4. Распределение начальных напряжений вдоль волокон доски до выпилки её из бревна: R_1, R_2, a_1, a_2 – координаты доски в бревне до ее выпилки относительно осей z и y ; N – продольная равнодействующая сила; Z_0 – координата приложения продольной силы; σ_n – функция распределения начальных напряжений; $\sigma_{(1)}, \sigma_{(2)}$ – минимальное и максимальное значение напряжений на пласти выпилки доски, σ_m – среднее значение напряжений

Суммарное напряжение в волокнах дерева с учетом ветровой нагрузки можно найти расчетом по формуле

$$\sigma = \frac{\sigma_R + \sigma_0}{R^4} r^4 - \sigma_0 - \frac{2\sigma_0}{R} z, \quad (2.3)$$

где $\sigma_R = -2\sigma_0$.

Тогда в плоскости ветрового напора из (2.3) получим (рис. 2.2):

- а) $z = 0; \sigma = \sigma_0;$
- б) $z = -R; \sigma = 0;$
- в) $z = R; \sigma = -4\sigma_0.$

Исследование функции суммарного напряжения (2.3) на экстремум показывает, что максимальное напряжение в сжатой зоне численно равно:

$$\sigma_{\max} = 1,826\sigma_0. \quad (2.4)$$

Соотношение максимального напряжения растяжения и сжатия составляет:

$$n = \frac{4}{1,826} = 2,2. \quad (2.5)$$

Учитывая характер изменения напряжений в зонах растяжения и сжатия, можно предположить, что отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон у древесины с относительным размером ядровой зоны $R_0 = 0,766R$ составляет 2,2, что согласуется с имеющимися в литературе экспериментальными данными для большинства известных пород деревьев в России, Европе, Северной и Южной Америке, Азии.

В табл. 2.1 приведены экспериментальные и расчетные данные для североамериканских пород деревьев, подтверждающих наши выводы.

Таблица 2.1

Значения пределов прочности при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе для отечественных пород древесины при влажности выше 30 %

Порода	Предел прочности, МПа		Отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон
	Сжатие вдоль волокон	Статический изгиб	
Сосна обыкновенная	21,2	49,5	2,335
Сосна кедровая	18,5	42,3	2,286
Орех грецкий	23,8	60,7	2,55
Осина	19,2	45,4	2,36
Пихта белая	19,4	44,7	2,30
Пихта белокорая	18,4	45,2	2,45
Пихта кавказская	19,9	48,4	2,43
Пихта сибирская	17,5	40,4	2,31
Пихта цельнолистная	16,6	42,0	2,53

Окончание табл. 2.1

Порода	Предел прочности, МПа		Отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон
	Сжатие вдоль волокон	Статический изгиб	
Тополь	17,8	40,3	2,26
Ясень маньчжурский	29,3	67,2	2,29
Ясень обыкновенный	32,5	74,3	2,28
Ясень остроплодный	40,2	88,8	2,21
Ясень пенсильванский	33,3	71,6	2,15
Акация белая	41,6	97,5	2,34
Береза бородавчатая	22,4	59,7	2,66
Береза даурская	21,0	66,2	3,15
Береза железная	37,3	82,7	2,217
Береза ребристая	25,6	66,9	2,61
Бук	25,9	64,6	2,49
Вяз	25,2	59,1	2,34
Граб	26,5	73,3	2,76
Груша	26,7	63,4	2,37
Дуб араксинский	29,7	56,2	1,89
Дуб восточный	28,7	54,4	1,89
Дуб грузинский	30,9	58,8	1,90
Дуб каштанолистный	33,9	82,9	2,44
Дуб черешчатый	31,3	67,8	2,18
Ель	19,6	43,9	2,24
Ива	16,8	41,6	2,47
Клен	28,2	77,7	2,75
Липа	24,2	54,2	2,24
Лиственница	25,3	61,7	2,44
Ольха	23,6	49,4	2,09

Из этого следует, что, рассматривая ствол дерева как равнопрочный стержень при изгибе ветровой нагрузкой, можно прийти к выводу, что прочность древесины при сжатии вдоль волокон несколько возрастает к вершине. Об этом свидетельствует и уменьшение относительного размера ядровой зоны в этом направлении.

Отсутствие объективного метода определения начальных напряжений в стволах деревьев значительно затрудняло и делало практически невозможным прогнозирование качества конструкционных пиломатериалов в процессе их производства. Связь размера ядровой зоны с начальными напряжениями это серьезное препятствие устраняет, поскольку современные компьютерные технологии позволяют отсканировать каждый сортимент перед распиловкой, в том числе и для того, чтобы измерить размер ядровой зоны, и составить индивидуальную схему раскроя каждого сортимента.

2.2. Обоснование появления продольной покоробленности пиломатериалов конструкционного назначения

2.2.1. Расчет изгибающего момента в пиломатериалах конструкционного назначения с учетом начальных напряжений

В соответствии с вышеприведенным расчетом нами рассмотрена задача начальных напряжений в стволе дерева при распределении их по объему по закону параболоида 4-й степени.

$$\sigma_n = \frac{\sigma_R + \sigma_0}{R^4} (y^2 + z^2)^2 - \sigma_0, \quad (2.6)$$

где σ_R , σ_0 – соответственно напряжения в продольном направлении в точках на контуре и в центре сечения.

Обозначим: $k_4 = \frac{\sigma_R + \sigma_0}{R^4}$. Тогда функцию начальных напряжений можно переписать в таком виде:

$$\sigma_n = k_4(y^2 + z^2)^2 - \sigma_0 = k_4(y^4 + 2y^2z^2 + z^4) - \sigma_0. \quad (2.7)$$

Рассмотрим случай симметричного расположения выпиленной доски в бревне относительно оси z (рис. 2.5).

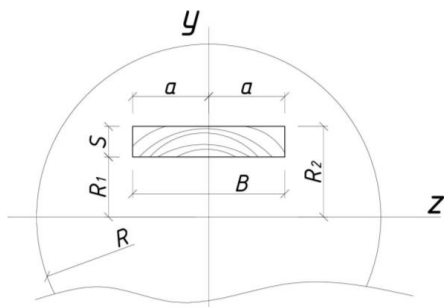


Рис. 2.5. Симметричное расположение доски в бревне относительно оси y : R_1, R_2, a_1, a_2 – координаты доски в бревне до ее выпилки относительно осей z и y ; R – радиус бревна

Принятая функция распределения начального напряжения по объему ствола с учетом размера ядровой зоны позволяет вычислить не только величину начальных напряжений, но и изгибающих моментов, вызывающих в пиломатериалах деформации изгиба по пласти и по кромке.

Для этого необходимо решить следующие интегралы для определения изгибающих моментов по пласти:

$$M_{y0} = \int_{a_1}^{a_2} dy \int_{R_1}^{R_2} (\sigma_n - \sigma_m) z dz; \quad (2.8)$$

по кромке доски:

$$M_{z0} = \int_{R_1}^{R_2} dz \int_{a_1}^{a_2} (\sigma_n - \sigma_m) y dy, \quad (2.9)$$

где σ_m – средняя величина начального напряжения в исследуемом прямоугольном сорimente (рис. 2.5), определяемая решением:

$$\sigma_m = \frac{N}{2a(R_2 - R_1)}, \quad (2.10)$$

где N – равнодействующая внутренняя сила на торце выпи-
ливаемой доски от выходящих на этот торец начальных на-
пряжений.

Равнодействующая внутренняя сила на торце доски до
выпиливания ее из бревна:

$$\begin{aligned}
 N &= \int_{R_1}^{R_2} dz \int_{-a}^{+a} (k_4(y^2 + z^2)^2 - \sigma_0) dy = \\
 &= \int_{R_1}^{R_2} \left[k_4 \frac{y^5}{5} + 2k_4 z^2 \frac{y^3}{3} + k_4 z^4 y - \sigma_0 y \right]_{-a}^{+a} dz = \\
 &= \int_{R_1}^{R_2} \left[k_4 \frac{2}{5} a^5 + k_4 z^2 \frac{4}{3} a^3 + 2k_4 z^4 a - 2\sigma_0 a \right] dz = \\
 &= \left[\frac{2}{5} k_4 a^5 z + \frac{4}{3} k_4 a^3 \frac{z^3}{3} + 2k_4 a \frac{z^5}{5} - 2\sigma_0 a z \right]_{R_1}^{R_2} = \\
 &= \frac{2}{5} k_4 a^5 (R_2 - R_1) + \frac{4}{9} k_4 a^3 (R_2^3 - R_1^3) + \\
 &\quad + \frac{2}{5} k_4 a (R_2^5 - R_1^5) - 2\sigma_0 a (R_2 - R_1) = \\
 &= 2a(R_2 - R_1) \left[\frac{k_4}{5} a^4 + \frac{2k_4}{9} a^2 (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0 \right] \\
 N &= 2a(R_2 - R_1) \left[\frac{k_4}{5} a^4 + \frac{2k_4}{9} a^2 (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0 \right]
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Тогда среднее значение продольного напряжения:

$$\begin{aligned}
 \sigma_m &= \frac{N}{2a(R_2 - R_1)} = \\
 &= \frac{k_4}{5} a^4 + \frac{2k_4}{9} a^2 (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \\
 &\quad + \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_n - \sigma_m = k_4(y^2 + z^2)^2 - \sigma_0 - \\ &- \left[\frac{k_4}{5} a^4 + \frac{2k_4}{9} a^2(R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) + \right. \\ &\left. + \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0 \right] = \\ &= k_4 \left[y^4 + 2y^2z^2 + z^4 - \frac{a_4}{5} - \frac{2}{9} a^2(R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Функции изгибающих моментов:

$$\begin{aligned} M_{y0} &= \int_{-a}^{+a} dy \int_{R_1}^{R_2} (\sigma_n - \sigma_m) z dz = \\ &= \int_{-a}^{+a} dy \int_{R_1}^{R_2} k_4 \left[\begin{aligned} &y^4 + 2y^2z^2 + z^4 - \\ &-\frac{a_4}{5} - \frac{2}{9} a^2(R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) - \\ &-\frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \end{aligned} \right] z dz = \\ &= k_4 \int_{-a}^{+a} dy \int_{R_1}^{R_2} \left[\begin{aligned} &y^4 z + 2y^2 z^3 + z^5 - \frac{a_4}{5} z - \\ &-\frac{2}{9} a^2 z (R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) - \\ &-\frac{z}{5} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \end{aligned} \right] dz = \\ &= k_4 \int_{-a}^{+a} dy \left[\begin{aligned} &y^4 \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} + 2y^2 \frac{R_2^4 - R_1^4}{4} + \\ &\frac{R_2^6 - R_1^6}{6} - \frac{a_4}{5} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \frac{2}{9} a^2 R_2^2 \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \\ &\frac{2}{9} a^2 R_2 R_1 \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \frac{2}{9} a^2 R_1^2 \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \frac{R_2^4}{5} \cdot \\ &\frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \frac{R_2^3 R_1}{5} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \frac{R_2^2 R_1^2}{5} \cdot \\ &\frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \frac{R_2 R_1^3}{5} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \frac{R_1^4}{5} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \end{aligned} \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= k_4 \int_{-a}^{+a} \left[\frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \right] \left[\begin{array}{l} y^4 + y^2(R_2^2 + R_1^2) + \frac{1}{3}(R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) \\ (R_2^2 - R_2R_1 + R_1^2) - \frac{a^4}{5} - \frac{2}{9}a^2R_2^2 - \frac{2}{9}a^2R_2R_1 - \\ - \frac{2}{9}a^2R_1^2 - \frac{R_2^4}{5} - \frac{R_2^3R_1}{5} - \frac{R_2^2R_1^2}{5} - \frac{R_2R_1^3}{5} - \frac{R_1^4}{5} \end{array} \right] dy \\
 &= \frac{k_4}{2} (R_2^2 - R_1^2) \left[\begin{array}{l} \frac{y^5}{5} + (R_2^2 + R_1^2) \frac{y^3}{3} - \frac{a^4y}{5} - \frac{2a^2y}{9} \\ (R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) + \\ + \frac{y}{3}(R_2^4 + R_2^2R_1^2 + R_1^4) - \frac{y}{5} \left(\begin{array}{l} R_2^4 + R_2^3R_1 + \\ + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4 \end{array} \right) \end{array} \right]_{-a}^{+a} \\
 &= \frac{k_4}{2} (R_2^2 - R_1^2) \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{2a^3}{3}(R_2^2 + R_1^2) - \\ - \frac{4a^3}{9}(R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) + \frac{2a}{3}(R_2^4 + R_2^2R_1^2 + R_1^4) - \\ - \frac{2a}{5}(R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \end{array} \right] \\
 &= ak_4(R_2^2 - R_1^2) \left[\begin{array}{l} \frac{a^2}{3}(R_2^2 + R_1^2) - \frac{2a^2}{9}(R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) + \\ + \frac{1}{3}(R_2^4 + R_2^2R_1^2 + R_1^4) - \\ - \frac{1}{5}(R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Итого:

$$M_{y0} = ak_4(R_2^2 - R_1^2) \left[\begin{array}{l} \frac{a^2}{3}(R_2^2 + R_1^2) - \\ - \frac{2a^2}{9}(R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) + \\ + \frac{1}{3}(R_2^4 + R_2^2R_1^2 + R_1^4) - \\ - \frac{1}{5}(R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \end{array} \right] \quad (2.14)$$

Если $R_1 = 0$, тогда функция изгибающего момента будет в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 M_{y0} &= ak_4 R_2^2 \left[\frac{a^2}{3} R_2^2 - \frac{2a^2}{9} R_2^2 + \frac{1}{3} R_2^4 - \frac{1}{5} R_2^4 \right] = \\
 &= ak_4 R_2^2 \left[\frac{a^2}{9} R_2^2 + \frac{2}{15} R_2^4 \right] = \frac{ak_4 R_2^4}{3} \left[\frac{a^2}{3} + \frac{2}{5} R_2^2 \right].
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Находим координату точки приложения равнодействующей силы (при $y = 0$):

$$k_4 \left[\begin{aligned} & z_0^4 - \frac{a_4}{5} - \frac{2}{9} a^2 (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) - \\ & - \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) \end{aligned} \right] = 0,$$

откуда

$$z_0 = \pm \sqrt[4]{ \left[\begin{aligned} & \frac{a_4}{5} + \frac{2}{9} a^2 (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \\ & + \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) \end{aligned} \right] }.$$

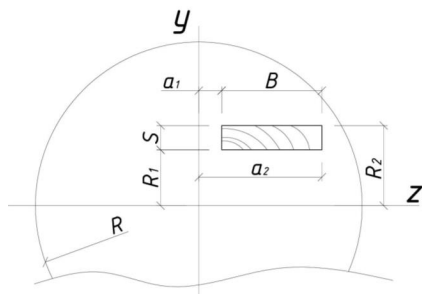


Рис. 2.6. Несимметричное расположение доски в бревне до ее выпилки относительно осей z и y : R_1, R_2, a_1, a_2 – координаты доски в бревне до ее выпилки относительно осей z и y ; R – радиус бревна

При случае несимметричного расположения выпиливаемой доски в бревне относительно осей y и z (рис. 2.6) расчет будет аналогичным.

Начальное напряжение по (2.6):

$$\sigma_H = k_4 (y^4 + 2y^2 z^2 + z^4) - \sigma_0.$$

Равнодействующая внутренняя сила на торце доски до выпиливания ее из бревна:

$$\begin{aligned}
 N &= \int_{R_1}^{R_2} dz \int_{a_1}^{a_2} (k_4(y^2 + z^2)^2 - \sigma_0) dy = \\
 &= \int_{R_1}^{R_2} \left[k_4 \frac{y^5}{5} + 2k_4 z^2 \frac{y^3}{3} + k_4 z^4 y - \sigma_0 y \right]_{a_1}^{a_2} dz = \\
 &= \int_{R_1}^{R_2} \left[\frac{k_4}{5} (a_2^5 - a_1^5) + \frac{2}{3} k_4 z^2 (a_2^3 - a_1^3) + \right. \\
 &\quad \left. k_4 z^4 (a_2 - a_1) - \sigma_0 (a_2 - a_1) \right] dz = \\
 &\quad = \frac{k_4}{5} (a_2^5 - a_1^5) (R_2 - R_1) + \\
 &\quad + \frac{2}{9} k_4 (a_2^3 - a_1^3) (R_2^3 - R_1^3) + \frac{k_4}{5} (a_2 - a_1) (R_2^5 - R_1^5) \\
 &\quad - \sigma_0 (a_2 - a_1) (R_2 - R_1) = (a_2 - a_1) (R_2 - R_1) \\
 &\quad \left[\frac{k_4}{5} (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{2k_4}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0 \right] \\
 N &= (a_2 - a_1) \cdot (R_2 - R_1) \left[\frac{k_4}{5} \left(a_2^4 + a_2^3 a_1 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{2k_4}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0 \right]
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Среднее значение продольного напряжения:

$$\begin{aligned}
 \sigma_m &= \frac{N}{(a_2 - a_1)(R_2 - R_1)} = \\
 &= \frac{k_4}{5} \cdot (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) + \\
 &\quad + \frac{2k_4}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) \cdot (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \\
 &\quad + \frac{k_4}{5} \cdot (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \sigma_{\text{н}} - \sigma_m = k_4(y^2 + z^2)^2 - \sigma_0 - \\
 &= \left[\begin{array}{c} \frac{k_4}{5} \left(\begin{array}{c} a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + \\ a_2 a_1^3 + a_1^4 \end{array} \right) \\ + \frac{2k_4}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2)(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \\ + \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0 \end{array} \right] = \\
 &= k_4 \left[\begin{array}{c} y^4 + 2y^2 z^2 + z^4 - \\ - \frac{1}{5} (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) - \\ - \frac{2}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2)(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) - \\ - \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) \end{array} \right] \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

Изгибающий момент от усилий на торце доски:

$$\begin{aligned}
 M_{y0} &= \int_{a_1}^{a_2} dy \int_{R_1}^{R_2} (\sigma_{\text{н}} - \sigma_m) z dz = \\
 &= \int_{a_1}^{a_2} dy \int_{R_1}^{R_2} k_4 \left[\begin{array}{c} y^4 + 2y^2 z^2 + z^4 - \\ - \frac{1}{5} (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) - \\ - \frac{2}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2)(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) - \\ - \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) \end{array} \right] z dz = \\
 &= k_4 \int_{a_1}^{a_2} \left[\begin{array}{c} y^4 \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} + 2y^2 \frac{R_2^4 - R_1^4}{4} + \frac{R_2^6 - R_1^6}{6} - \\ - \frac{1}{5} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) \\ - \frac{2}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2)(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \\ \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \end{array} \right] dy =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= k_4 \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \right] \left[\begin{array}{l} y^4 + y^2(R_2^2 + R_1^2) + \\ + \frac{1}{3}(R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) - \\ - \frac{1}{5}(a_2^4 + a_2^3a_1 + a_2^2a_1^2 + a_2a_1^3 + a_1^4) - \\ - \frac{2}{9}(a_2^2 + a_2a_1 + a_1^2)(R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) - \\ - \frac{1}{5}(R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \end{array} \right] dy \\
 &= \frac{k_4}{2} (R_2^2 - R_1^2) \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{a_2^3 - a_1^3}{3} (R_2^2 + R_1^2) - \\ - \frac{2}{9} (a_2^2 + a_2a_1 + a_1^2) (R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) (a_2 - a_1) + \\ + \frac{1}{3} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) (a_2 - a_1) - \\ - \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) (a_2 - a_1) \end{array} \right] \\
 &= \frac{k_4}{2} (R_2^2 - R_1^2) (a_2 - a_1) \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3} (R_2^2 + R_1^2) (a_2^2 + a_2a_1 + a_1^2) - \\ - \frac{2}{9} (R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) (a_2^2 + a_2a_1 + a_1^2) + \\ + \frac{1}{3} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) - \\ - \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \end{array} \right] \\
 M_{y0} &= \frac{k_4}{2} (R_2^2 - R_1^2) (a_2 - a_1) \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3} (R_2^2 + R_1^2) (a_2^2 + a_2a_1 + a_1^2) - \\ - \frac{2}{9} (R_2^2 + R_2R_1 + R_1^2) (a_2^2 + a_2a_1 + a_1^2) + \\ + \frac{1}{3} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) - \\ - \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3R_1 + R_2^2R_1^2 + R_2R_1^3 + R_1^4) \end{array} \right] \quad (2.19)
 \end{aligned}$$

Аналогично можно рассчитать функцию для изгибающего момента от внутренних усилий, вызывающих изгиб сортифта прямоугольного сечения на кромку.

Исходными для расчета являются использованные выше функции (2.6) и (2.17) для начальных и средних напряжений в продольном направлении соответственно.

$$\sigma_n = k_4(y^4 + 2y^2z^2 + z^4) - \sigma_0;$$

$$\sigma_m = \frac{N}{(a_2 - a_1)(R_2 - R_1)};$$

$$N = \int_{R_1}^{R_2} dz \int_{a_1}^{a_2} (k_4(y^2 + z^2)^2 - \sigma_0) dy =$$

$$= (a_2 - a_1)(R_2 - R_1) \left[\begin{aligned} & \frac{k_4}{5} (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) + \\ & + \frac{2k_4}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \\ & + \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0 \end{aligned} \right]. \quad (2.20)$$

Среднее значение продольного напряжения:

$$\sigma_m = \frac{k_4}{5} (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) +$$

$$+ \frac{2k_4}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \quad (2.21)$$

$$+ \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - \sigma_0.$$

Напряжение, приводящееся к паре сил изгибающего момента по кромке доски:

$$\sigma = k_4 \left[\begin{aligned} & y^4 + 2y^2z^2 + z^4 - \\ & - \frac{1}{5} (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) - \\ & - \frac{2}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) - \\ & - \frac{1}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) \end{aligned} \right]. \quad (2.22)$$

Аналогично предыдущему решению функцию изгибающего момента, вызывающего изгиб сортимента по кромке, получим решением следующего интеграла:

$$\begin{aligned}
 M_{z0} &= \int_{R_1}^{R_2} dz \int_{a_1}^{a_2} (\sigma_H - \sigma_m) y dy = \\
 &= \int_{R_1}^{R_2} dz \int_{a_1}^{a_2} k_4 \left[\begin{aligned} &y^4 + 2y^2 z^2 + z^4 - \\ &-\frac{1}{5}(a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) - \\ &-\frac{2}{9}(a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2)(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) - \\ &-\frac{1}{5}(R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) \end{aligned} \right] y dy = \quad (2.23) \\
 &= \frac{k_4}{2} (a_2^2 - a_1^2)(R_2 - R_1) \left[\begin{aligned} &\frac{1}{3}(a_2^2 + a_1^2)(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) - \\ &-\frac{2}{9}(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2)(a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) + \\ &+\frac{2}{15}(a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

Функции изгибающих моментов по пласти и по кромке доски – (2.19) и (2.23) соответственно – в результате преобразований могут быть представлены в следующем виде:

$$M_{y0} = k_4 (a_2 - a_1)(R_2 - R_1) \left[\begin{aligned} &\frac{(R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^2}{18} \times \\ &\times (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) + \\ &+\frac{R_2^2 - R_1^2}{30} (2R_2^3 + R_1^2 R_2 - R_2^2 R_1 - 2R_1^3) \end{aligned} \right] \quad (2.24)$$

$$M_{z0} = k_4 (a_2 - a_1)$$

$$(R_2 - R_1) \left[\begin{aligned} &\frac{(a_2 + a_1)(a_2 - a_1)^2}{18} (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \\ &+\frac{a_2^2 - a_1^2}{30} (2a_2^3 + a_1^2 a_2 - a_2^2 a_1 - 2a_1^3) \end{aligned} \right] \quad (2.25)$$

По полученным функциям изгибающих моментов по пласти и по кромке досок были проведены расчеты для бревен со следующими характеристиками:

Древесина I, II и III сортов, сосна, влажностью 12%;

длина $l = 6$ м;

диаметр верхней части бревна $R_{\text{верх}} = 250; 200$ мм;

диаметр нижней части бревна $R_{\text{ниж}} = 200; 150$ мм;

координаты выпиливаемой доски $a_1; a_2; R_2; R_1$ по рис. 2.6.

Результаты расчетов изгибающих моментов по полученным формулам частично проиллюстрированы на рис. 2.7 и 2.8 и сведены в табл. 2.2 (для удобства таблицы представлены в приложении А; в приложении Б более полно показаны графики зависимостей изгибающих моментов от сбега бревна, сортности древесины, верхнего и нижнего диаметра бревна и координат выпиливаемых досок).

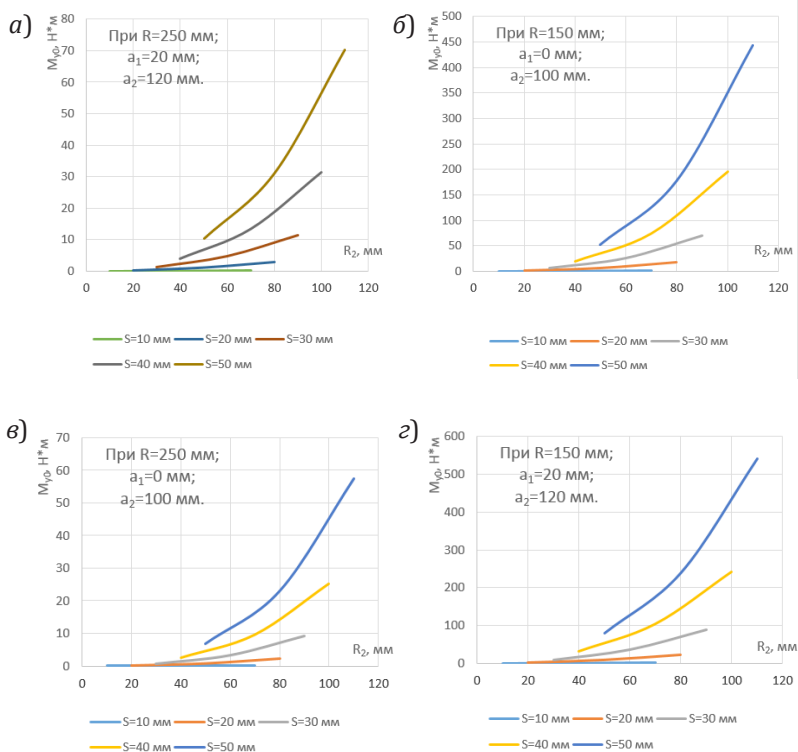


Рис. 2.7. Изменение изгибающего момента по кромке, появляющегося от выходящих на торцы доски начальных напряжений: б, г – на вершинном торце; а, в – на комлевом торце; R_1, R_2 – координаты пластей доски в сечении бревна; a_1, a_2 – координаты кромок доски в сечении бревна; R, R' – радиусы комлевой и вершинной части бревна; S – толщина доски; M_{y0} – изгибающий момент по кромке доски

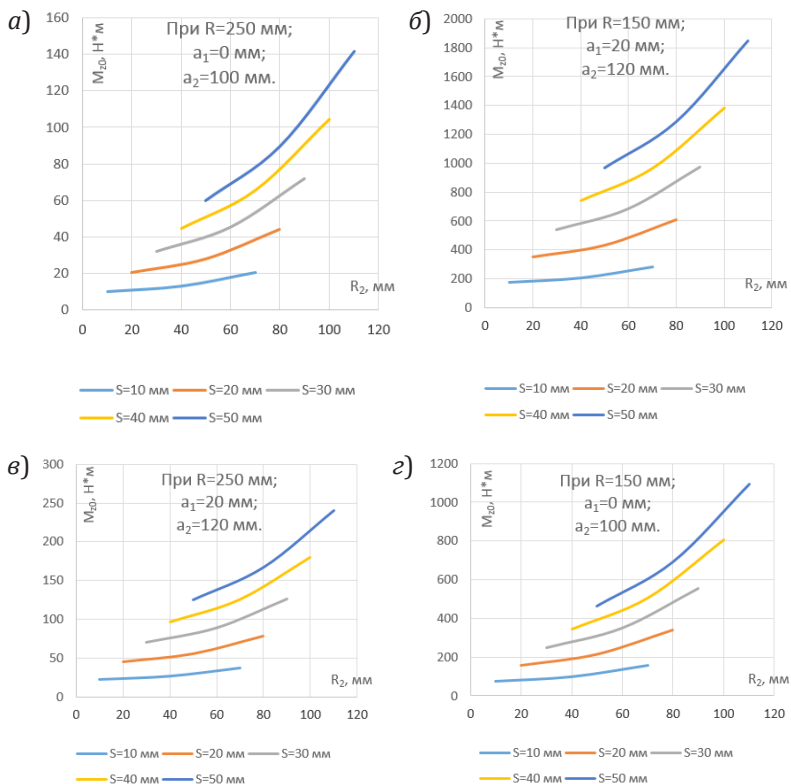


Рис. 2.8. Изменение изгибающего момента по пласти, появляющегося от выходящих на торцы доски начальных напряжений: б, г – на вершинном торце; а, в – на комлевом торце; R_1, R_2 – координаты пластей доски в сечении бревна; a_1, a_2 – координаты кромок доски в сечении бревна; R, R' – радиусы комлевой и вершинной части бревна; S – толщина доски; M_{z0} – изгибающий момент по пласти доски

Результаты свидетельствуют о значительном влиянии начальных напряжений, сформировавшихся в процессе роста дерева, на изменение формы и напряженность пиломатериалов конструкционного назначения, что не учитывалось в предыдущих исследованиях и в практике проектирования строительных конструкций.

2.2.2. Математическая модель продольного коробления. Связь продольного коробления с напряженным состоянием элементов клееных деревянных конструкций

Вычисление прогибов сортиментов при изгибе по кромке и по пласти от действия начальных напряжений.

Расчетная схема сортимента, нагруженного парами внутренних сил, выходящих на его торцы:

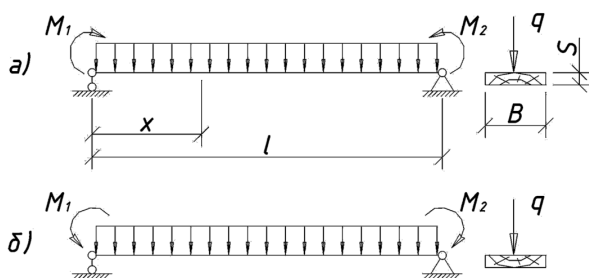


Рис. 2.9. Схема нагружения балки моментами от внутренних сил, выходящими на торец, и собственным весом: *a* – внутренние силы увеличивают прогиб; *б* – внутренние силы препятствуют появлению прогиба от собственного веса материала балки

Расчет прогиба балки в 2-х случаях нагружения.

Случай А (схема нагружения на рис. 2.9, *a*).

Расчет прогиба балки выполнен методом начальных параметров. Опорные реакции:

$$V_1 = \frac{ql}{2} + \frac{M_2 - M_1}{l}; V_2 = \frac{ql}{2} - \frac{M_2 - M_1}{l}. \quad (2.26)$$

Приближенное дифференциальное уравнение упругой линии:

$$EI_y w''_z = -q \frac{x^2}{2} + V_1 x + M_1. \quad (2.27)$$

При первом интегрировании получим уравнение углов поворота сечений:

$$EI_y w'_z = -q \frac{x^3}{6} + V_1 \frac{x^2}{2} + M_1 x + C_1. \quad (2.28)$$

При повторном интегрировании получим уравнение прогибов:

$$EI_y w_z = -q \frac{x^4}{24} + V_1 \frac{x^3}{6} + M_1 \frac{x^2}{2} + C_1 x + D_1, \quad (2.29)$$

где C_1, D_1 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий:

$$\begin{cases} \text{а) } x = 0, & w_z = 0; \\ \text{б) } x = l, & w_z = 0. \end{cases} \quad (2.30)$$

Первая постоянная определена из уравнения (2.29) и условия (2.30, а):

$$D_1 = 0. \quad (2.31)$$

Вторая постоянная найдена из уравнения (2.29) при использовании начального условия (рис. 2.9, б):

$$\begin{aligned} -q \frac{l^4}{24} + V_1 \frac{l^3}{6} + M_1 \frac{l^2}{2} + C_1 l = 0, \text{ откуда} \\ C_1 = -q \frac{l^3}{24} - M_1 \frac{l}{3} - M_2 \frac{l}{6}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Тогда уравнение прогибов будет иметь вид:

$$\begin{aligned} EI_y w_z = -q \frac{x^4}{24} + q \frac{l}{12} x^3 + \frac{M_2 - M_1}{l} \cdot \frac{x^3}{6} + \\ + M_1 \frac{x^2}{2} - qx \frac{l^3}{24} - M_1 x \frac{l}{3} - M_2 x \frac{l}{6}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Прогиб в середине пролета будет равен:

$$\begin{aligned} w_z \Big|_{x=\frac{l}{2}} = \frac{1}{EI_y} \left[\begin{aligned} & -\frac{q}{24} \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^4 + q \frac{l}{12} \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^3 + \\ & \frac{M_2 - M_1}{6l} \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^3 + \frac{M_1}{2} \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2 - \\ & \left[-q \frac{l^3}{24} \cdot \frac{l}{2} - M_1 \frac{l}{3} \cdot \frac{l}{2} - M_2 \frac{l}{6} \cdot \frac{l}{2} \right] \end{aligned} \right] = \\ = -\frac{5ql^4}{384EI_y} - \frac{M_2 + M_1}{16EI_y} l^2. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Аналогичное решение для схемы нагружения (рис. 2.9, б) приводит к следующему результату:

$$w_z|_{x=\frac{l}{2}} = -\frac{5ql^4}{384EI_y} + \frac{M_2 + M_1}{16EI_y} l^2. \quad (2.35)$$

Таким образом, в зависимости от расположения годовичных слоев прогиб прямоугольных сортиментов будет различным.

На этом основании можно сделать вывод, что расположение годовичных слоев в элементах, например, клееных деревянных балок, будет оказывать влияние на ее напряженно-деформированное состояние.

На основании вышеприведенного расчета можно определять среднюю величину начального напряжения в пиломатериалах конструкционного назначения. С другой стороны, учитывая начальные напряжения в пиломатериалах, образовавшиеся в процессе роста деревьев, можно повысить несущую способность клееных деревянных балок.

Учитывая начальные напряжения в пиломатериалах, можно прогнозировать появление в них покоробленности по кромке и снижение сортности по этой причине. При этом очевидно, что собственный вес на величину продольного коробления пиломатериалов по кромке влияния не оказывает. Однако при составлении схемы раскроя бревен на пиломатериалы конструкционного назначения можно планировать в них уменьшение начальных напряжений, что приведет к повышению их качества и прочности.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 2.9, а) максимальное напряжение можно вычислить по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{|M|_{\max}}{W_y}, \quad (2.36)$$

где $|M|_{\max}$ – значение изгибающего момента в опасном сечении.

Функция изгибающего момента:

$$M(x) = -q \frac{x^2}{2} + V_1 x + M_1. \quad (2.37)$$

При исследовании ее на экстремум:

$$\frac{dM}{dx} = V_1 - qx_0 = \frac{ql}{2} + \frac{M_2 - M_1}{l} - qx_0 = 0.$$

Отсюда $x_0 = \frac{\frac{ql}{2} + \frac{M_2 - M_1}{l}}{q}$, тогда:

$$\begin{aligned} |M|_{\max} &= V_1 x_0 - \frac{qx_0^2}{2} + M_1 = \\ &= \frac{ql}{2} x_0 + \frac{M_2 - M_1}{l} x_0 - \frac{qx_0^2}{2} + M_1 = \\ &= \frac{l}{2} \cdot \left(\frac{ql}{2} + \frac{M_2 - M_1}{l} \right) + \frac{M_2 - M_1}{ql} \cdot \left(\frac{ql}{2} + \frac{M_2 - M_1}{l} \right) - \\ & - \frac{q}{2} \cdot \left(\frac{\frac{ql}{2} + \frac{M_2 - M_1}{l}}{q} \right)^2 + M_1 = \frac{ql^2}{4} + 2 \cdot \frac{M_2 - M_1}{2} + \frac{(M_2 - M_1)^2}{ql^2} - \\ & - \frac{ql^2}{8} - \frac{(M_2 - M_1)^2}{2ql^2} + M_1 = \frac{ql^2}{8} + M_2 + \frac{(M_2 - M_1)^2}{2ql^2}, \end{aligned} \quad (2.38)$$

где q – интенсивность распределения собственного веса по длине балки.

Максимальное напряжение в одной доске в выпрямленном состоянии:

$$\sigma_{\max} = \frac{6}{BS^2} \cdot \left[\frac{ql^2}{8} + M_2 + \frac{(M_2 - M_1)^2}{2ql^2} \right]. \quad (2.39)$$

Напряжение в исследуемом сечении в склеенной из досок балке в максимальном случае не должно превышать допускаемого значения (по СП 64.13330.2011).

2.2.3. Способ определения величины начальных напряжений. Отбор заготовок для клееных деревянных конструкций

Ствол дерева напряжен по всему объему. При выпиливании из него досок в них остаются напряжения, сформировавшиеся в процессе роста дерева. Начальные напряжения могут способствовать увеличению прогиба доски от

действия ее собственного веса, а могут и препятствовать проявлению прогибов. На рис. 2.10 приведена схема доски с действующими на нее силами собственного веса и начальными напряжениями.

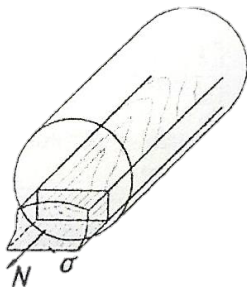


Рис. 2.10. Начальные напряжения в сечении доски до выпилки ее из бревна: N – продольная сила; σ – начальные напряжения

Согласно этой схеме прогиб доски будет существенно различаться при двух положениях наружной и внутренней пластей выпиливаемой доски. Прогиб доски от действия ее собственного веса суммируется с прогибом от действия начальных напряжений (рис. 2.9, б) при верхнем положении наружной пласти; при нижнем положении прогибы вычитаются (рис. 2,9, а).

Таким образом, можно разделить влияние собственного веса доски и начальных напряжений на деформации балки, и практически появляется возможность по прогибу доски со стороны одной и другой пластей оценить ее прочность при изгибе и отдельно определить величину начальных напряжений.

В соответствии с вышесказанным, можно достаточно просто прогнозировать появление продольного пластевого и кромочного коробления досок из-за действующих начальных напряжений.

Прогиб доски при первом измерении складывается из прогиба от действия собственного веса и прогиба, вызванного начальными напряжениями:

$$y_1 = y(q) + y(M). \quad (2.40)$$

При втором измерении после кантования доски:

$$y_2 = y(q) - y(M). \quad (2.41)$$

Разность прогибов при двух измерениях:

$$y_1 - y_2 = y(q) + y(M) - y(q) + y(M) = 2y(M). \quad (2.42)$$

Сумма прогибов:

$$y_1 + y_2 = y(q) + y(M) + y(q) - y(M) = 2y(q). \quad (2.43)$$

Или

$$\frac{y_1 + y_2}{2} = y(q); \quad (2.44)$$

$$\frac{y_1 - y_2}{2} = y(M). \quad (2.45)$$

Таким образом, полусумма прогибов в направлении обеих пластей при кантовании доски равна прогибу ее от собственного веса, а полуразность прогибов равна прогибу, вызванному начальными напряжениями. Это позволяет по-иному подойти к проблеме прочностной сортировки конструкционных пиломатериалов.

Известные и ныне используемые способы прочностной сортировки исключают учет начальных напряжений в пиломатериалах, образовавшихся в стволе дерева в период его роста.

Полученная информация позволяет исключить влияние прогиба из-за действия напряжений роста. При этом измерение прогиба со стороны обеих пластей происходит фактически при одной и той же внешней нагрузке – собственном весе доски.

Принципиальная схема установки для прочностной сортировки пиломатериалов приведена на рис. 2.11.

Установка для прочностной сортировки состоит из кантователя – двух крестовин, закрепленных на валу. Вал

с крестовинами встраивается в конструкцию поперечного цепного транспортера и вращается синхронно с движением цепи с упорами. Для измерения прогиба доски от собственного веса при входе в крестовину предусмотрен преобразователь перемещения, расположенный внизу.

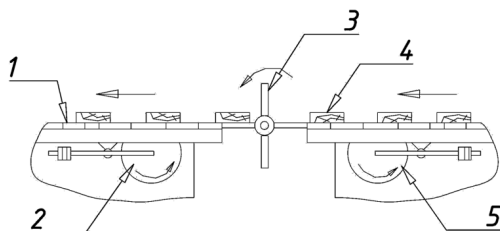


Рис. 2.11. Схема прочностной сортировки пиломатериалов: 1 – поперечный цепной транспортер; 2 – прогибомер маятниковый на выходе доски с конвейера; 3 – кантователь досок; 4 – пиломатериалы; 5 – прогибомер на входе доски в кантователь

Механическая часть преобразователя состоит из маятникового рычага с шарнирной опорой, на одном конце которого находится алюминиевый диск с резиновым внешним ободом. Диск свободно вращается в подшипниках качения. На другом конце рычага расположен регулировочный груз. Усилие прижима диска к доске должно быть незначительным, чтобы на результат измерения прогиба не оказало влияние сопротивление этого диска. При этом сопротивление диска абсолютно не повлияет на величину измеряемого начального напряжения. Влияние на величину модуля упругости будет зависеть от силы прижима диска к поверхности испытываемой доски.

2.2.4. Влияние начальных напряжений на НДС клееных деревянных балок и их несущую способность

По разным оценкам, от 25 до 40 % пиломатериалов в процессе их производства из-за покоробленности понижают

свою сортность. Следует отметить, что из-за начальных напряжений в деталях и заготовках происходит понижение несущей способности деревянных конструкций.

Рассмотрим доску, выпиленную в бревне (рис. 2.12). Расчетная схема и напряжения доски от действия начального напряжения, сформировавшегося в процессе роста дерева, представлено на рис. 2.13–2.15.

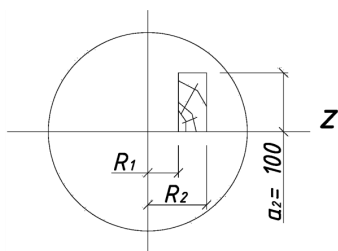


Рис. 2.12. Схема расположения выпиливаемой доски в бревне: a_1 , a_2 , R_1 , R_2 – координаты доски относительно осей бревна

Исходные данные: a_1 , a_2 , R_1 , R_2 .

$$k_{4(1)} = \dots, \quad k_{4(2)} = \dots \quad (2.50)$$

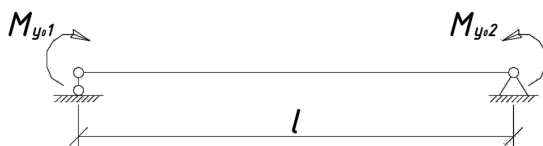


Рис. 2.13. Расчетная схема доски как однопролетной балки с учетом воздействия начальных напряжений, но без учета воздействия собственного веса доски: l – длина доски; M_{y01} , M_{y02} – изгибающие моменты на концах доски

Рассмотрим повышение нагрузочной способности одной доски в среднем сечении с учетом начальных напряжений. В соответствии с рис. 2.9 значения максимального напряжения и максимального момента в середине пролета можно представить в следующем виде:

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{8} + \frac{M_1+M_2}{2}; \quad (2.51)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{6}{BS^2} \cdot \left[\frac{ql^2}{8} + \frac{M_1+M_2}{2} \right] \leq [\sigma]; \quad (2.52)$$

$$M'_{\max} = \frac{q'l^2}{8} - \frac{M_1+M_2}{2}; \quad (2.53)$$

$$\sigma'_{\max} = \frac{6}{BS^2} \cdot \left[\frac{q'l^2}{8} - \frac{M_1+M_2}{2} \right] \leq [\sigma], \quad (2.54)$$

где q, q' – значения интенсивности распределенной нагрузки при без учета начальных напряжений и с учетом таких напряжений;

M_1, M_2 – значения изгибающих моментов от выходящих на торцы досок начальных напряжений.

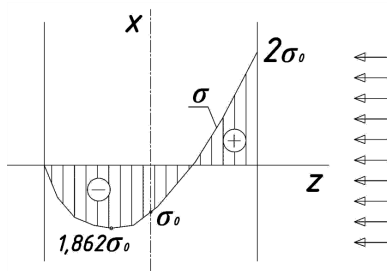


Рис. 2.14. Напряжения в стволе дерева при внешнем воздействии (ветровая нагрузка)

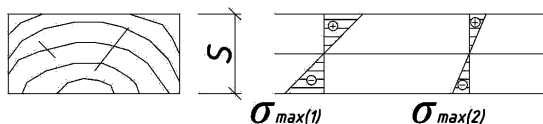


Рис. 2.15. Эпюры напряжений на торцах доски от действия начальных напряжений: $\sigma_{\max(1)}$ и $\sigma_{\max(2)}$ – напряжения на разных концах доски

Отсюда можно найти отношение напряжений по 2-м вариантам расположения годовичных слоев:

$$\frac{ql^2}{8} + \frac{M_1+M_2}{2} = \frac{BS^2}{6} [\sigma], \text{ откуда } q = \frac{8}{l^2} \left[\frac{BS^2}{6} [\sigma] - \frac{M_1+M_2}{2} \right]. \quad (2.55)$$

Аналогично:

$$\frac{ql^2}{8} - \frac{M_1+M_2}{2} = \frac{BS^2}{6} [\sigma], \text{ откуда } q' = \frac{8}{l^2} \left[\frac{BS^2}{6} [\sigma] + \frac{M_1+M_2}{2} \right]. \quad (2.56)$$

Тогда, согласно (5) и (6), отношение нагрузок на доску по двум вариантам положения годовичных слоев:

$$\frac{q'}{q} = \frac{\frac{8}{l^2} \left[\frac{BS^2}{6} [\sigma] + \frac{M_1+M_2}{2} \right]}{\frac{8}{l^2} \left[\frac{BS^2}{6} [\sigma] - \frac{M_1+M_2}{2} \right]}. \quad (2.57)$$

Анализируя напряжения в клееной балке, используя формулы для изгибающих моментов по пласти одной доски, вырезанной из бревна с диаметром верхнего сечения R_1 , нижнего сечения R_2 , длиной l и координатами расположения доски a_1, a_2 .

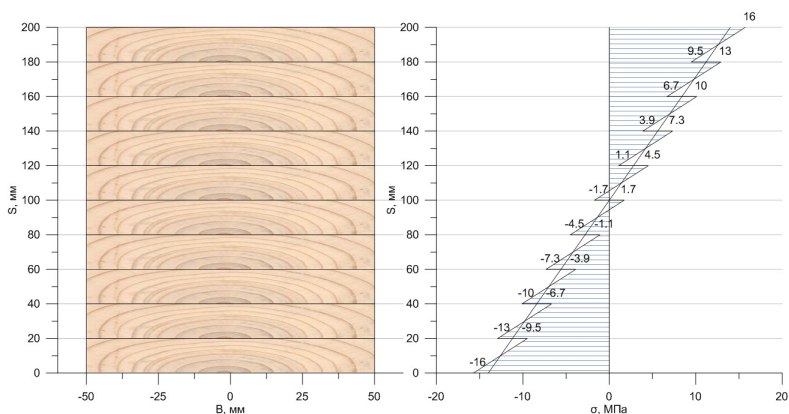


Рис. 2.16. Вариант 1 расположения досок в клееной балке (при условном предположении, что все доски идентичны друг другу): S, B – высота и ширина досок в балке; σ – напряжения в досках; ориентация годовых колец условно показана штриховкой

На рис. 2.16 показана балка, в которой все доски расположены сжатой зоной начальными напряжениями вниз. В такой балке максимальные напряжения в зоне растяжения

увеличиваются за счет начальных напряжений, однако нежелательным является увеличение напряжения в сжатой зоне, поскольку прочность древесины при сжатии вдоль волокон меньше, чем при растяжении. Прочность наиболее слабой (сжатой) зоны понизится в число раз, равное:

$$n' = \frac{\sigma_{\max}^c + \sigma_{(M)}}{[\sigma_c]}, \quad (2.58)$$

где σ_{\max}^c – наибольшее сжимающее напряжение в сжатой зоне от действия нагрузки; $\sigma_{(M)}$ – начальное напряжение в доске.

В другом варианте расположения годовичных слоев (рис. 2.17) напряжения уменьшаются и в сжатой, и в растянутой зонах.

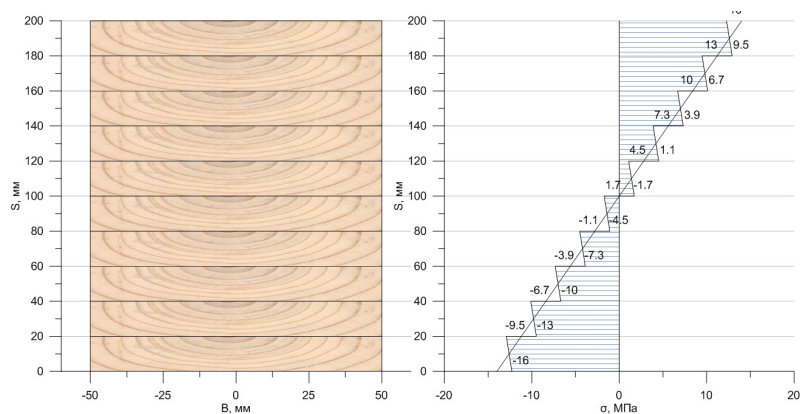


Рис. 2.17. Вариант 2 расположения досок в клееной балке (при условном предположении, что все доски идентичны друг другу): S, B – высота и ширина досок в балке; σ – напряжения в досках; ориентация годовых колец условно показана штриховкой

Грузоподъемность балки возрастет в число раз, равное:

$$n' = \frac{[\sigma_c]}{\sigma_{\max}^c - \sigma_{(M)}}. \quad (2.59)$$

Расположение годовичных слоев, приведенное на рис. 2.18, способствует уменьшению напряжений в более прочной

(растянутой) зоне и увеличению напряжения в более слабой (сжатой) зоне, что не является рациональным. Несущая способность балки понижается.

$$n' = \frac{|\sigma_{\max}|}{[\sigma_c]} \quad (2.60)$$

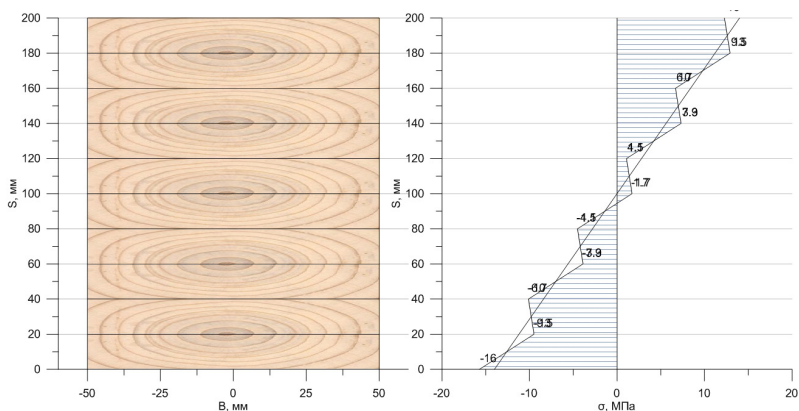


Рис. 2.18. Вариант 3 расположения досок в клееной балке (при условном предположении, что все доски идентичны друг другу): S, B – высота и ширина досок в балке; σ – напряжения в досках; ориентация годовых колец условно показана штриховкой

Наиболее рационально такое расположение годичных колец, при котором напряжения возрастают в более прочной (растянутой) зоне и уменьшаются в слабой (сжатой).

Аналогичный расчет можно выполнить для более толстых досок (результаты расчета приведены в прил. А–В).

Рассмотрим влияние толщины досок на несущую способность клееных деревянных балок. Принимая одинаковую схему нагружения и закрепления балки, рассмотрим два варианта поперечного сечения:

- 1) с использованием досок толщиной 40 мм;
- 2) с использованием досок толщиной 20 мм.

$$R_1 = 0; R_2 = 40 \text{ мм}; B = 100 \text{ мм}.$$

Согласно формуле (2.51), значение максимального изгибающего момента в середине пролета

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{8} + \frac{M_1 + M_2}{2}. \quad (2.61)$$

Используя формулу (2.52), можно получить значение максимального в середине пролета:

$$\sigma_{\max} = \frac{6}{BS^2} \cdot \left[\frac{ql^2}{8n^2} + \frac{M_1 + M_2}{2} \right] \leq [\sigma], \quad (2.62)$$

где n – количество досок в пакете (по схеме сечения).

Из последнего можно вычислить допускаемую нагрузку для первой схемы сечения:

$$\begin{aligned} \frac{ql^2}{8n^2} + \frac{M_1 + M_2}{2} &= \frac{BS^2}{6} [\sigma]; \\ q &= \frac{8n_1^2}{l^2} \left[\frac{BS_1^2}{6} [\sigma] - \frac{M_{11} + M_{21}}{2} \right]. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Для второй схемы аналогично получим:

$$q' = \frac{8n_2^2}{l^2} \left[\frac{BS_2^2}{6} [\sigma] - \frac{M_{12} + M_{22}}{2} \right]. \quad (2.64)$$

Отношение грузоподъемности балок по этим двум схемам:

$$\frac{q'}{q} = \frac{n_2^2 \left[\frac{BS_2^2}{6} [\sigma] - \frac{M_{12} + M_{22}}{2} \right]}{n_1^2 \left[\frac{BS_1^2}{6} [\sigma] - \frac{M_{11} + M_{21}}{2} \right]}. \quad (2.65)$$

Приведенное решение позволяет оценить влияние начальных напряжений на грузоподъемность клееных деревянных балок. Это влияние существенное и учет его на практике позволяет сократить расход древесины.

При изготовлении деревянных балок, склеенных из более тонких досок (например, 20 мм), их грузоподъемность возрастает до 15% по сравнению с балками, склеенными из досок толщиной 50 мм. Аналогичное сравнение можно выполнить для любых других сечений.

Выводы

1. По размеру ядровой зоны сечения ствола можно определить не только величину начальных напряжений

в дереве, но и соотношение пределов прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон.

2. Используя полученные функции изгибающих моментов по пласти и кромке доски от выходящих на торце начальных напряжений, можно проанализировать изменение формы конструкционных пиломатериалов и напряженно-деформированное состояние изготавливаемых из них строительных деревянных конструкций.

3. При изготовлении деревянных балок, клеенных из более тонких досок (например, 20 мм), их грузоподъемность возрастает до 15% по сравнению с балками, клеенными из досок толщиной 50 мм.

4. По полученным математическим моделям при использовании тех же заготовок для строительных деревянных конструкций (т. е. дополнительных капитальных затрат не требуется) можно составить компьютерные программы составления и склеивания наиболее рациональных вариантов балок, тем самым повышая грузоподъемность одной доски до 25%, а всей балки – до 2 раз.

Глава 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ И СЖАТИИ ВДОЛЬ ВОЛОКОН

Целью исследований явилось проведение экспериментов по определению предела прочности древесины (лиственницы даурской) при изгибе и сжатии вдоль волокон для проверки достоверности аналитических исследований.

Изготовление опытных образцов было осуществлено в соответствии с требованиями [1–4]. В лаборатории, где хранились экспериментальные образцы, поддерживался температурно-влажностный режим при помощи калориферов. Температура в лаборатории (20 ± 1) °С, влажность древесины перед испытаниями была в пределах 8–12 %. Фактические пороки древесины, выявленные при визуальном осмотре, были сопоставлены с допускаемыми. Проведение испытаний проводилось в механической лаборатории СПбГАСУ.

3.1. Методика проведения лабораторных экспериментальных исследований

3.1.1. Определение предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон

Лабораторные экспериментальные исследования были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 16483.10–73 «Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон».

Используемая аппаратура:

- машина испытательная по ГОСТ 7855–84 с погрешностью измерения нагрузки не более 1%; использовалась испытательная машина Р-5;

- штангенциркуль по ГОСТ 166–80 с погрешностью измерения не более 0,1 мм;
- приспособление к испытательной машине по ГОСТ 16483.10–73;
- аппаратура для определения влажности по ГОСТ 16483.7–71;
- электронные весы Ohaus pioneer.

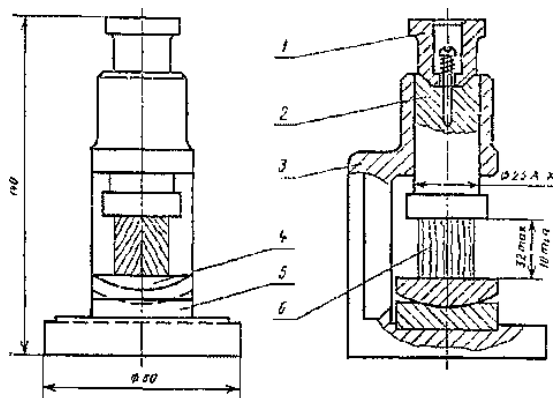


Рис. 3.1. Машина испытательная: 1 – колпачок; 2 – пуансон; 3 – корпус; 4 – шаровая опора; 5 – плита; 6 – образец

Образцы древесины были изготовлены в форме прямоугольной призмы с основанием 20×20 мм и длиной вдоль волокон 30 мм. Точность изготовления, влажность и количество образцов соответствовали требованиям ГОСТ 16483.0–89.

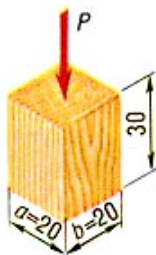


Рис. 3.2. Образец для проведения испытаний:
 P – прикладываемая нагрузка

Порядок проведения испытаний

1. Нанесение маркировки на боковую поверхность образца с указанием его номера и даты.

2. Измерение размеров a и b поперечного сечения образца на середине длины с погрешностью не более 0,1 мм.

3. Образец помещают на шаровую опору приспособления для испытания на сжатие. Нагрузку на образец передают через пуансон. Образец нагружают равномерно с постоянной скоростью нагружения 5 кН/мин (используется машина с электромеханическим приводом). Скорость должна соответствовать требованию: разрушение образца должно произойти через $(1,0 \pm 0,5)$ мин после начала нагружения. Максимальную нагрузку P измеряют с погрешностью не более 1%. Испытания проводят до начала разрушения образца.

4. После испытаний определяют влажность образцов в соответствии с требованиями ГОСТ 16483.7–71. Пробой для определения влажности является весь образец. Минимальное количество испытываемых на влажность образцов должно соответствовать ГОСТ 16483.0–78. Пробы на влажность, очищенные от заусенцев и опилок, взвешивают с погрешностью не более 0,001 грамм. Далее пробы помещают в сушильный шкаф с температурой $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$, после высушивания образцы взвешивают и определяют их влажность, плотность древесины в момент испытания, при влажности 12% и условную плотность.

5. Статистическая обработка результатов по ГОСТ 16483.0–89 и определение расчетного сопротивления древесины сжатию вдоль волокон.

3.1.2. Определение предела прочности древесины при статическом изгибе

В процессе выполнения анализа существующей литературы и существующих сведений о поведении древесины под нагрузкой, сформулированы основные направления исследования, включая программу экспериментов. Экспериментальные исследования были направлены на определение предела прочности при изгибе деревянных материалов.

Лабораторные экспериментальные исследования были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 16483.3–84 «Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе».

Используемая аппаратура:

- машина испытательная по ГОСТ 16483.9–73 с погрешностью измерения нагрузки не более 1 %;
- штангенциркуль по ГОСТ 166–80 с погрешностью измерения не более 0,1 мм;
- приспособление к испытательной машине по ГОСТ 16483.3–84;
- электронные весы Ohaus pioneer.

Образцы древесины были изготовлены в форме прямоугольного бруска с поперечным сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 300 мм. Точность изготовления, влажность и количество образцов соответствовали требованиям ГОСТ 16483.0–89. Схема испытаний приведена на рис. 3.3–3.4.

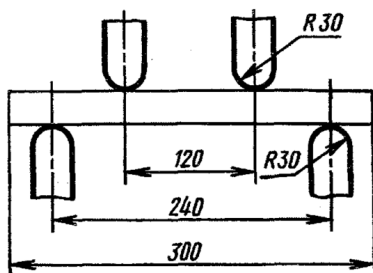


Рис. 3.3. Механизм нагружения машины испытательной для определения прочности древесины при изгибе

Порядок проведения испытаний

1. Нанесение маркировки на боковую поверхность образца с указанием его номера и даты.
2. Измерение размеров a и b поперечного сечения образца на середине длины с погрешностью не более 0,1 мм. На середине длины образца также замеряют b – в радиальном направлении и высоту h – в тангенциальном направлении.

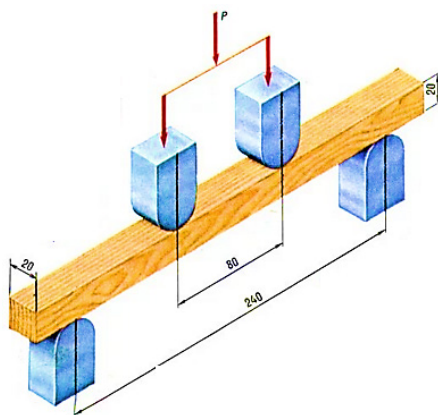


Рис. 3.4. Закрепленный образец для проведения испытаний: P – прикладываемая нагрузка

3. Образец помещают на двух опорах приспособления для испытания на изгиб, расстояние между опорами должно составлять 240 мм. Образец загружают в одной точке между опорами (рис. 3.4).

4. Нагружение образца проводят в статическом режиме равномерно со скоростью приложения нагрузки 5 кН/мин. Испытания проводят до разрушения образца, то есть до начала движения стрелки силоизмерителя в обратную сторону.

5. После испытаний определяют влажность образцов в соответствии с требованиями ГОСТ 16483.7–71. Пробой для определения влажности является весь образец. Минимальное количество испытываемых на влажность образцов должно соответствовать ГОСТ 16483.0–78. Пробы на влажность, очищенные от заусенцев и опилок, взвешивают с погрешностью не более 0,001 г. Далее пробы помещают в сушильный шкаф с температурой $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$, после высушивания образцы взвешивают и определяют их влажность, плотность древесины в момент испытания, при влажности 12 % и условную плотность.

6. Статистическая обработка результатов по ГОСТ 16483.0–89 и определение предела прочности древесины при изгибе.

3.2. Результаты экспериментального исследования прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон

3.2.1. Определение предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон

Эксперимент был проведен совместно с аспиранткой СПбГАСУ Акопян А. Л. в ноябре 2015 г. в лаборатории СПбГАСУ.

Были изготовлены опытные образцы прямоугольной формы, размеры образцов определялись с точностью до 0,1 мм. Количество образцов на испытание по определению сопротивления сжатию вдоль волокон составило 110 шт. Древесина образцов – лиственница даурская, температура в лаборатории (20 ± 1) °С, влажность образцов приведена в итоговой сводной таблице результатов испытания сжатия (табл. 3.1).

После обработки результатов, полученных в ходе испытаний, некоторые результаты имеют отклонение по сравнению со средней величиной показателя плотности. С целью уменьшения ошибок нормативной плотностью должно быть принято среднее значение.

Протокол определения влажности образцов, плотности и предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон приведен в табл. 3.1.

Графики зависимости перемещений от приложенной нагрузки для образцов 1–110 представлены на рис. 3.5–3.10.

Результаты статической обработки результатов предела прочности

Среднее арифметическое значение 20,58 МПа;

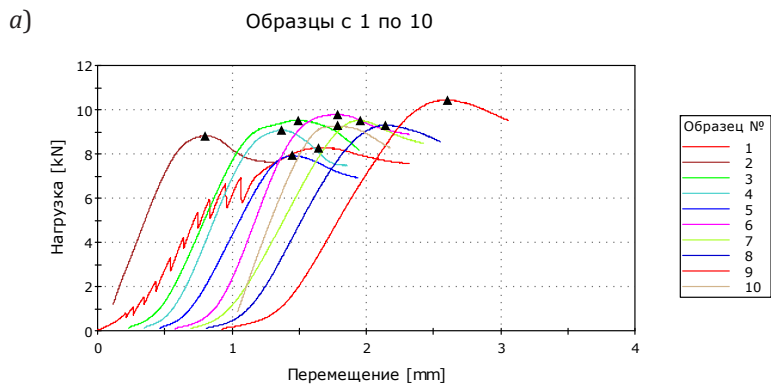
Среднее квадратическое отклонение S группы, содержащей $n = 110$ результатов измерений, 2,94 МПа;

Средняя ошибка среднего арифметического 0,28 МПа;

Коэффициент вариации 14%;

Показатель точности испытания 3%.

Значение нормативного сопротивления, являющегося наименьшим вероятным значением предела прочности чистой древесины составит 20,52 МПа. Расчетное сопротивление на скалывание древесины вдоль волокон: 9,21 МПа. Расчетное сопротивление на сжатие древесины вдоль волокон: 4,51 МПа.



б) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 11 по 20.

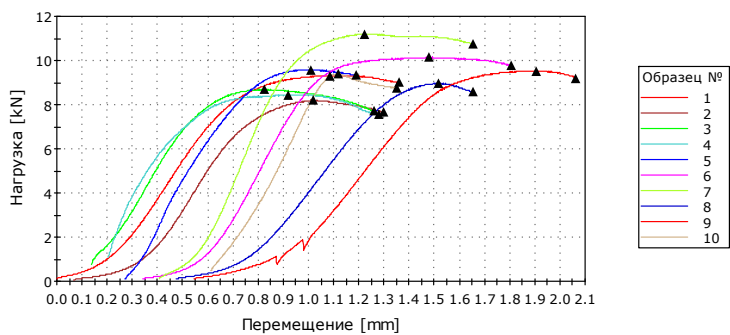
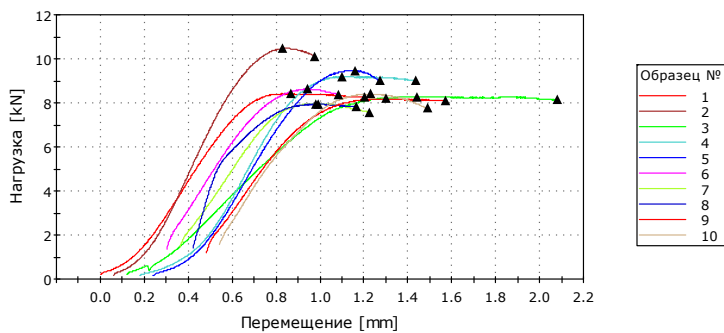


Рис. 3.5. Результаты испытаний на сжатие вдоль волокон:
а) образцы с 1 по 10; б) образцы с 11 по 20

а) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 21 по 30



б) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 31 по 40

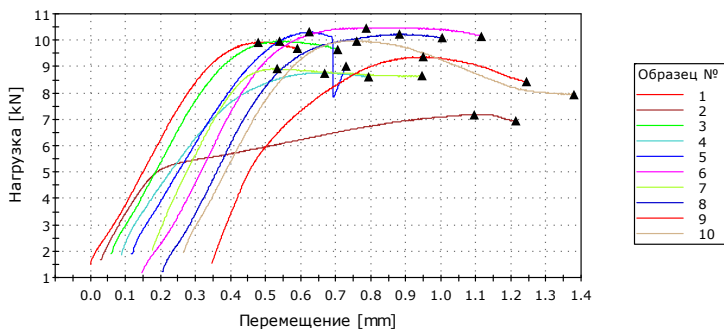
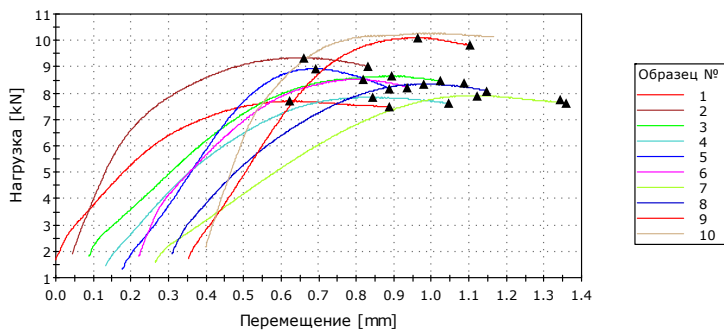


Рис. 3.6. Результаты испытаний на сжатие вдоль волокон:
а) образцы с 21 по 40; б) образцы с 11 по 20

а) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 41 по 50



б) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 51 по 60

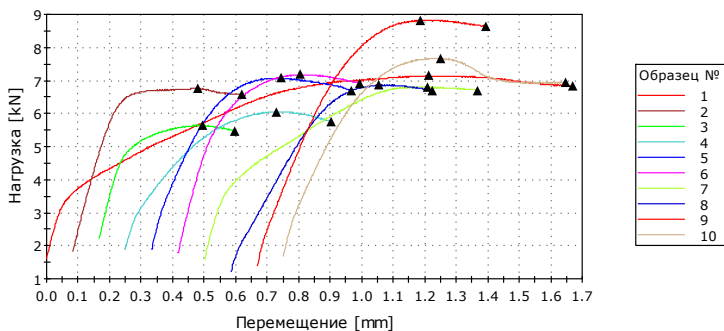
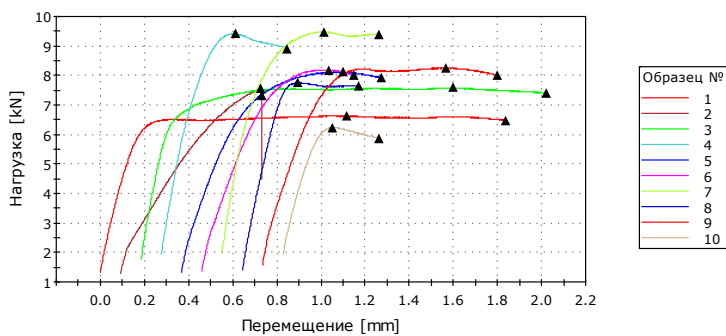


Рис. 3.7. Результаты испытаний на сжатие вдоль волокон:
а) образцы с 31 по 50; б) образцы с 51 по 60

а) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 61 по 70



б) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 71 по 80

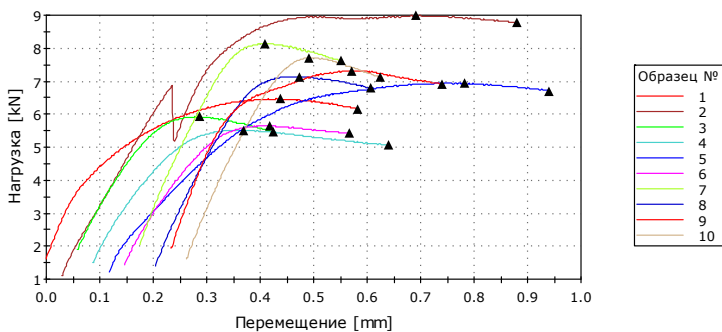
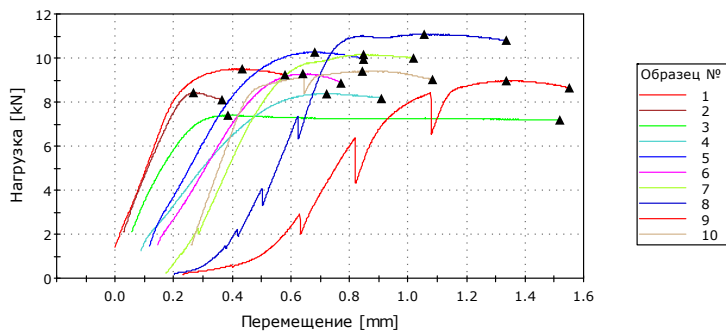


Рис. 3.8. Результаты испытаний на сжатие вдоль волокон:
а) образцы с 61 по 70; б) образцы с 71 по 80

а) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 81 по 90



б) Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 91 по 100

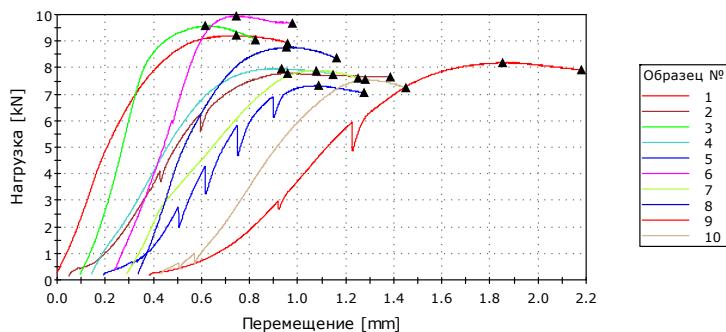


Рис. 3.9. Результаты испытаний на сжатие вдоль волокон: а) образцы с 81 по 90; б) образцы с 91 по 100

Таблица 3.1

Протокол определения влажности, плотности и предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон

Номер образца	Размеры образца			Предельная нагрузка	Вес образца			Относит. влажность образца	Плотность образца	Предел прочности при W	Предел прочности при W=12%
	a, мм	b, мм	h, мм		F, кН	G, г	Gсух, г				
1	19.88	19.30	31.98	8,28	7,82	5,83	34,11	637,07	21,57	53,93	
2	20,37	21,04	31,82	8,82	7,17	5,47	31,12	525,83	20,57	51,43	
3	20,35	19,72	32,36	9,54	8,12	6,09	33,28	625,44	23,76	59,40	
4	20,38	20,33	31,67	9,09	8,57	6,33	35,28	652,89	21,93	54,83	
5	19,70	20,72	31,68	7,93	7,01	5,30	32,41	542,17	19,43	48,58	
6	19,08	21,05	31,73	9,79	8,02	6,08	32,06	629,64	24,36	60,90	
7	20,85	20,31	31,66	9,52	8,10	6,13	32,17	604,32	22,48	56,20	
8	20,28	20,34	32,08	9,31	8,53	6,31	35,26	644,76	22,57	56,43	
9	20,34	20,82	31,64	10,44	8,44	6,43	31,23	629,98	24,65	61,63	
10	19,20	20,47	31,82	9,28	7,35	5,56	32,22	587,40	23,60	59,00	
11	20,46	20,66	31,71	9,32	8,21	6,23	31,75	612,36	22,05	55,13	
12	19,78	20,74	31,48	8,19	6,90	5,26	31,01	533,91	19,97	49,93	
13	20,75	20,25	31,68	8,69	8,58	6,32	35,66	644,40	20,68	51,70	
14	20,72	19,38	32,03	8,45	7,77	5,87	32,39	604,43	21,05	52,63	
15	20,41	19,88	31,60	9,59	8,38	6,23	34,47	653,58	23,62	59,05	
16	20,96	20,05	32,05	10,14	8,54	6,41	33,20	633,90	24,13	60,33	
17	21,00	20,42	31,80	11,20	8,71	6,62	31,50	638,58	26,12	65,30	
18	19,92	20,14	31,91	8,97	7,99	6,00	33,33	624,36	22,35	55,88	
19	20,65	20,80	32,01	9,54	8,90	6,58	35,20	647,25	22,21	55,53	
20	20,65	20,02	31,82	9,39	8,28	6,24	32,66	629,28	22,72	56,80	
21	19,39	19,55	31,84	8,42	7,41	5,65	31,21	613,77	22,22	55,55	
22	20,72	20,26	31,86	10,48	9,40	6,81	38,11	702,91	24,97	62,43	
23	19,96	20,29	32,18	8,29	7,91	5,92	33,46	606,56	20,48	51,20	
24	19,82	20,15	31,94	9,19	8,03	6,02	33,41	629,20	23,02	57,55	
25	20,67	20,47	31,91	9,47	8,46	6,34	33,43	626,44	22,38	55,95	
26	19,93	20,61	33,08	8,63	7,28	5,63	29,34	535,63	21,01	52,53	
27	20,89	19,28	32,06	7,97	6,82	5,29	28,83	527,78	19,78	49,45	
28	20,80	20,13	31,67	7,95	7,31	5,52	32,39	551,49	18,98	47,45	
29	20,22	20,27	32,08	8,19	7,97	5,92	34,79	606,47	19,99	49,98	
30	20,55	20,46	31,72	8,41	7,43	5,63	31,95	557,03	19,99	49,98	
31	20,57	20,07	32,30	9,91	8,43	6,25	34,98	632,26	24,01	60,03	
32	20,49	19,79	32,23	7,19	7,21	5,38	33,98	551,45	17,74	44,35	
33	19,84	20,87	31,66	9,96	8,46	6,28	34,57	644,97	24,06	60,15	
34	21,70	20,96	32,33	8,76	7,64	5,74	33,05	519,29	19,27	48,18	
35	20,23	20,61	32,80	10,31	8,69	6,53	32,92	635,07	24,72	61,80	
36	21,02	20,45	31,86	10,48	8,71	6,44	35,13	635,84	24,38	60,95	
37	19,75	20,77	32,27	8,91	8,26	6,27	31,73	624,14	21,73	54,33	
38	19,26	20,82	31,93	10,22	8,03	6,10	31,60	627,40	25,50	63,75	
39	21,05	19,78	32,76	9,36	8,14	6,12	33,05	597,06	22,48	56,20	
40	20,53	19,75	32,70	9,98	8,19	6,01	36,25	617,40	24,62	61,55	
41	19,60	20,74	31,92	7,70	6,94	5,29	31,08	534,62	18,95	47,38	
42	20,02	20,37	31,72	9,35	8,07	6,06	33,16	623,63	22,92	57,30	
43	20,30	19,63	32,14	8,65	7,80	5,77	35,25	609,02	21,72	54,30	
44	20,76	19,36	32,78	7,85	6,81	5,24	29,87	516,52	19,52	48,80	
45	20,93	20,11	32,56	8,93	7,18	5,53	29,87	523,84	21,22	53,05	
46	19,50	20,70	31,82	8,53	7,99	6,00	33,09	621,92	21,13	52,83	
47	20,77	20,04	32,22	7,91	7,12	5,42	31,23	530,76	19,01	47,53	
48	20,54	20,37	31,96	8,35	7,50	5,69	31,78	560,65	19,95	49,88	
49	21,05	20,08	32,18	10,12	8,32	6,29	32,27	611,46	23,94	59,85	
50	20,68	20,18	32,11	10,28	8,51	6,38	33,43	635,36	24,63	61,58	
51	20,78	20,76	32,22	7,15	8,07	6,02	34,01	580,31	16,56	41,40	
52	20,79	19,96	32,02	6,76	7,35	5,65	30,09	552,86	16,30	40,75	
53	20,64	20,26	32,30	5,64	7,00	5,36	30,53	517,89	13,49	33,73	
54	20,55	19,72	31,73	6,06	7,05	5,21	35,32	548,20	14,96	37,40	
55	20,55	20,65	31,77	7,07	7,63	5,59	36,40	577,39	17,01	42,53	
56	19,74	20,04	32,46	7,18	7,94	5,90	34,58	618,34	18,15	45,38	
57	20,55	19,57	32,04	6,80	8,26	6,06	36,27	640,65	16,92	42,30	
58	20,75	20,29	32,05	6,87	7,31	5,40	35,51	541,81	16,31	40,78	
59	19,78	20,87	31,87	8,83	8,32	6,23	33,52	632,17	21,38	53,45	
60	21,00	20,35	31,92	7,67	8,55	6,28	36,17	626,49	17,95	44,88	

Продолжение табл. 3.1

61	21.11	20.93	32.63	6,64	8,87	6,76	31,26	615,11	15,02	37,55
62	20.57	20.46	31.71	7,57	8,67	6,39	35,68	649,95	17,98	44,95
63	20.24	19.96	32.31	7,59	8,09	6,22	29,99	619,63	18,79	46,98
64	20.29	20.61	31.87	9,43	9,32	6,63	40,61	699,39	22,55	56,38
65	20.71	20.62	33.18	8,12	9,02	6,51	38,62	636,80	19,02	47,55
66	19.85	20.77	31.99	8,19	7,94	6,10	30,19	601,64	19,87	49,68
67	20.34	20.67	32.29	9,49	8,42	6,48	30,00	620,45	22,58	56,45
68	21.21	20.30	31.61	7,76	7,86	6,03	30,32	577,37	18,02	45,05
69	20.27	19.70	32.08	8,27	7,76	5,47	41,73	605,54	20,71	51,78
70	20.70	20.58	32.36	6,24	8,60	6,41	34,28	624,06	14,64	36,60
71	20.31	19.92	31.76	6,46	7,28	5,42	34,22	566,49	15,97	39,93
72	20.01	20.73	31.62	8,99	7,48	5,93	26,29	570,59	21,67	54,18
73	20.55	20.94	32.29	5,92	7,57	5,59	35,37	544,51	13,76	34,40
74	20.30	20.58	32.18	5,52	8,16	5,97	36,78	607,19	13,20	33,00
75	20.32	20.18	32.46	6,94	7,43	5,56	33,71	558,51	16,93	42,33
76	19.56	20.55	31.92	5,64	8,19	6,06	35,09	638,48	14,04	35,10
77	20.43	20.52	32.70	8,14	8,05	5,60	43,77	587,08	19,41	48,53
78	20.80	20.20	32.22	7,14	7,99	5,86	36,26	590,14	17,00	42,50
79	20.64	20.75	32.15	7,32	8,43	6,41	31,49	612,02	17,09	42,73
80	21.14	20.22	31.72	7,72	7,91	5,95	32,90	583,39	18,05	45,13
81	20.32	20.87	31.76	9,51	9,35	5,77	62,12	694,05	22,43	56,08
82	20.57	19.85	32.15	8,43	8,10	6,00	34,88	616,88	20,65	51,63
83	20.27	20.90	31.80	7,40	8,39	6,44	30,18	622,41	17,46	43,65
84	19.59	20.42	31.88	8,39	8,15	5,91	37,98	638,99	20,96	52,40
85	20.49	20.82	31.97	10,27	8,44	6,43	31,20	618,47	24,07	60,18
86	20.30	20.65	31.73	9,28	8,32	6,36	30,89	625,66	22,14	55,35
87	19.96	20.64	31.84	10,16	8,01	6,15	30,14	610,34	24,67	61,68
88	20.84	20.69	33.33	11,08	8,13	6,34	28,17	565,51	25,71	64,28
89	19.10	20.00	31.70	8,98	7,53	5,70	32,19	621,67	23,51	58,78
90	20.65	19.76	31.69	9,40	7,53	5,83	29,07	582,02	23,04	57,60
91	20.30	20.15	31.89	9,21	8,54	6,27	36,27	654,91	22,52	56,30
92	20.16	20.38	32.36	7,80	7,54	5,63	33,74	566,74	18,99	47,48
93	19.70	20.99	31.79	9,58	7,54	5,69	32,37	573,29	23,17	57,93
94	20.73	20.26	32.39	7,97	7,73	5,73	34,83	568,31	18,98	47,45
95	20.18	20.55	32.06	7,33	7,33	5,39	36,02	551,02	17,66	44,15
96	20.38	20.74	31.38	9,95	9,06	5,57	62,72	682,84	23,53	58,83
97	20.80	20.16	32.08	7,90	6,96	5,30	31,50	517,62	18,85	47,13
98	21.36	21.48	31.93	8,77	9,17	6,74	35,97	625,94	19,11	47,78
99	20.72	20.41	32.28	8,20	8,74	6,37	37,12	639,95	19,39	48,48
100	20.57	20.14	31.91	7,55	7,25	5,46	32,92	548,58	18,24	45,60
101	21.41	20.45	32.18	9,52	8,47	6,19	36,88	601,44	21,75	54,38
102	20.38	19.96	32,02	9,37	8,70	6,14	41,60	667,93	23,03	57,58
103	20.84	20.19	31,83	8,93	8,79	6,23	41,10	656,25	21,22	53,05
104	19.93	20,81	32,21	7,16	6,89	5,11	34,85	515,61	17,26	43,15
105	20,37	20,33	32,47	8,30	7,80	5,74	35,93	580,15	20,05	50,13
106	20,42	20,62	31,08	9,48	7,90	5,94	33,09	603,60	22,51	56,28
107	20,68	20,53	31,96	9,46	8,41	6,30	33,43	619,50	22,27	55,68
108	20,89	20,49	31,97	8,70	7,57	5,75	31,65	552,97	20,31	50,78
109	20,89	20,49	31,86	8,93	8,49	6,36	33,41	622,49	20,86	52,15
110	20,42	20,68	31,97	8,38	8,41	6,13	37,16	622,87	19,85	49,63
Среднее				8,54			34,14	602,04	20,58	51,45

Испытание на сжатие вдоль волокон образцов с 101 по 110

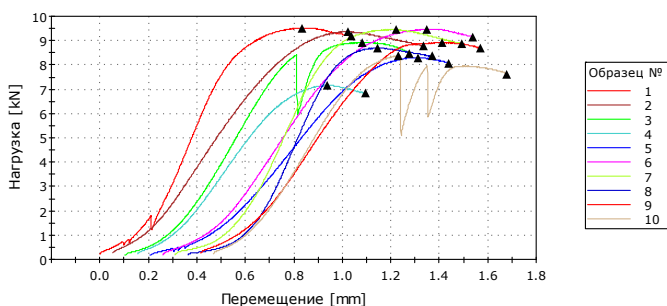


Рис. 3.10. Результаты испытаний на сжатие вдоль волокон: образцы с 101 по 110

Выводы:

1. Испытание по определению прочности при сжатии вдоль волокон было выполнено на 110 образцах в виде прямоугольной призмы с заданными размерами.

2. Максимальный предел прочности составляет 26,12 МПа; расчетное сопротивление на сжатие древесины вдоль волокон – 4,51 МПа. Среднее значение предела прочности – 20,58 МПа.

3.2.2. Определение предела прочности древесины при изгибе

Эксперимент был проведен совместно с аспиранткой СПбГАСУ Аюкопян А. Л. в декабре 2015 г. в лаборатории СПбГАСУ.

Были изготовлены опытные образцы прямоугольной формы, размеры образцов определялись с точностью до 0,1 мм. Количество образцов на испытание по определению сжатию вдоль волокон составляло 25 шт. Древесина образцов – лиственница даурская, температура в лаборатории $20 \pm 1^\circ\text{C}$, влажность образцов приведена в итоговой сводной таблице результатов испытания сжатию (табл. 3.2).

После обработки результатов, полученных в ходе испытаний, некоторые результаты имеют отклонение по сравнению со средней величиной показателя плотности. С целью уменьшения ошибок нормативной плотностью должно быть принято среднее значение.

Протокол определения влажности образцов, плотности и предела прочности древесины при изгибе приведен в табл. 3.2. Фотофиксация этапов проведения испытания приведена на рис. 3.11–3.14. Графики зависимости перемещений от приложенной нагрузки для образцов 1–25 представлены на рис. 3.15–3.17.



Рис. 3.11. Фотофиксация проведения испытаний на изгиб (фото установленного образца в машину для испытаний до начала проведения испытаний)

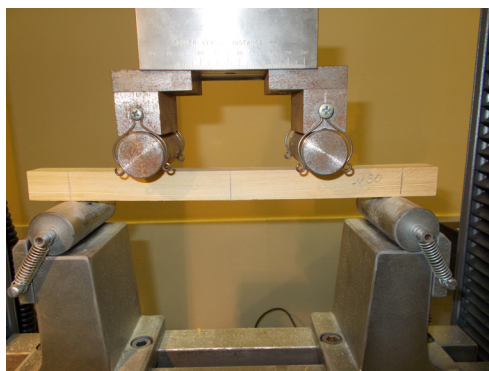


Рис. 3.12. Фотофиксация проведения испытаний на изгиб (фото установленного образца с отметками контроля до начала проведения испытаний)

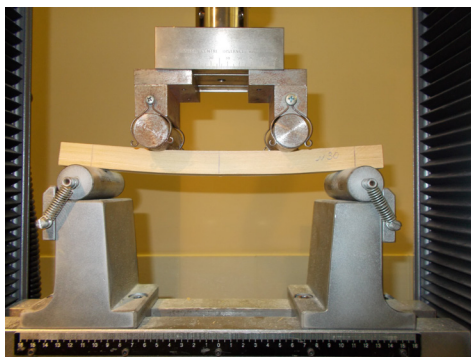


Рис. 3.13. Фотофиксация проведения испытаний на изгиб (фото прогиба образца при приложении неразрушающей нагрузки)

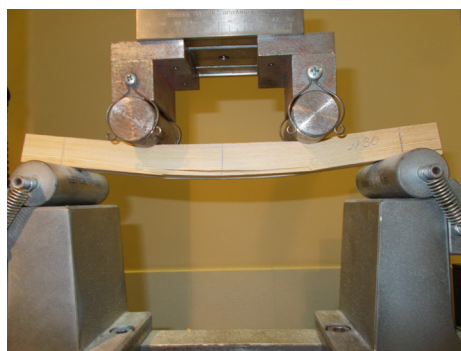
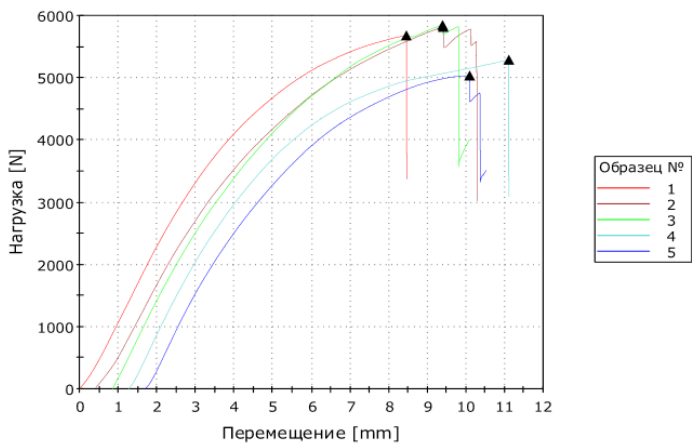


Рис. 3.14. Фотофиксация проведения испытаний на изгиб (фото разрушения образца при приложении разрушающей нагрузки)

Статистическая обработка результатов (предел прочности)
11,16 МПа – среднее квадратическое отклонение;
1,09 МПа – средняя ошибка выборочного среднего арифметического;
11 % – коэффициент вариации;
2 % – относительная точность определения выборочного среднего.

а)

Образцы с 1 по 5



б)

Образцы с 6 по 10

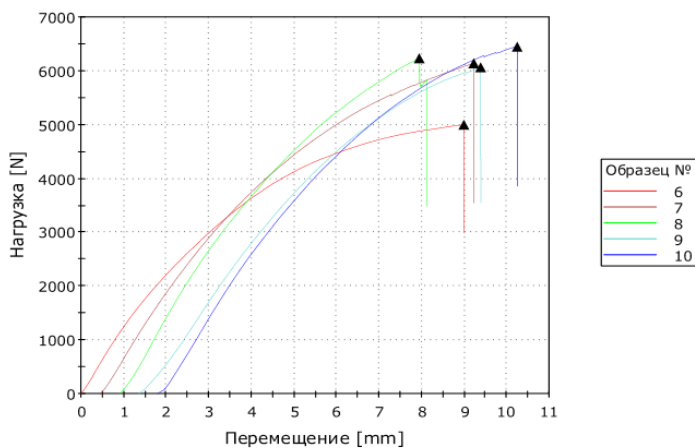
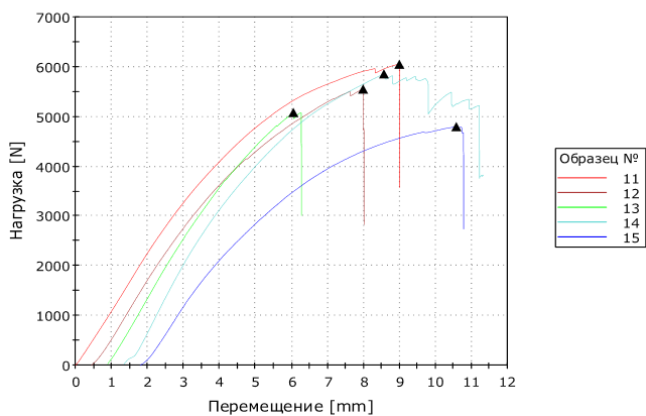


Рис. 3.15. Результаты испытаний на изгиб образцов:
а) с 1 по 5; б) с 6 по 10

а) Образцы с 11 по 15



б) Образцы с 16 по 20

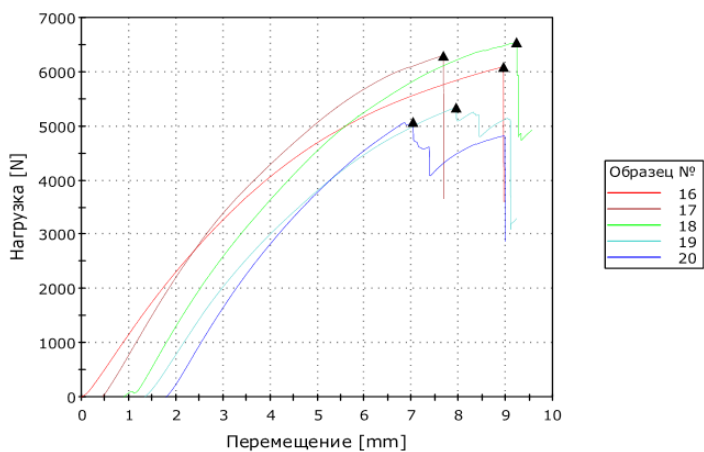


Рис. 3.16. Результаты испытаний на изгиб образцов:
а) с 11 по 15; б) с 16 по 20

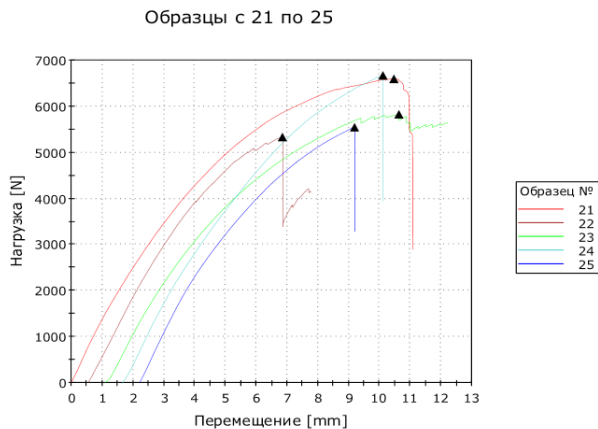


Рис. 3.17. Результаты испытаний на изгиб образцов с 21 по 25

Таблица 3.2

Протокол определения влажности образцов и предела прочности древесины при изгибе

Номер образца	Размеры поперечного сечения образца		Предельная нагрузка	Вес образца		Относит. влажность образца	Предел прочности при изгибе	Предел прочности при W=12%	Предел прочности при W=30%	
	b, мм	h, мм		F _i , кН	G, г					G _{сух.} , г
1	22,42	21,39	5,68	14,28	13,03	9,55	99,62	89,87	52,25	
2	22,04	21,96	5,81	14,56	13,29	9,57	98,46	88,89	51,68	
3	21,28	21,44	5,84	14,73	13,43	9,69	107,56	97,62	56,75	
4	22,12	22,12	5,29	14,88	13,57	9,64	87,96	79,64	46,30	
5	21,73	21,73	5,04	13,07	11,98	9,09	88,34	78,06	45,39	
6	21,93	21,99	5,00	13,31	12,09	10,09	84,87	78,39	45,58	
7	21,70	21,89	6,14	15,20	13,80	10,12	106,24	98,23	57,11	
8	21,36	22,02	6,23	14,54	13,26	9,64	108,30	98,07	57,02	
9	22,15	20,36	6,06	14,61	13,41	8,96	118,85	104,38	60,69	
10	21,71	21,72	6,45	15,40	14,07	9,45	113,32	101,77	59,17	
11	22,16	21,96	6,05	15,25	13,97	9,12	101,92	90,18	52,43	
12	22,31	21,82	5,55	13,93	12,75	9,29	94,04	83,83	48,74	
13	22,53	21,86	5,08	13,92	12,76	9,08	84,92	75,01	43,61	
14	22,10	21,87	5,86	14,43	13,24	9,00	99,72	87,74	51,01	
15	21,75	21,69	4,80	13,74	12,52	9,76	84,45	76,88	44,70	
16	21,86	21,71	6,09	15,12	13,74	10,03	106,40	98,00	56,98	
17	21,85	21,63	6,30	15,02	13,73	9,40	110,89	99,36	57,77	
18	20,43	22,39	6,54	13,84	12,69	9,06	115,01	101,47	58,99	
19	22,21	21,82	5,34	13,51	12,39	8,96	90,96	79,91	46,46	
20	20,49	22,26	5,78	13,19	12,10	8,99	90,03	79,19	46,04	
21	20,63	21,89	6,59	14,57	13,48	8,10	119,97	101,27	58,88	
22	22,04	21,82	5,33	14,33	13,15	8,93	91,44	80,22	46,64	
23	21,64	21,74	5,82	14,10	12,88	9,46	102,47	92,07	53,53	
24	21,44	21,71	6,67	14,81	13,49	9,77	118,74	108,14	62,87	
25	22,25	21,61	5,54	14,01	12,86	8,93	96,02	84,21	48,96	
Среднее			5,79				9,35	100,82	90,10	52,38

Определение предела прочности древесины при изгибе

Для относительной влажности образцов, при которой проводились испытания, максимальный предел прочности при изгибе составляет 119,97 МПа. При пересчете на влажность за пределом гигроскопичности древесины максимальный предел прочности составляет 52,38 МПа.

Выводы:

1. Испытание по определению прочности при сжатии вдоль волокон было выполнено на 25 образцах в виде прямоугольной призмы с заданными размерами.

2. Среднее значение предела прочности при изгибе составляет 100,82 МПа при опытной влажности образцов, для влажности за пределом гигроскопичности среднее значение предела прочности – 52,38 МПа (при пересчете прочности на другое значение влажности использовался коэффициент пересчета для лиственницы обыкновенной, так как коэффициент пересчета для лиственницы даурской в нормативной документации не был найден).

3.3. Сопоставление теоретических результатов расчета соотношения пределов прочности при изгибе и сжатии с полученными экспериментальными данными

По формуле (2.5) теоретическое соотношение предела прочности древесины при изгибе и предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон составляло:

$$n = \frac{\sigma_{и}}{\sigma_{сж}} = 2,2.$$

Для полученных экспериментальных данных это соотношение будет представлять собой:

$$n = \frac{\sigma_{и}}{\sigma_{сж}} = \frac{52,38}{20,58} = 2,5.$$

Полученные соотношения – и практическое, и теоретическое – являются величинами одного порядка; несущественная разница между ними объясняется погрешностью при

проведении экспериментов и обработке данных, в частности, использовании поправочного коэффициента при пересчете пределов прочности для влажности более 30% не для лиственницы даурской, а для лиственницы обыкновенной.

Выдвинутая гипотеза подтверждается.

Глава 4. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С СОЕДИНЕНИЯМИ НА КОГТЕВЫХ ШАЙБАХ

4.1. Общая характеристика и опыт применения когтевых шайб в деревянных конструкциях

Соединения на когтевых шайбах являются разновидностью шпуночных соединений. За свою историю эволюции шпонки претерпели изменения от призматических деревянных форм до сложных соединителей, выполняемых из специальных сплавов. Видоизменения соединителей шпуночного типа были направлены на предотвращения таких недостатков, как неравномерное распределение нагрузок при многорядовой расстановке, скальвающие напряжения. Поэтому следующие за предыдущими разновидностями шпуночных соединений наделялись качествами достаточной вязкости и податливости (чтобы предотвратить опасное скальвающее напряжение), равнопрочности, применения принципа дробности воспринимаемого усилия, увеличения поверхности скалывания, увеличения плотности и мощности соединения.

С 1941 г. в Советском Союзе появляются штампованные когтевые шайбы В. Г. Леннова (рис. 4.1) [21] достаточно технологичные и надежные для разборных соединений деревянных элементов конструкций при знакопеременных усилиях. Несущая способность данных соединений приблизительно одинакова в соединениях вдоль и поперек волокон. Вдавливание когтевых шайб в деревянный элемент производится ударным способом, что способствует плотному обжатию когтей волокнами древесины без образования надрывов волокон в гнезде. Возможна так же постановка шайб с использованием специального пресса или закручивания гаек болтового соединения.

На сегодняшний день шайба Леннова не выпускается, хотя обладает достаточными преимуществами при использовании в строительной практике:

- такие соединения являются сборно-разборными;
- шайбы могут запрессовываться по отдельности (в отличие от зубчато-кольцевых или двусторонних шайб «Бульдог»);
- в готовом узле есть возможность контролировать качество запрессовки и правильность постановки;
- конструкции с использованием шайб Леннова имеют высокую ремонтпригодность.

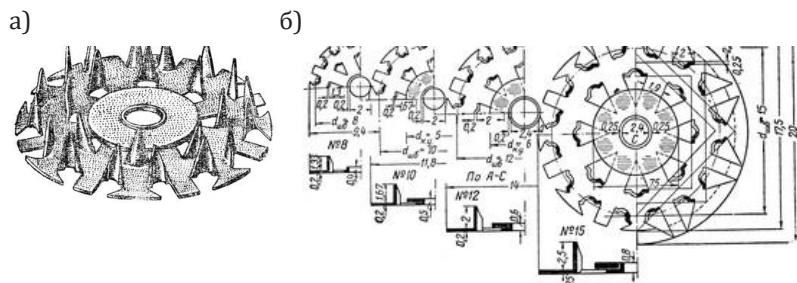


Рис. 4.1. Шайба Леннова:
а – внешний вид; б – сортамент шайб Леннова

В 1889 г. в Америке инженером Теодорсеном была запатентована шайба «Бульдог», но в связи с обилием поставок древесины в то время она не была широко принята до первой мировой войны. Однако уже с 20-х гг. XX в. находит широкое распространение в Германии и Швеции [22].

Когтевые шайбы типа «Бульдог» – двусторонний (односторонний) соединительный элемент, выполненный из круглой шайбы, края которой должны быть вырезаны и наклонены под углом 90° к шайбе, образуя треугольные зубцы выступая попеременно с разных сторон шайбы для двусторонних шайб или с одной для односторонних. Каждая шайба имеет два отверстия под гвоздь, для закрепления в проектом положении [23].

Существует широкий сортамент форм и размеров шайб «Бульдог», который отражен в EN 912 [24].

Двусторонний «Бульдог» работает аналогично зубчато-кольцевой шпонке (рис. 4.2). В соединении с древесиной каждый зубец работает самостоятельно, как консоль, защемленная в жесткой пластинке. В односторонних «Бульдогах» усилие передается от болта к шайбе и через когти шайбы передается на древесину. С помощью когтей усилие распространяется на большую поверхность смятия древесины. Это увеличивает несущую способность и дает необходимую пластичность болтового соединения и повышает его надежность.

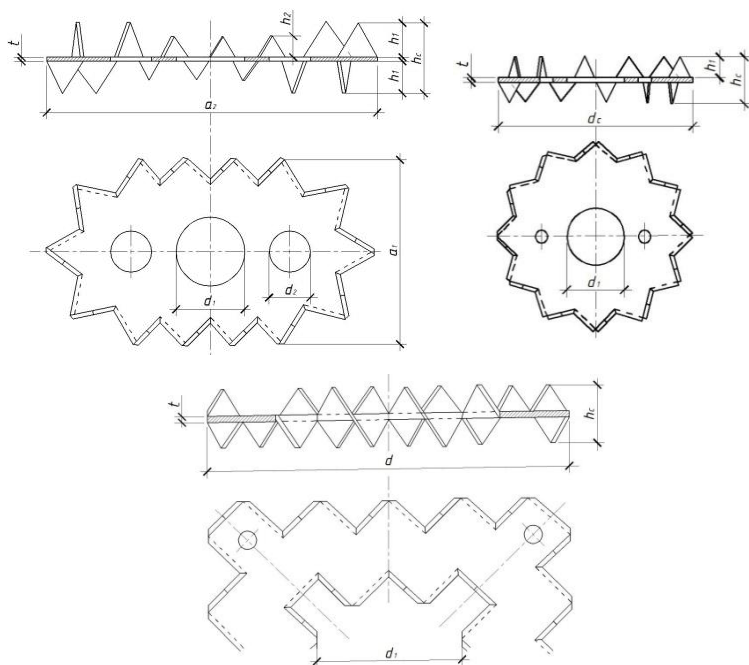


Рис. 4.2. Когтевые шайбы: различные типы шайбы «Бульдог»

Сборка конструкций с таким соединителем производится аналогично сборке на зубчато-кольцевых шпонках. Для мягких пород древесины вдавливание шайб осуществляется

затяжкой болтов с широкими шайбами. Для более плотных пород (более 500 кг/м^3) используется специальный пресс. Возможна установка шайб и с помощью ударного метода или метода выжигания [25].

Когтевая шайба «Бульдог» на сегодняшний день выпускается такими крупными компаниями как *Rothoblaas* (Испания), *Simpson* (США), *TECO* (Англия), *BPC Fixings* (Англия), *Exramet* (Англия) [26] и др. На производство этих шайб существует европейский стандарт *EN 912*, который нормирует производство данных соединителей из холоднокатанных покрытых (непокрытых) низкоуглеродистых узких стальных полос методами холодной штамповки. Материал должен соответствовать типам сталей *DC01+C390* ($R_y = 310 \text{ Н/мм}^2$, $R_y = 510 \text{ Н/мм}^2$) согласно *EN 10139*, или холоднокатанной высокопрочной стали для холодной штамповки *H320M* ($R_y = 360 \text{ Н/мм}^2$, $R_y = 500 \text{ Н/мм}^2$) в соответствии с *EN 10268*. Оба материала эквивалентны по характеристикам стали *C390* ($R_y = 380 \text{ Н/мм}^2$, $R_y = 525 \text{ Н/мм}^2$) по ГОСТ 27772.

В России когтевые шайбы «Бульдог» не выпускаются, производятся поставки из Европы и США.

Положительные качества когтевых шайб отражаются в увеличении несущей способности нагельного соединения в 1,8–2,5 раза. Испытаниями было выявлено, что несущая способность когтевой шайбы примерно одинакова в соединениях вдоль и поперек волокон сосновой древесины вследствие «дробности» приложения сминающих усилий [27]. Узлы, выполняемые с использованием когтевых шайб, имеют высокую плотность соединения. Использование шайб также предотвращает разрушение узлов конструкции от опасных хрупких разрушений.

А также необходимы особенные требования к технологии запрессовки шайб для предотвращения изгиба зубьев в направлении наименьшей их жесткости.

Существует ряд недостатков соединений с когтевой шайбой «Бульдог»:

- незначительные размеры зубьев при усушке древесины приводят к выходу их из гнезд;

- зубья, вдавленные в древесину, перерезают волокна и вызывают ослабление древесины;
- существуют когтевые шайбы более высокой несущей способности (такие как шайба Леннова, шайба КСВЗШ, предложенная Лабудиным Б. В. [29] и другие соединители).

В мировой практике использование когтевых шайб «Бульдог» встречается в конструкции церкви в деревне в Германии (архитектор Й. Видейман, инженер Х. Шлегель) [30], детского сада в Эрдведе в Германии [31], спортивного зала в Вайнфельде в Германии [32] и других зданиях.

В России когтевые шайбы «Бульдог» использовались при строительстве спортивного комплекса «Фламинго» в г. Курган (рис. 4.3). Шайбы устанавливались при сплочении колонн и балок из *LVL*. Для запрессовки использовалась специальная установка для одновременной запрессовки шести когтевых шайб «Бульдог».



Рис. 4.3. Конструкция части здания спортивного комплекса «Фламинго» в г. Курган

Примером строительства с использованием когтевых шайб в конструкциях из клееной древесины является здание гольф-клуба, расположенного в пос. Гостилицы Ленинградской области (рис. 4.4). Когтевые шайбы использовались для увеличения жесткости соединений элементов фахверка ввиду малого количества вертикальных связей.



Рис. 4.4. Гольф-клуб в пос. Гостилицы, Ленинградская область

Конструкций, в которых применяются и могут применяться когтевые шайбы, великое множество. Примеры конструкций с использованием когтевых шайб представлены на рис. 4.5.

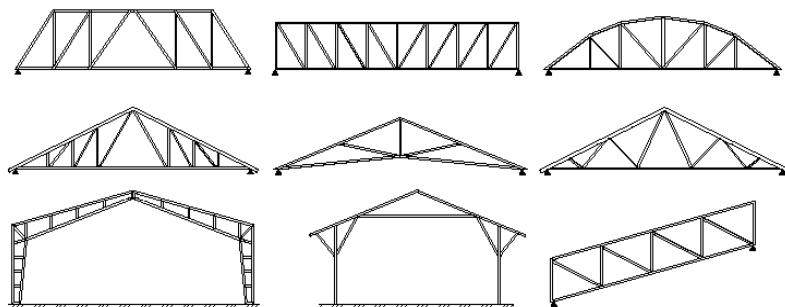


Рис. 4.5. Типы конструкций с использованием когтевых шайб

Помимо совершенствования соединителей деревянных конструкций, современные разработки в области деревянного строительства двигаются в направлении поиска новых материалов на основе древесины. За последнее время появились новые материалы, такие, как: *OSB, LVL, LSL, PSL, Glulam, CLT* и др., которые могут быть использованы в строительстве как в качестве ответственных несущих конструкций, так и в нуждах отделки, производства мебели и других работ.

Брус *LVL* – это материал, получаемый путем прессования листов хвойного шпона с предварительным нанесением на них формальдегидного клея с параллельным расположением волокон (в некоторых случаях несколько слоев склеивают перпендикулярно волокнам). Технология производства может быть сравнима с технологией производства фанеры. Этот материал был разработан в 1935 г. Лабораторией Федерального Лесничества (США) [33]; массовое производство было осуществлено компанией *Trustjoist* (США) (на сегодняшний день являющейся подразделением крупнейшей деревообрабатывающей компании *Weyerhaeuser* (США)) в 1960-е гг. с целью получения бруса, значительно превышающего габариты существующего сортамента древесины высокой прочности. С каждым годом потребление *LVL* по всему миру увеличивается. *LVL* используется не только в области строительства, но и в производстве мебели, опалубки, лестниц, дверных оконных и дверных блоков [34].

На сегодняшний день в России существует 2 завода по производству *LVL*: «ЛВЛ-ЮГРА», г. Нягань (объем производства до 90 тыс. м³/год по данным на 2017 г.), «Талеон Терра», г. Торжок (объем производства 150 тыс. м³/год по данным на 2017 г.), который выпускает *LVL* с маркой *Ultralam* [152].

4.2. Существующие теоретические основы расчета нагельных соединений с использованием когтевых шайб в деревянных конструкциях

Соединения на когтевых шайбах в конструкциях из *LVL* рассчитываются по методу предельных состояний. Для

расчета, согласно данной теории, необходимо выполнить расчет по прочности (по несущей способности) – первое предельное состояние и расчет по деформациям – второе предельное состояние. Когда соединение теряет способность к сопротивлению внешним нагрузкам, наступает *первое предельное состояние*, при котором считается, что несущая способность исчерпывается полностью. В случае, когда деформации сдвига элементов достигают предельных значений, регламентируемых нормами, считается, что наступает *второе предельное состояние*. Для нагельных соединений всех типов согласно СП 64.13330–2011 [71] при полном использовании несущей способности величина сдвига не должна превышать 2 мм. При передаваемой соединению нагрузке ниже длительной несущей способности *LVL* деформации обычно уменьшаются с течением времени. При значении нагрузок выше длительной несущей способности *LVL* деформации имеют свойство увеличиваться до полного разрушения [35]. Соединение разрушается при исчерпании несущей способности по смятию при достижении предельных значений, равных $R_{см}^{вр}$ или $R_{см}^{дл}$. Исчерпание несущей способности по изгибу металлического соединителя принимается при возникновении по его длине пластического шарнира.

Расчет соединений когтевых шайб по несущей способности описан в европейских нормах *EuroCode 5* [59]. Х. Д. Бласом, Д. Эхлбэком и М. Шаглером в работе [57] было предложено использование выражения для определения несущей способности соединения на когтевых шайбах, что позже было использовано в качестве основы расчета в *EuroCode 5*. Данная математическая модель была основана на предположении о распределении нагрузки на соединение между нагелем и когтями шайбы и была дополнена рядом работ [61]. Таким образом, прочность соединения может быть описана выражением:

$$R_{j,k} = R_{c,k} + n \cdot R_{b,k} \quad (4.1)$$

где $R_{j,k}$ – нормативное значение несущей способности соединения с когтевой шайбой и болтом, Н; $R_{c,k}$ – нормативное

значение несущей способности когтевой шайбы, Н; $R_{b,k}$ – нормативное значение несущей способности болта, принимаемое по существующим нормам, Н; n – коэффициент, учитывающий влияние распределения нагрузки между когтевыми шайбами и болтами, принимаемый от 0 до 1.

Допустимая нагрузка, которую сможет нести когтевая шайба, может быть определена как:

$$R_{c,k} = Ad_{к.ш}^{1.5}, \quad (4.2)$$

где A – величина зависящая от типа когтевой шайбы и параметров соединения; $d_{к.ш}$ – диаметр когтевой шайбы.

Для двусторонних шайб типа С1, С3, С5, С6, С8 [4] значения величины A можно определить как

$$A = 25k_1k_2k_3d^{1.5}. \quad (4.3)$$

Для односторонних шайб С2, С4, С7, С9 значение величины A определяется как:

$$A = 18k_1k_2k_3d^{1.5}, \quad (4.4)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий влияние толщины соединяемых элементов; k_2 – коэффициент, учитывающий влияние расстановки соединителей относительно края соединения; k_3 – коэффициент, учитывающий влияние изменения плотности материала древесины соединения.

Коэффициент k_1 можно определить из выражения:

$$k = \min \left\{ \frac{1}{t}, \frac{2}{5h_e} \right\}, \quad (4.5)$$

где величины t_1 , t_2 – толщины крайних и средних сплавляемых элементов соответственно, причем: $t_1 \geq 2,25 h_e$, $t_2 \geq 3,75 h_e$, мм; h_e – величина проникновения когтей шайбы в толщу соединяемых элементов, мм.

Формула (4.5) отражает зависимость используемых толщин соединяемых элементов на несущую способность. При использовании толщин $t_1 > 3h_e$, $t_2 > 5h_e$ изменения несущей

способности происходить не будет. При использовании минимальных допустимых толщин элементов несущая способность когтевой шайбы снизится до $0,75R_{c,k}$

Коэффициент k_2 для когтевых шайб типа С1–С9 [24] можно определить из выражения:

$$k_2 = \min \left\{ \frac{a_{3,t}}{1,5d_{к.ш.}}, 1 \right. \quad (4.6)$$

здесь $a_{3,t}$ – расстояние от центра стяжного болта до края элемента вдоль волокон; величину s принимают как максимальное значение величин 80, $7d_b$, $1,1d_c$, мм; $d_{к.ш.}$ – диаметр когтевой шайбы, мм; d_b – диаметр болта, мм.

Коэффициент k_3 равен

$$k_3 = \min \left\{ \frac{\rho_k}{350}, 1,5 \right. \quad (4.7)$$

здесь ρ_k – нормативное значение плотности древесины в соединении, кг/м³.

Выражение (4.6) отражает зависимость несущей способности соединения с когтевыми шайбами от плотности элементов конструкции. Коэффициент k_3 учитывает изменение плотности от 350 кг/м³ до 525 кг/м³. Это ограничение вызвано значительным исчерпанием несущей способности когтей шайбы при значениях плотности выше указанных. При использовании материалов плотностью выше 525 кг/м³ значительного увеличения несущей способности соединения не происходит.

Чтобы определить величину несущей способности болта $R_{b,k}$ рассмотрим симметричное соединение, в котором элементы из LVL сопрягаются под различными углами приложения нагрузки по отношению к волокнам и соединены стальным болтом, поставленным перпендикулярно соединяемым элементам; нагрузка приложена к среднему элементу и передается на боковые элементы. Расстановка соединителей выполнена таким образом, что не происходит скалывающего разрушения соединения. Величина несущей способности болта $R_{b,k}$ по [71] определится из условий разрушения по причине:

- смятия в крайних элементах;
- смятия в среднем элементе;
- изгиба нагеля.

Расчет по каждому из условий выполняется по следующим формулам:

$$T = \min \begin{cases} 0,5cd_n k_\alpha; \\ 0,8ad_n k_\alpha; \\ (1,8d_n^2 + 0,02a^2)\sqrt{k_\alpha} \leq 2,5d^2, \end{cases} \quad (4.8)$$

где T – несущая способность одного нагеля одного среза в соединении, кН;

c – толщина среднего элемента, см;

a – толщина крайнего элемента, см;

d_n – диаметр нагеля, см;

k_α – коэффициент, учитывающий угол приложения нагрузки.

Расчетная несущая способность цилиндрических нагелей определяется по [51] с умножением на коэффициенты условий эксплуатации m_b и m_t , учета величин напряжения более 80% m_d , учета кратковременных нагрузок (монтажной, ветровой, гололедной) m_n , учета использования глубокого антипирирования m_a и делением на коэффициент $\gamma_{нн(сс)}$:

$$R_{b,k} = \frac{m_b m_t m_d m_n m_a \min(T) n_{ш} n_n}{\gamma_{нн(сс)}}, \quad (4.9)$$

где $n_{ш}$ – число расчетных швов одного нагеля; n_n – число нагелей в соединении.

Требуемая надежность из условия скалывания обеспечивается соблюдением шага расстановки нагелей согласно [71]. За расчетную несущую способность нагеля на один шов (срез) принимается наименьшее из полученных значений. Рекомендуется подбирать диаметр нагеля таким образом, чтобы несущая способность соединения определялась равнопрочной работой нагельного соединения по смятию и по изгибу или только по изгибу нагеля.

При расчете несущей способности нагельного соединения по *EuroCode 5* [59] задаются четырьмя условиями разрушения симметричного двухсрезного соединения элементов из *LVL*:

- смятие в крайних элементах;
- смятие в среднем элементе;
- изгиб нагеля;
- изгиб нагеля с растяжением при значительном его защемлении в крайних элементах.

Выполняется расчет несущей способности по каждому из условий согласно [59]:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}; \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (4.10)$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}},$$

где $F_{v,Rk}$ – нормативная несущая способность одного нагеля одной плоскости среза в соединении, кН;

t_i – толщина элемента, см;

$f_{h,i,k}$ – нормативное сопротивление смятию *LVL*, МПа;

d – диаметр нагеля, см;

$M_{y,Rk}$ – нормативный момент пластической деформации нагеля, МПа;

β – масштабный коэффициент для нормативного сопротивления смятию *LVL*; $F_{ax,Rk}$ – нормативное сопротивление нагеля выдергиванию, кН.

При этом считается, что стальной цилиндрический нагель с контролируемым усилием затяжки гаек работает как болт на изгиб без учета эффекта нити, т. е. его нормативное сопротивление выдергиванию $F_{ax,Rk} = 0$, а $M_{y,Rk}$ и $f_{h,i,k}$ рассчитываются в соответствии с [59]. Для различных схем соединений задаются углы приложения нагрузки к волокнам крайних и среднего элементов отдельно.

Из полученных значений несущей способности выбирается наименьшее. Оно представляет собой нормативную несущую способность одного нагеля в одной плоскости среза $F_{v,Rk}$. Для получения расчетной несущей способности соединения необходимо умножить это значение на количество нагелей и число срезов одного нагеля, коэффициент модификации $k_{mod} = 0,65$ и разделить на частный коэффициент свойств материала (LVL) $\gamma_m = 1,2$ по [59].

$$R_{b,k} = \frac{\min(F_{Rk}) n n_s k_{mod}}{\gamma_m}, \quad (4.11)$$

где $R_{b,k}$ – расчетная несущая способность соединения, кН;
 $\min(F_{Rk})$ – минимальная нормативная несущая способность одного нагеля одной плоскости среза в соединении по четырем условиям, кН;

n – количество нагелей в соединении;

n_s – число срезов нагеля;

k_{mod} – коэффициент модификации;

γ_m – частный коэффициент свойств материала.

4.3. Существующие экспериментально-теоретические методы исследования нагельных соединений с использованием когтевых шайб и определение научно-исследовательских и инженерно-прикладных задач

Соединение на когтевых шайбах является совмещением использования разновидностей соединений – нагельного и шпоночного. Среди исследований, посвященных вопросам нагельным соединениям деревянных конструкций, отмечаются работы Дмитриева П. А., Никитина Г. Г., Шاپоникова В. Н., Кононова В. А., Михайлова Б. К., Шешуковой Н. В., Пуртова В. В., Павлика А. В., Базенкова Т. Н., Гаппоева М. М., Исупова С. А., Бутова Е. В. и др.

В работах Дмитриева П. А. [35, 36, 37, 38, 39] подробно можно проследить теорию расчета соединений на цилиндрических нагелях. В основе расчетов положена теория сопротивления нагельного соединения за счет способности древесины сопротивляться смятию при достижении

предельных значений. Полагается, что несущая способность смятия нагельного гнезда исчерпывается в тот момент, когда достигаются временные напряжения смятия R_{CM}^{BP} или длительные R_{CM}^{DL} , при этом напряжения на каждом участке смятия одинаковы, а ось нагеля до образования пластического шарнира принимается прямолинейной.

По вопросам длительной прочности и деформативности деревянных конструкций на нагельных соединениях известны работы Михайлова Б. К., Шешуковой Н. В. [50, 51, 52]. Авторами предложена методика расчета нагельных соединений, основанная на расчете нагеля как балки, лежащей на неупруго-вязком основании. Основные параметры напряженно-деформированного состояния древесины с учетом влияния влажности и угла наклона волокон определяются из условия прочности по деформациям. Описание вязко-упругих свойств материалов, где нелинейность факторов учитывается за счет формы деформирования нагеля предложено Работновым Ю. Н. [43]:

$$cy(x, t) = p(x, t) + \int_0^t p(x, \tau) K(t, \tau) d\tau, \quad (4.12)$$

где C – коэффициент постели от действия цилиндрического штампа;

$p(x, t)$ – реакция гнезда нагеля;

$K(x, t)$ – наследственное ядро уравнения.

При этом изогнутая ось нагеля описывается уравнением:

$$EIy^{IV}(x, t) + Cy(x, t) + \int_0^t p(x, \tau) K(t, \tau) d\tau = q(x, t), \quad (4.13)$$

где $q(x, t)$ – внешняя нагрузка.

Для решения данного уравнения принимается разложение функции $y(x, t)$ в ряд:

$$y(x, t) = \sum C_{ij} z_{ij}, \quad (4.14)$$

где z_{ij} представляет собой балочную функцию.

При этом балочная функция принимается как:

$$z_{1j} = \sin \xi x + \operatorname{sh} \xi x - \lambda (\cos \xi x + \operatorname{ch} \xi x), \quad (4.15)$$

где ξ и λ принимаются из граничных условий.

Используя метод Бубнова–Галеркина, можно получить

$$C_{1j}EIz_{1j}^{IV}(x, t) + C_{1j}Cy(x, t) + C_{1j} \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau = q(x, t). \quad (4.16)$$

При интегрировании на участке длины нагеля в каждом деревянном элементе и умножении уравнения (4.16) на величину $z_{1j}(x, t)$ получается выражение для крайних элементов:

$$C_{11} \int_0^{l_1} \left[EIz_{11}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{11}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau \right] z_{11}(x, t) dx = \quad (4.17) \\ = \int_0^{l_1} q(x, t) z_{11}(x, t) dx.$$

Для среднего элемента получится выражение:

$$C_{12} \int_{l_1}^{l_2} \left[EIz_{12}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{12}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau \right] z_{12}(x, t) dx = \quad (4.18) \\ = \int_{l_1}^{l_2} q(x, t) z_{12}(x, t) dx.$$

Ядро уравнения $K(t, \tau)$ принимается в результате аппроксимации кривых ползучести древесины и принимается в виде:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}, \quad (4.19)$$

где A, α, δ – постоянные уравнения;

t – время нагружения.

Предложенная методика хорошо подходит для расчетов нагельных соединений, учитывающих вязко-упругие свойства древесины и пластичность металла нагеля, что подтверждается сходимостью результатов испытаний и теоретических исследований.

В Советском Союзе разработкой соединений на когтевых шайбах занимался Леннов В. Г. [21]. В ходе работы над корректировкой недостатков существующих соединителей с учетом требований, предъявляемых к конструкциям, были получены более совершенные типы когтевых шайб, расчет которых подразумевал уравнение, полученное по результатам аппроксимации кривых взаимодействия диаметра шайбы и несущей способности без учета плотности,

влажности древесины и возможных модификаций формы шайбы.

Работа когтевых шайб схожа по своему характеру с работой металлических зубчатых пластин (МЗП). Вопросами разработки зубчатых пластин занимался Дурновский А. М. [64]. Автором разработана методика расчета элементов МЗП, позволяющая определять их рациональные геометрические параметры (форму, длину, ширину, шаг, толщину зубьев) с учетом жесткого закрепления зубьев на пластине и возможного зазора между пластиной и соединяемой деталью.

По вопросам длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на МЗП известны работы Цепалева В. А., Ермолаева В. В. [65, 66]. Цепалевым В. А. предложена методика расчета соединений на МЗП, позволяющая рассчитывать соединения с учетом фактора времени при любых прочностных характеристиках древесины и материала пластины. Для описания процесса деформирования древесины гнезда зуба под действием распределенной нагрузки $q(x, t)$ Цепалевым В. А. использовался закон деформирования упруго-вязких материалов в виде [66]:

$$y(x, t) = \frac{q(x, t)}{c_n} + \int_0^t k_0(t, \tau) \cdot q(x, \tau) d\tau, \quad (4.20)$$

где c_n – коэффициент постели;

$k_0(t, \tau)$ – функция наследственности.

Считая справедливой гипотезу плоских сечений и приняв материал пластины упругим, рассматривалось уравнение изогнутой оси зуба:

$$\begin{aligned} EI \left[\frac{1}{c_n} \cdot \frac{\partial^3 q(x, t)}{\partial x^3} + \int_0^t k_0(t, \tau) \cdot \frac{\partial^3 q(x, t)}{\partial x^3} d\tau \right] = \\ = -T + \int_0^x q(\xi, t) d\xi, \end{aligned} \quad (4.21)$$

где T – нагрузка на зуб пластины.

Уравнение (4.12) решалось разложением функции $q(x, t)$ в ряд.

В свою очередь Крицин А. В. в своей работе [67] использовал линейный закон деформирования упруго-вязких материалов, который был представлен в следующем виде:

$$c_n y(x, t) + EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + EI \int_{t_0}^t \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} k_0(t, \tau) d\tau = 0. \quad (4.22)$$

Уравнение (4.13) решалось методом аппроксимации с помощью кусочно-линейных функций, что приводит интегродифференциальное уравнение (4.22) к системе линейных уравнений относительно неизвестных значений функции в определенных точках в заданное время.

Исследования Крицина А. В., Лоскутовой Д. В. [68–70] показали, что справедливость предложенной методики подтверждается экспериментальными исследованиями и может являться предпосылкой к расчету деревянных конструкций по II-й группе предельных состояний с соединениями на МЗП. Приняв в своей основе необходимые изменения, учитывающие отличие форм когтей и расположение зубьев для МЗП и когтевых шайб, возможно использование методик для расчета соединений с когтевыми шайбами по II группе предельных состояний.

Работы по определению прочности и жесткости древесины разных пород на местное смятие цилиндрическими штампами были проведены отечественными учеными Коченовым В. М., Панферовым К. В., Наумовым А. К., Дмитриевым П. А., Стрижаковым Ю. Д., Шешуковой Н. В. и др. [76–81]. Авторами получены зависимости коэффициента постели от влажности древесины при разных диаметрах штампов. Результаты исследований коэффициентов постели для древесины при действии нагрузки вдоль волокон приведены в табл. 4.1. Полученные данные могут использоваться для сравнения с результатами испытаний при использовании материалов основания на основе древесины.

Если привести полученные значения коэффициентов постели к влажности древесины $W = 12\%$ по формуле (4.32), можно проследить, что полученные авторами значения имеют большие расхождения (рис. 4.6). Данное

обстоятельство требует проведения уточняющих испытаний для определения коэффициента постели для LVL при различных диаметрах цилиндрического штампа.

Таблица 4.1

Значения коэффициентов постели для древесины

Автор	Диаметр штампа d , мм	Влажность, W %	Коэффициент постели C , Н/мм ³
Вдоль волокон			
ЦНИИПС	6,25	13	34
Сипаренко В. Г.	12	15	75
ЦНИИСК	12,5	10	22,25
Стрижаков Ю. Д.	14	15	61
Шешукова Н. В.	16	8	94,23
Шешукова Н. В.	16	12	64,65
Шешукова Н. В.	16	30	25,40
Стрижакова Ю. Д.	18	15	79
Дмитриев П. А.	19	11	31,97
Поперек волокон			
Шешукова Н. В.	16	8	17,62
Шешукова Н. В.	16	12	11
Шешукова Н. В.	16	30	7,7

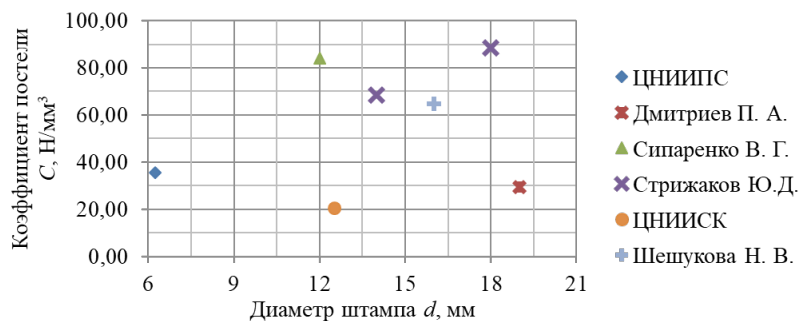


Рис. 4.6. Значения коэффициентов постели вдоль волокон, приведенные к влажности $W = 12$ %

Перечисленные выше работы были выполнены для уточнения методик расчета нагельных соединений и соединений на МЗП. Так, например, Наумов А. К. использует в своих работах по изучению соединений на МЗП зависимости сопротивления древесины смятию под зубом при смятии вдоль волокон:

$$R_{\text{см},0}^{\text{вп}} = 0,7R_{\text{сж}}^{\text{вп}}; \quad R_{\text{см},0}^{\text{длит.}} = 11 \text{ МПа}, \quad (4.23-4.24)$$

где $R_{\text{сж}}$ – прочность древесины сжатию вдоль волокон.

При смятии поперек волокон в зависимости от ширины штампа сопротивление смятию древесины $R_{\text{см}}$ представлено в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Зависимость сопротивления древесины смятию поперек волокон от ширины штампа

	Ширина штампа $b_{\text{см}}$			
	1	2	3	4
$R_{\text{см}}$	8	7	6	5

Определением сопротивления смятия в древесине от передачи нагрузки прямоугольным штампом известны работы Цапаева В. А., Авдеева А. В., Крицина А. В. и др. [82, 92, 67]. Авторами были испытаны сосновые образцы на смятие прямоугольными штампами шириной от 1 до 4 мм и были получены зависимости между пределом прочности древесины при смятии штампом (рис. 4.7), пределом прочности древесины и шириной прямоугольного штампа, а также был определен коэффициент постели в зависимости от ширины штампа. Данные зависимости выражаются следующими выражениями:

при смятии вдоль волокон:

$$R_{\text{см},0}^{\text{вп}} = (0,022b_{\text{см}} + 0,761)R_{\text{сж}}^{\text{вп}}; \quad (4.25)$$

$$C_0^{\text{вп}} = (-0,140b_{\text{см}} + 2,289)R_{\text{сж}}^{\text{вп}}; \quad (4.26)$$

при смятии поперек волокон:

$$R_{\text{см},90}^{\text{вп}} = (-0,072b_{\text{см}} + 0,718)R_{\text{сж}}^{\text{вп}}; \quad (4.27)$$

$$C_{90}^{BP} = (0,094b_{CM} + 0,826)R_{СЖ}^{BP}. \quad (4.28)$$

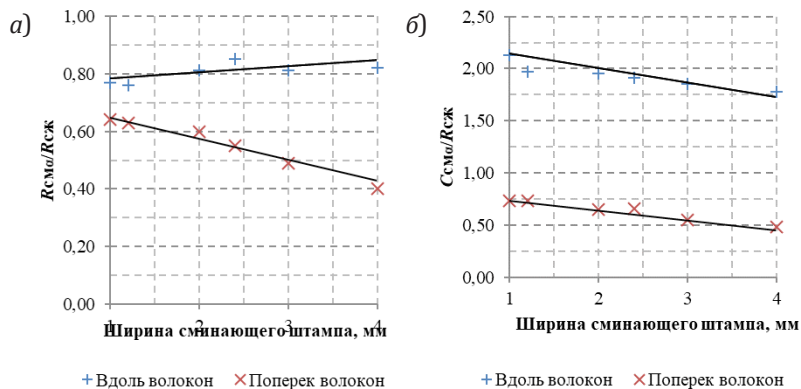


Рис. 4.7. Экспериментальные зависимости: а – между отношением предела прочности древесины при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданной ширине штампа; б – между отношением коэффициента постели древесины при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданной ширине штампа [47]

Крицин А. В., анализируя данные выражения (4.25–4.28), уточняет, что предел прочности древесины при смятии вдоль волокон почти не зависит от ширины штампа в рассматриваемых пределах b_{CM} , в отличие от прочности при смятии поперек волокон.

Влияние изменения угла смятия α по отношению к волокнам на коэффициент постели и прочность предложено учитывать Ашкенази Е. К. [93] следующими выражениями:

$$R_{CM,\alpha}^{BP(дл)} = \frac{R_{CM,0}^{BP(дл)}}{1 + \left(\frac{R_{CM,0}^{BP(дл)}}{R_{CM,90}^{BP(дл)}} - 1 \right) \sin^n \alpha}; \quad (4.29)$$

$$C_{CM,\alpha}^{BP(дл)} = \frac{C_{CM,0}^{BP(дл)}}{1 + \left(\frac{C_{CM,0}^{BP(дл)}}{C_{CM,90}^{BP(дл)}} - 1 \right) \sin^n \alpha}. \quad (4.30)$$

Крицин А. В. в своей работе [47] отмечает, что показатель степени $n = 2$ для формул (4.29–4.30) отражает указанные зависимости для прямоугольных штампов достаточно точно, что подтверждается экспериментально как для напряжений на пределе пропорциональности, так и для напряжений разрушения.

Прочности древесины σ_{12} и коэффициент постели C_{12} при влажности $w = 12\%$ для штампов принимаются по следующим выражениям:

$$\sigma_{12} = \sigma_w [1 + \alpha(w - 12)]; \quad (4.31)$$

$$C_{12} = C_w [1 + \alpha(w - 12)], \quad (4.32)$$

где σ_w – предел прочности при соответствующей влажности w ;

α – поправочный коэффициент, принимаемый 0,04 для древесины вдоль волокон и 0,035 для древесины поперек волокон;

C_w – коэффициент постели при соответствующей влажности w .

В работе Леннова В. Г. [21] коэффициент постели для предложенной автором формы когтевой шайбы принят равным 3000 кг/см³. В своей работе Леннов определяет напряжения смятия древесины под когтем, принимая усредненную ширину когтя, представив его форму в виде прямоугольника. Леннов В. Г. не рассматривает влияние фактора форм когтей на коэффициент постели.

Таким образом, авторами даются эмпирические формулы для определения сопротивления смятию под зубом пластины МЗП или нагелем преимущественно для древесины сосны. Поскольку соединения с когтевыми шайбами используются в совокупности с металлическими нагелями, важно использовать для расчета уточненные коэффициенты постели и сопротивления древесины смятию при различных направлениях действия нагрузок к волокнам, используя цилиндрический и треугольный штамп.

Поскольку под воздействием длительной нагрузки в структуре древесины происходят изменения, ползучесть

древесины увеличивается за счет релаксационных свойств материала. Учет длительности нагружения является важным аспектом расчета деревянных конструкций. В отечественной школе проектирования и за рубежом имеется достаточно информации о работе древесины под воздействием длительного нагружения, однако информации о длительной прочности и жесткости *LVL* значительно меньше.

Известны работы, посвященные изучению прочностных свойств материала *LVL*, а также соединений на механических связях с учетом влияния температурно-влажностных воздействий в зависимости от уровня и времени действия нагрузки таких зарубежных ученых, как H. Z. Zhou, E. C. Zhu, S. W. Wang, Matthew Davies, Myriam Chaplain, Gérard Valentin, Alaa Chateaufneuf, Hugh Morris, Pierre Quenneville [98, 99, 100]. Авторами предлагаются графики зависимости деформации от времени и уровня воздействия на образцы, изготовленные из *LVL* производства компании *Kerto* (г. Лохья, Финляндия). Исследователи производили опыты путем сжатия и растяжения образцов по направлению вдоль волокон. Результаты испытаний приведены на рис. 4.8.

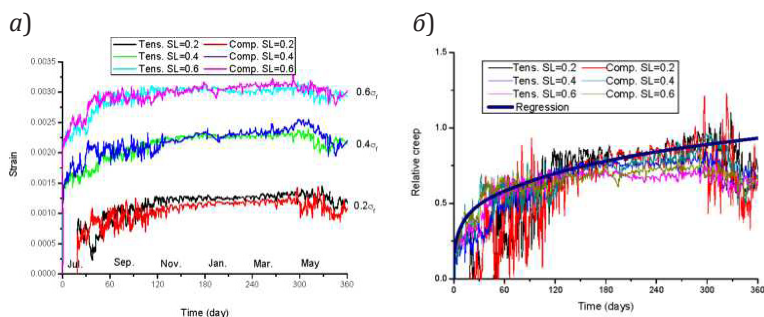


Рис. 4.8. Результаты длительных испытаний для *LVL*: а – зависимость деформаций от длительности, уровня нагружения, вида напряженного состояния (сжатие, растяжение); б – зависимость относительной ползучести от времени воздействия, уровня нагружения и вида напряженного состояния [98]

На рис. 4.8, б приведена зависимость относительной ползучести LVL при трех уровнях нагружения, где каждой ломаной линией представлены средние значения для 3-х одинаковых образцов. Деформации ползучести изменялись стремительно на начальном этапе до двух месяцев, затем постепенно переходили в стадию равномерного устойчивого роста. Авторами [78] отмечается, что значительной разницы между ползучестью при сжатии и растяжении нет. Представленную кривую регрессии на рис. 4.8, б можно описать с помощью уравнения

$$\varepsilon_{crr} = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{\vartheta}} = u \cdot \ln(t) + k, \quad (4.33)$$

где ε_{crr} – относительная деформация ползучести;

ε_{cr} – общая деформация ползучести без учета мгновенной упругой деформации (мм);

ε_{ϑ} – мгновенная упругая деформация (мм);

u – коэффициент, учитывающий влияние температурно-влажностного режима;

k – коэффициент, принимаемый из кривой деформирования LVL ;

t – время приложения нагрузки (в сутках).

Для уравнения (4.33) удовлетворительно согласуются результаты при использовании коэффициентов u и k равными: $u = 0,138$; $k = 0,086$.

В работе [78] приводится моделирование релаксационных свойств LVL , при этом зависимость между пределом длительного сопротивления $\sigma_{дл}$, пределом прочности при машинных испытаниях $\sigma_{вр}$ и времени и длительности действия нагрузки может быть выражена следующим выражением:

$$\sigma_{дл} = 0,59\sigma_{вр}t^{-0.055}. \quad (4.34)$$

Для расчетов соединений конструкций с использованием когтевых шайб по предлагаемой методике необходимо иметь значение длительной прочности материала конструкции. Для определения длительной прочности LVL с прогнозом на период t может использоваться формула:

$$R_{дл} = R_{вр} m_{дл} = 0,59 R_{вр} t^{-0.055}. \quad (4.35)$$

Цепаевым В. А., Крициным А. В., Ермолаевым В. В. для определения механических характеристик древесины при смятии прямоугольным штампом от действия длительных нагрузок с прогнозом на период τ_3 эквивалентного действия неизменной нагрузки для разных напряженных состояний использовалась формула

$$R_{дл} = R_{вр} \left(0,77 - \frac{\lg \tau_3}{22} \right). \quad (4.36)$$

В качестве сравнения результаты для прогнозирования длительной прочности материала конструкции по уравнениям (4.35) и (4.36) могут быть сопоставлены на графике (рис. 4.9). Для этого определяется эквивалентное время действия нагрузки $\tau_3 = 0,167t$, которое обосновано в рекомендациях по испытаниям и выражаются в сутках [102].

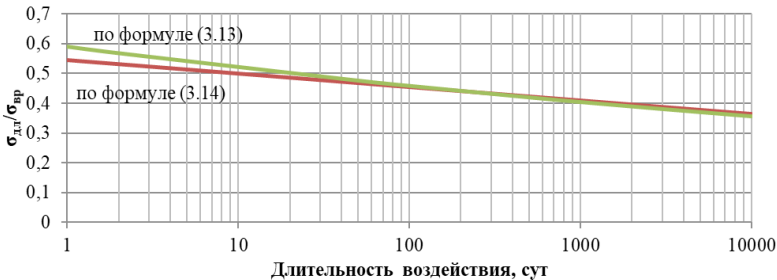


Рис. 4.9. Результаты вычислений по расчетным формулам (4.35) и (4.36)

По рис. 4.9 заметна аналогия распределения отношений между пределом длительного сопротивления $\sigma_{дл}$ и пределом прочности при машинных испытаниях $\sigma_{вр}$ во времени. Расхождение в показаниях составляет около 11 % в начальный период времени и практически отсутствует с 200-х суток.

Справедливость приведенных данных доказывается автором, что позволяет использовать полученный опыт для сравнения и оценки значений для треугольных штампов с материалом *LVL*.

Крициным А. В. [67] для решения основного уравнения теории наследственности опытным путем было определено значения ядра $K_0(t)$ для соответствующих моментов времени. При этом автор воспользовался уравнением для влажности образцов $W = 8,4 \%$:

$$K_0(t) = 0,018 \frac{e^{-1,078 \cdot 10^{-7} t}}{t^{1-0,0906}}; \quad (4.37)$$

для влажности образцов $W = 10,7 \%$:

$$K_0(t) = 0,018 \frac{e^{-1,078 \cdot 10^{-7} t}}{t^{1-0,1701}}. \quad (4.38)$$

Автором успешно используется данный метод определения ядра линейной наследственности, причем достоверность полученных значений была доказана, что позволяет применять данную методику в дальнейших расчетах настоящей работы.

Определением прочности древесины при сжатии цилиндрическими штампами различных размеров от воздействия длительных нагрузок занимались многие ученые. Так, например, Дмитриев П. А. [35], Стрижаков Ю. Д. [106] получили уравнения, учитывающее связь прочность древесины на смятие $R_{см}$ в отверстии с прочностью на сжатие $R_{сж}$ и диаметром d цилиндрического штампа. Шешуковой Н. В. [42] исследовалось влияние угла приложения нагрузки к волокнам и влияние влажности на исследуемые параметры ползучести древесины. Результаты исследований приведены на рис. 4.10.

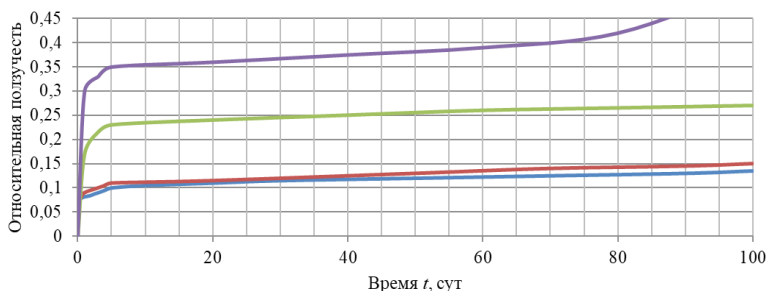


Рис. 4.10. Кривые ползучести древесины при смятии цилиндрическими штампами вдоль волокон при влажности $W = 12\%$

Приведенные на рис. 4.10 зависимости изменения ползучести для уровней нагружения во времени регистрируют затухающее распределение ползучести для уровня нагрузки до $0,7 P_{\max}$ включительно. При уровне нагрузки $0,8 P_{\max}$ возникают значительные деформации, которые начинают активно развиваться начиная с 70-х суток.

Изучение работы соединений деревянных конструкций на когтевых шайбах сопровождается большим объемом экспериментальных исследований. Основные зарубежные исследования несущей способности когтевых шайб типа «Бульдог» были проведены в Технологическом университете Дэлфта (Нидерланды), Научно-исследовательского строительного института в Штутгарте (Германия) [52–56]. Практические методики расчета соединений конструкций на когтевых шайбах формировались на основании результатов экспериментальных исследований. Одним из первых методику расчета соединений предложил Д. Х. Бласс [57, 58]. Работа соединений с когтевыми шайбами в сравнении с другими соединениями представлена на рис. 4.11 [63].

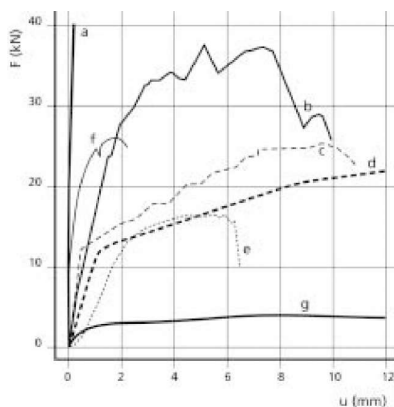


Рис. 4.11. Экспериментальные зависимости деформаций от нагрузки для различных соединений при растяжении параллельно волокнам: *a* – вклеенные стержни ($12,5 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$); *b* – кольцевая шайба (100 мм); *c* – двусторонняя зубчатая шайба ($\varnothing 62 \text{ мм}$); *d* – дубовый нагель ($\varnothing 14 \text{ мм}$); *e* – стальной болт ($\varnothing 14 \text{ мм}$); *f* – соединения на МЗП (10000 мм^2); *g* – соединение на гвоздях ($\varnothing 4,4 \text{ мм}$) [63]

В ходе работы по изучению соединений на когтевых шайбах были получены значения допустимой нагрузки на соединение. Факторами для измерения несущей способности соединений Д. Х. Блассом были приняты размеры шайб, плотность древесины, толщина сплавляемых элементов, диаметр болта (рис. 4.12). Однако в публикациях [57, 58] не было выявлено зависимости угла приложения нагрузки, а также многорядности постановки и влажности древесины на работу соединения. Влияние плотности материала древесины на несущую способность соединения учитывается только до 500 кг/м^3 , обосновывая исчерпание несущей способности в дальнейшем за счет изгиба в зубьях когтевых шайб. Выводы были сделаны на основании испытаний с древесиной европейских красных пород (плотность $450\text{--}600 \text{ кг/м}^3$) и южной желтой сосны (плотность $600\text{--}800 \text{ кг/м}^3$).

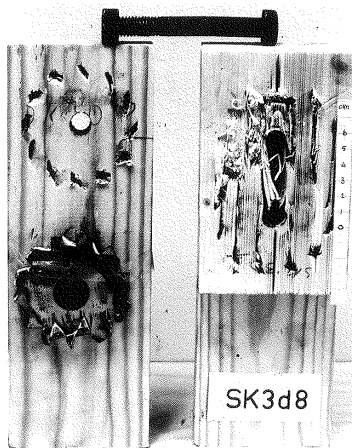


Рис. 4.12. Типичная картина разрушения образца при испытаниях [129]

Модель расчета соединений, представленная в работах Д. Х. Бласса [57, 58], является рекомендованной европейскими нормами проектирования деревянных конструкций также и для материалов на основе древесины [59]. Так, с 1957 по

1991 г. было проведено 426 испытаний когтевых шайб в соединениях деревянных элементов. Получены зависимости несущей способности для различных конфигураций и типов когтевых шайб, угла направления силы к волокнам, количества когтевых шайб. В ходе испытаний было замечено частое разрушение образцов ввиду смятия древесины под когтями шайбы и нагелем. С увеличением деформаций отмечалось возникновение трещин внутри соединяемых элементов.

Работа по изучению когтевых шайб также проводилась Меттемом С. Д., Пэйджем А. В. и др. [61]. Авторами были проведены проверочные испытания соединений на когтевых шайбах «Бульдог» с древесиной сосны с оценкой и сравнением различных формул расчета таких соединений по прочности. Между собой были сравнены уравнения определения несущей способности, предложенные Д. Блассом и М. Шаглером, уравнение, предложенное С. Меттемом и формулой на основе сведений, предложенных авторами ранее [62]. В ходе работы было выявлено, что уравнение, предложенное *Eurocode 5*, отражает реальную картину работы соединения и дает хорошее сопоставление с результатами эксперимента для элементов толщиной 25 мм и плотностью около 500 кг/м³, однако не позволяет адекватно учитывать влияние изменения этих параметров.

Авторы не затронули вопросы оценки линейной и угловой жесткости соединений с когтевыми шайбами. В работе, проведенной Меттемом С. Д., Пэйджем А. В. и др. [61] были рассмотрены результаты 1991 испытания и проводились сравнения результатов расчетов по формулам, предложенным в работе [129], с собственными формулами, учитывающими толщины деревянных элементов, плотность древесины, диаметр шайбы и нагеля:

$$R_{j,k} = 0,0014(t_{\min})^{0,5}(Q_{eff,k})^{1,25}(d_{к.ш})^{1,5} + R_{b,k}; \quad (4.39)$$

$$Q_{eff,k} = \sqrt{Q_a Q_b}, \quad (4.40)$$

где Q_a и Q_b – плотность крайних и средних элементов соответственно;

t_{\min} – минимальная толщина из крайних и средних элементов соединения.

Результаты максимальной несущей способности в зависимости от диаметра когтевой шайбы и ее формы, а также сравнение с расчетной несущей способностью по Нидерландским Нормам NEN 3852 представлены в табл. 4.3, 4.4.

Таблица 4.3

Несущая способность когтевых шайб в сравнении с NEN 3852

$d_{\text{к.ш.}}$, мм	$d_{\text{наг.}}$, мм	c , мм	a , мм	Эксперимент		Расчет по NEN 3852		Отношение
				$N_{\text{к.ш.}}$, кН	$N_{\text{наг.}}$, кН	$N_{\text{к.ш.}}$, кН	$N_{\text{наг.}}$, кН	
50	10	20	19	5,3	2,8	2	0,9	2,88
62	12	26	19	7,3	4,3	3	1,4	2,75
75	12	29	19	9,7	4,8	4	1,6	2,71
95	16	38	25	13,9	8	5,5	2,7	2,75
117	20	58	39	19	14,5	8	5,2	2,58
100×100	16	32	21	18	6,7	7	2,3	2,74
130×130	20	40	27	26,7	10	11	3,6	2,60
70×130	16	58	39	15,2	10,1	6	4,2	2,47

Таблица 4.4

Несущая способность когтевых шайб в сравнении с EuroCode 5

Тип испытаний	$d_{\text{к.ш.}}$, мм	$d_{\text{наг.}}$, мм	a , мм	c , мм	F на 1 срез	По (4.4)
A	63	12	25	50	16,8	16,42
C	63	12	25	50	14,65	16,42
E	63	12	25	50	23,55	18,58
F1	38	10	25	50	12,45	9,96
F2	50	12	25	50	11,72	13,98
F3	75	12	25	50	18,72	19,11
H1	63	12	25	50	12,18	15,82
H2	63	12	25	50	21,68	18,12

Податливость различных соединений в конструкциях из древесины (в том числе с использованием когтевых шайб) была исследована Ю. Хирасима [40]. Автор исследовал различные шпоночные соединения и влияние длительности загрузки, влажности, неравномерности распределения усилий при многорядовой постановке, а также способ внедрения соединителя в тело древесины (вдавливание или предварительная выборка древесины) на несущую способность соединения. Ю. Хирасима отмечает важность своевременного подкручивания гаек в таких соединениях, чтобы гарантировать нахождение когтей шайбы в гнезде при усушке древесины. Автор рассматривает преимущественно древесину твердых пород, произрастающую на юге Японии (акация белая, граб, сосна японская черная), которая имеет физико-механические характеристики, отличающиеся от древесины, используемой в России и Европе.

Изучению влияния длительной нагрузки на соединения древесины с когтевыми шайбами посвящены следующие работы [53–55, 131]. В них приводятся результаты исследований длительной прочности соединений с когтевыми шайбами. Так, в работе [131] приводятся средние кривые ползучести для пяти серий испытаний соединений по трем уровням нагрузки: 30%, 40% и 50%. В работе отмечено, что очертание кривой ползучести при уровне нагрузки в 30% имеет более крутой подъем, нежели для 40 и 50 %. Также отмечается зависимость: чем выше уровень нагрузки, тем меньше увеличение ползучести. Обнаружен значительный прирост ползучести с увеличением влажности в лаборатории, а также спад при соответственном уменьшении влажности. Результаты работы представлены на рис. 4.13.

В Технологическом университете Вильнюса С. Римантасом и командой ученых были проведены испытания для изучения реальной работы соединения в составе целой конструкции фермы [63] (рис. 4.14). В качестве конструкции для испытания были выбраны композитные фермы с металлическими трубчатыми раскосами и параллельными поясами производства фирмы *MacMillan* (Канада) с использованием

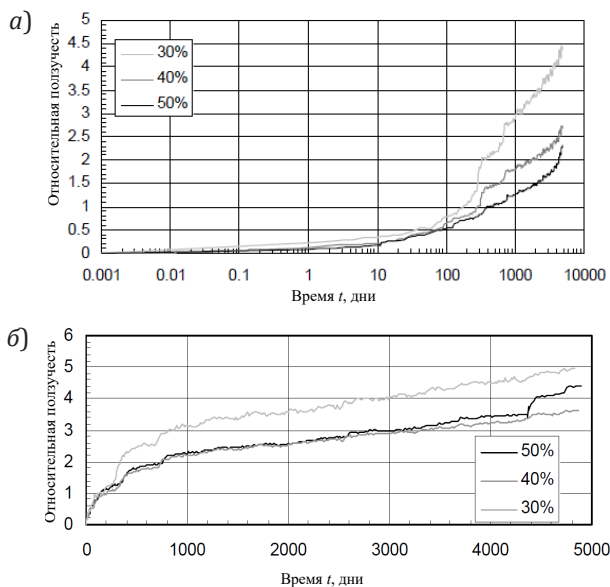


Рис. 4.13. Ползучесть соединений древесины с когтевыми шайбами, приведенная в [131]: а – на логарифмической шкале времени; б – на обычной шкале времени

когтевых шайб «Бульдог» [27]. Автор отмечает зависимость несущей способности соединений от угла между направлением приложения нагрузки и волокон. Модуль деформации фактически оказался выше на 13% по сравнению с теоретическим значением, и его величина зависит от угла приложения нагрузки по отношению к направлению волокон. Статические перемещения оказались значительно выше, чем указанные в *Eurocode 5*. Также было выяснено, что перераспределения напряжений в конструкции начинаются, когда в узлах с шайбами «Бульдог» возникают перемещения вблизи 2 мм.

В механической лаборатории СПбГАСУ ранее проводились исследования конструкций ферм из *LVL* с использованием нагельных соединений Животовым Д. А. [134]. Автором указанной работы была выбрана ферма с параллельными поясами аналогичной геометрии. В данной конструкции

использовались накладки из ДСП-В и нагели диаметром $d_{\text{наг}} = 6$ мм в узлах с расстановкой на расстоянии $5d_{\text{наг}}$. Несущая способность элементов не была исчерпана полностью из-за разрушения нагельного соединения нижнего пояса. Животов Д. А. отмечает, что разрушающая нагрузка, приложенная в узлах составила $P_{\text{max факт}} = 15$ кН без учета длительности коэффициент запаса составляет: $K_{\text{зап}} = 1,65-1,88$. Зависимость деформаций узлов нижнего пояса для различных уровней нагрузки представлена на рис. 4.15.



Рис. 4.14. Экспериментальное исследование фермы с параллельными поясами с когтевыми шайбами Технологического университета Вильнюса [63]

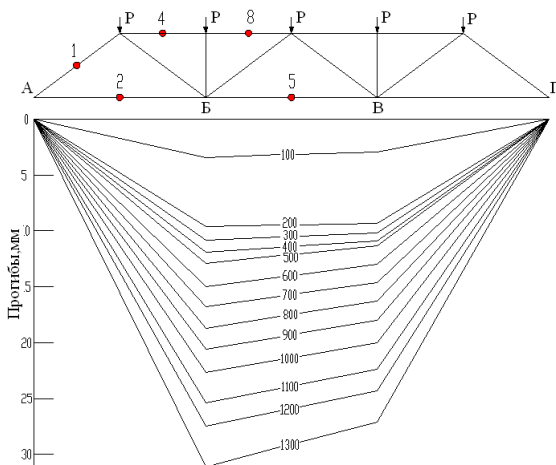


Рис. 4.15. Прогибы нижнего пояса конструкции фермы на нагелях [134]. Указана нагрузка на узел в кв

В 2011 г. Ассоциацией Деревянного Домостроения совместно с СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург) и БелНИИС (г. Брест, Белоруссия) под руководством Черных А. Г. и Найчука А. Я. были произведены испытания соединений и выпущен стандарт СТАДД-3.2-2011, адаптирующий европейские и российские нормы расчета соединений на зубчатых и когтевых шайбах [23]. Данный стандарт регламентирует конструктивные требования к расстановке соединителей в зависимости от размера шайб и угла приложения нагрузки, предлагает формулы для расчета несущей способности соединений на основе европейских норм и методику для проведения испытаний соединений деревянных конструкций на когтевых и зубчатых шайбах по двум предельным состояниям. Данный стандарт позволяет выполнить прогноз деформативности соединений только для длительного периода времени (более 50 лет) и только для соединителей, ограниченных стандартом *EN 912*. При этом используется значительный запас прочности, учитывающий фактор неизученности работы соединения, включающий учет влажности древесины, наличие дефектов в соединениях, обобщенную картину потери прочности древесины под нагрузкой во времени.

Рассмотренные методики исследований имеют недостатки, устранение которых может увеличить точность расчетов соединений конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами.

Глава 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ В LVL

Разработка теоретической модели расчета соединений использует предпосылки уже известных исследований, посвященных вопросам определения несущей способности нагельных соединений с когтевыми шайбами в деревянных конструкциях, рассмотренных в п.п. 4.2, 4.3.

Для выполнения расчетов используются допущения, что:

- ось нагеля принимается прямолинейной до момента образования в нем пластического шарнира;
- деформации нагеля (или когтя шайбы) и *LVL* совместны.

Для данного раздела были установлены следующие подзадачи:

- разработка теоретической модели нагеля, а также когтя шайбы, учитывающей влияние габаритов элементов соединения, влажности *LVL*, длительности действия усилия, прочностные и жесткостные характеристики исходных материалов;
- разработка алгоритма расчета нагельных соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL*.

5.1. Определение связи между усилием, воспринимаемым нагелем и его смещением

Расчет нагельных соединений в конструкциях из *LVL* выполняется так же, как для балки на упруго-вязком основании. Возникающие деформации появляются с самого начала нагружения и изменяются от величины нагрузки, что обосновано свойствами материала *LVL*. В случае длительного воздействия нагрузки в *LVL* возникают деформации смятия, что объясняется ползучестью древесины.

Для древесины сосны были проведены исследования поведения образцов при смятии в отверстиях [42]. Для

выражения степени нелинейности зависимости ползучести древесины от нагрузки были получены изохронные кривые. При анализе данных кривых было выяснено, что нелинейность кривых возрастает с увеличением нагрузки, и на нее влияет угол наклона волокон и влажность древесины.

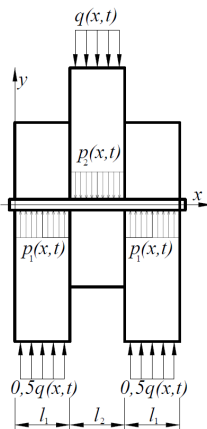


Рис. 5.1. Схема к расчету нагельного соединения

Для описания вязкоупругих свойств можно использовать уравнение, предложенное Работновым Ю. Н. [43], где нелинейность зависимостей факторов учитывается за счет формы кривой мгновенного деформирования (см. рис. 5.1):

$$c \cdot y(x, t) = p(x, t) + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau, \quad (5.1)$$

где C – коэффициент постели от действия цилиндрического штампа;

$p(x, t)$ – реакция гнезда нагеля;

$K(x, t)$ – наследственное ядро уравнения.

Если принять в качестве ядра уравнения функцию следующего вида [72]

$$K_0(t)_{\tau=0} = \frac{c}{\sigma_0} \cdot \frac{d\delta(t)}{dt}, \quad (5.2)$$

то появляется возможность использовать описание вязкоупругих свойств материала при различных режимах нагружения.

При $t = 0$, уравнение (4.12) приобретает вид $c \cdot y(x, t) = p(x, t)$ и является кривой мгновенного деформирования.

Изогнутая ось нагеля описывается уравнением:

$$EIy^{IV}(x, t) + Cy(x, t) + \int_0^t p(x, \tau) K(t, \tau) d\tau = q(x, t), \quad (5.3)$$

где $q(x, t)$ – внешняя нагрузка.

Для решения данного уравнения можно воспользоваться разложением функции $y(x, t)$ в ряд:

$$y(x, t) = \sum C_{ij} z_{ij}; \quad (5.4)$$

где z_{ij} – представляет собой балочную функцию.

В нашем случае можем ограничить выбор первым членом ряда, аналогично работе [42]. Тогда уравнение принимает вид:

$$y(x, t) = \sum C_{1j} z_{1j}. \quad (5.5)$$

При выборе аппроксимирующей кривой учтем граничные условия для каждого деревянного элемента. Для симметричного двухсрезного соединения условия можно записать:

$$\begin{array}{l|l} \text{при } x = 0; & \text{при } x = l; \\ EIy''(0, t) = 0; & EIy''(l, t) = 0; \\ y'''(0, t) = 0; & y'''(l, t) = 0; \\ M_0 = Q_0 = 0; & M_l = Q_l = 0, \end{array} \quad (5.6)$$

где l – длина нагеля в каждом деревянном элементе.

В работе Шешуковой Н. В. балочная функция принимается как:

$$z_{1j} = \sin \xi x + \operatorname{sh} \xi x - \lambda (\cos \xi x + \operatorname{ch} \xi x), \quad (5.7)$$

где ξ и λ принимаются из граничных условий:

$$\xi = \frac{m}{l}; \quad m = 4,73; \quad \lambda = 1,018. \quad (5.8)$$

С помощью метода Бубнова-Галеркина было получено:

$$C_{1j}EIz_{1j}^{IV}(x, t) + C_{1j}Cy(x, t) + C_{1j} \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau = q(x, t). \quad (5.9)$$

При интегрировании на участке длины нагеля в каждом деревянном элементе и умножении уравнения (5.9) на величину $z_{1j}(x, t)$ получается выражение для крайних элементов:

$$C_{11} \int_0^{l_1} \left[EIz_{11}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{11}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau \right] z_{11}(x, t) dx = \\ = \int_0^{l_1} q(x, t) z_{11}(x, t) dx. \quad (5.10)$$

Для среднего элемента получится выражение:

$$C_{12} \int_{l_1}^{l_2} \left[EIz_{12}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{12}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau \right] z_{12}(x, t) dx = \\ = \int_{l_1}^{l_2} q(x, t) z_{12}(x, t) dx. \quad (5.11)$$

Тогда коэффициенты C_{11} , C_{12} , C_{13} определятся, как:

$$C_{11} = C_{13} = \frac{\int_0^{l_1} q(x, t) z_{11}(x, t) dx}{\int_0^{l_1} [EIz_{11}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{11}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau] z_{11}(x, t) dx}; \quad (5.12)$$

$$C_{12} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} q(x, t) z_{12}(x, t) dx}{\int_{l_1}^{l_2} [EIz_{12}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{12}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau] z_{12}(x, t) dx}. \quad (5.13)$$

Ядро уравнения $K(t, \tau)$ принимается в результате аппроксимации кривых ползучести древесины и принимается в виде:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}, \quad (5.14)$$

где A , α , δ – постоянные уравнения (2.14);

t – время нагружения.

После определения C_{11} , C_{12} , C_{13} данные коэффициенты подставляются в уравнение (5.5) и методом интегрирования собираются все составляющие уравнения.

Для отображения сложной формы кривой изгиба оси нагеля в одном выражении в работе [42] предложено воспользоваться функциями Хэвисайда [73]. При использовании кусочно-постоянных функций Хэвисайда $H(x - x_1)$ с любой

зависимостью $f(x)$, такая зависимость становится ограниченной по необходимому параметру:

$$H(x - x_1)f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_1 \\ 1 & \text{при } x > x_1 \end{cases}, \quad (5.15)$$

причем при использовании произведения зависимости $f(x)$ и разности единичных функций H_{xx} :

$$H_{xx}f(x) = f(x)(H(x - x_1) - H(x_1 - x_2)) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_1 \\ 1 & \text{при } x_1 < x < x_2 \\ 0 & \text{при } x > x_2 \end{cases}. \quad (5.16)$$

Для отражения деформирования оси нагеля по всей длине можно рассмотреть три участка, отражающих залегание нагеля внутри каждого элемента двусрезного соединения:

$$0 < x < l_1; \quad l_1 < x < l_1 + l_2; \quad l_1 + l_2 < x < l_2 + 2l_1. \quad (5.17)$$

Деформации на каждом участке отражаются, как сумма трех форм кривых:

$$Y(x, t) = Y_1(x, t)H_{xx1} + Y_2(x, t)H_{xx2} + Y_3(x, t)H_{xx3}, \quad (5.18)$$

где

$$\begin{aligned} H_{xx1} &= H(x) - H(x - l_1); \\ H_{xx2} &= H(x - l_1) - H(x - l_1 - l_2); \\ H_{xx3} &= H(x - l_1 - l_2) - H(x - l_2 - 2l_1). \end{aligned} \quad (5.19)$$

$Y_1(x, t)$, $Y_2(x, t)$, $Y_3(x, t)$ – прогиб в каждом из элементов соединения. Учитывая выражение (2.16) можно записать уравнение деформации нагеля:

$$\begin{aligned} Y(x, t) &= C_{11}z_{11}(x, t)(H(x) - H(x - l_1)) + \\ &+ C_{12}z_{12}(x, t)(H(x - l_1) - H(x - l_1 - l_2)) + \\ &+ C_{13}z_{13}(x, t)(H(x - l_1 - l_2) - H(x - l_2 - 2l_1)). \end{aligned} \quad (5.20)$$

При нахождении решения уравнения (5.20) необходимо, чтобы удовлетворялись условия

$$\sigma_{см} = \frac{q_{см}}{d_{см}} = \frac{d^4 y EI}{dx^4 d_{см}} < R_{см}^{дл}, \quad (5.21)$$

$$Y(x, t) \leq \delta_{\text{пред}}, \quad (5.22)$$

где $R_{\text{см}}^{\text{дл}}$ – величины временного и длительного сопротивления *LVL* смятию под соответствующим углом к волокнам при действии цилиндрическим штампом;

$\delta_{\text{пред}}$ – предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм, нормируемое сводом правил [71].

5.2. Определение связи между усилием, воспринимаемым когтем шайбы, и его смещением

Для описания процесса деформирования гнезда когтя под воздействием нагрузки необходимо рассмотреть крайние случаи поворота когтя шайбы по отношению к углу приложения нагрузки, поскольку они отражают отличные друг от друга частные случаи расположения зубьев в шайбе. При расположении когтя в направлении наименьшей изгибной жесткости (рис. 5.2) для когтя шайбы справедливы следующие выражения:

$$\frac{b(x)}{b} = \frac{x}{h}; \quad b(x) = \frac{b}{h}x, \quad (5.23)$$

где b и h – геометрические характеристики когтя шайбы.

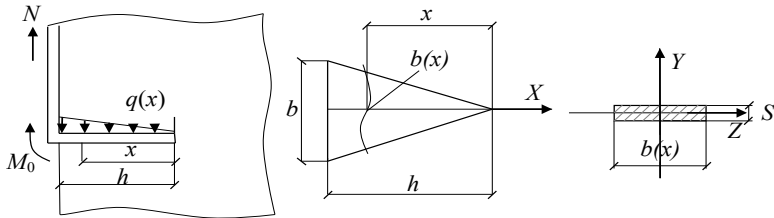


Рис. 5.2. Схемы для расчета когтя шайбы под углом 0^0 к направлению приложения усилия N

Расчет когтя шайбы выполним как для балки переменного сечения на упруго-вязком основании. Приняв материал когтя упругим и пренебрегая влиянием поперечных сил на деформацию и принимая гипотезу плоских сечений, запишем дифференциальное уравнение упругой линии:

$$EI(x) \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x); \quad (5.24)$$

$$I(x) = \frac{b(x)S^3}{12} = \frac{bS^3}{12h} x. \quad (5.25)$$

Поскольку сила отпора переменна, дважды дифференцируем уравнение (5.24):

$$EI(x)\{y'' + xy'''\} = Q(x); \quad (5.26)$$

$$EI(x)\{2y''' + xy^{IV}\} = q(x); \quad (5.27)$$

$$q(x) = C_\alpha y, \quad (5.28)$$

где C_α – коэффициент постели для основания когтя, определенный под воздействием нагрузки от широкой стороны когтя под углом α к волокнам;

y – прогиб когтя шайбы.

Поскольку геометрия когтя подразумевает треугольную форму (размер ширины по длине переменный), в таком виде использование выражения пропорциональности распределенной нагрузки $q(x)$ и прогиба y с использованием коэффициента постели C_α для прямоугольного или цилиндрического штампа не совсем корректно. В таком случае можно величину коэффициента постели C_α использовать, найдя экспериментально как среднюю величину по формуле для штампа треугольного сечения:

$$C_\alpha = \frac{\Delta\sigma_{см}}{\Delta\varepsilon}. \quad (5.29)$$

Таким образом, уравнение (2.27) принимает вид

$$xy^{IV} + 2y''' + \frac{C_\alpha \cdot y}{E \cdot I(x)} = 0. \quad (5.30)$$

Для описания работы когтя с учетом длительности загрузки воспользуемся законом (5.1), который при $p(x, t) = \text{const}$ и с учетом (5.30) можно записать в следующем виде:

$$EI(x)\{2y'''(x, t) + xy^{IV}(x, t)\} + C_{\alpha}y(x, t) + \int_{t_0}^t EI(x)\{2y'''(x, t) + xy^{IV}(x, t)\} K_0(t - \tau) d\tau = 0. \quad (5.31)$$

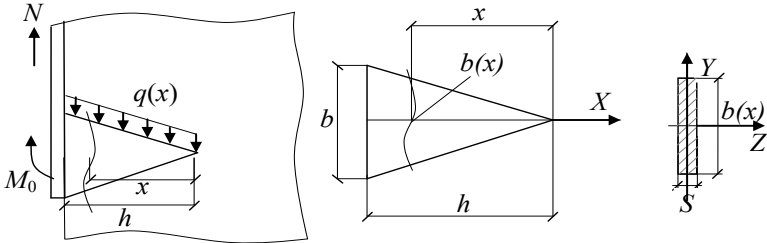


Рис. 5.3. Схемы для расчета когтя шайбы под углом 90° к направлению приложения усилия N

Для случая положения когтя в направлении наибольшей изгибной жесткости справедливы выражения (рис. 5.3):

$$I(x) = \frac{Sb(x)^3}{12} = \frac{Sb^3}{12h^3}x^3. \quad (5.32)$$

Подставим в уравнение (5.24) полученное выражение $I(x)$, тогда:

$$EI(x)x^3 \frac{d^2z}{dx^2} = M(x); \quad (5.33)$$

$$EI(x)\{3z''x^2 + x^3z'''\} = Q(x); \quad (5.34)$$

$$EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\} = q(x). \quad (5.35)$$

Учитывая уравнение (5.28), можно переписать:

$$z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x + \frac{C_{\alpha+90}Z}{EI(x)} = 0, \quad (5.36)$$

где $C_{\alpha+90}$ – коэффициент постели основания когтя, определенный при действии нагрузки тонкой стороной когтя к волокнам.

Для описания работы соединения с учетом длительности загрузки перепишем уравнение (5.1) при $p(x, t) = \text{const}$ с учетом (5.36) в следующем виде:

$$C_{\alpha+90} \cdot z(x, t) + EI(x)\{z'''x^3 + 6z''x^2 + 6z'x\} + \int_0^t EI(x)\{z'''x^3 + 6z''x^2 + 6z'x\}K_0(t - \tau)d\tau = 0. \quad (5.37)$$

В уравнениях (5.31) и (5.37) ядро $K(t, \tau)$ принимается по результату обработки экспериментальных кривых ползучести LVL при действии треугольным штампом.

Для случаев расположения когтя по отношению к направлению действия нагрузки кроме 0° и 90° , необходимо рассматривать систему из двух уравнений (5.31) и (5.37) (рис. 5.4). Необходимо отметить, что усилие N необходимо будет разложить на составляющие, прикладываемые параллельно и перпендикулярно когтю. Вычисления уравнений (5.31) и (5.37) до образования пластического шарнира должны проводиться при следующих граничных условиях:

при $x = 0$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0; \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0; \quad (5.38-5.39)$$

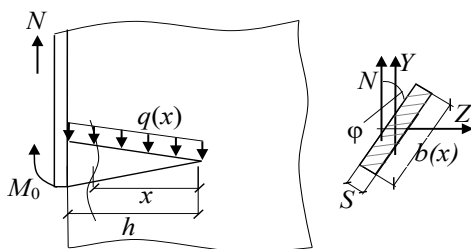


Рис. 5.4. Схемы для расчета когтя шайбы под углом φ к направлению приложения усилия N

при $x = h$

$$\frac{dy}{dx} = \varphi = 0; \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}. \quad (5.40-5.41)$$

При образовании пластического шарнира, граничные условия изменятся:

при $x = 0$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0; \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0; \quad (5.42-5.43)$$

при $x = h$

$$\frac{dy}{dx} = \varphi \neq 0; \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}. \quad (5.44-5.45)$$

Для определения момента, при котором образуется пластический шарнир в когте шайбы $M_{пл}$ (Н·мм), воспользуемся неравенством:

$$M_0 = \frac{d^2y}{dx^2} EI \geq M_{пл}; \quad M_{пл} = R_u W_{пл}; \quad (5.46-5.47)$$

$$R_u = \sigma_{тек} \cdot n; \quad W_{пл} = S_{пл}^B + S_{пл}^H, \quad (5.48-5.49)$$

где R_u – расчетное сопротивление когтя шайбы с учетом упрочнения металла при штамповке, МПа;

$W_{пл}$ – пластический момент сопротивления сечения зуба, мм³;

$\sigma_{тек}$ – предел текучести материала стали когтя шайбы, МПа;

n – коэффициент упрочнения при штамповке, принимаемый по результату экспериментальных данных для материала когтевых шайб при холодной штамповке;

$S_{пл}^B, S_{пл}^H$ – статические моменты сопротивления верхней и нижней частей сечения относительно пластической нейтральной оси, мм³.

Решение уравнений (5.31), (5.37) выполняется в несколько этапов. При невыполнении условия (5.46) выполняются вычисления с предварительно принятым углом поворота в основании зуба, изменяя начальное условие (5.40) на (5.44).

Прочность древесины LVL при действии длительной нагрузки будет достаточной, если выполнится условие (5.50):

$$\sigma_{см} = \frac{q_{см}}{b(x)_{см}} = \frac{d^4y}{dx^4} \frac{EI}{b(x)_{см}} < R_{см}^{дл} k_t, \quad (5.50)$$

где k_t – корректирующий коэффициент для учета влияния толщин соединяемых элементов.

При выполнении условия (5.50) выполнимо предсказание перемещений на заданный период времени, так как

напряжения смятия в гнезде когтя не превышают значения длительного сопротивления сжатию древесины. Данный подход практиковался Никитиным Г. Г. [54] и другими авторами.

Таким образом, для получения решения системы уравнений (5.31) и (5.37) необходимо иметь следующие величины:

$R_{см}^{вр}$, $R_{см}^{дл}$ – величины временного и длительного сопротивления LVL смятию;

E – модуль упругости материала стали когтя шайбы и нагеля;

$\sigma_{тек}$ – предел текучести материала стали когтя шайбы и нагеля;

C – кратковременный коэффициент постели древесины LVL для любого направления волокон при действии треугольным и цилиндрическим штампом;

$K(t, \tau)$ – ядро уравнения деформирования под любым воздействием к волокнам;

n – коэффициент упрочнения металла когтевых шайб при холодной штамповке.

5.3. Разработка методики расчета нагельных соединений на когтевых шайбах

Для расчёта соединений с когтевыми шайбами необходимо перейти к решению задачи определения линейной и угловой жесткостей соединения с учетом того, что соединители, размещенные на различных расстояниях от центра вращения, будут иметь различные смещения и силовые воздействия.

Геометрической особенностью когтевой шайбы является расположение зубьев с периодичностью в 30° с разворотом каждого когтя относительно своей оси симметрии на 30° . В таком случае в шайбе из 12-ти когтей (с одной стороны) имеется 6 типов когтей с одинаковым углом разворота. Необходимо отметить наличие 6-ти (с каждой стороны) дополнительных когтей, предусмотренных для шайб диаметром 95 мм и более. Когти расположены по внутреннему диаметру отверстия и кососимметричны относительно

центра тяжести шайбы. Данные когти имеют габариты, отличные от когтей, расположенных по окружности шайбы (рис. 5.5, 5.6).

Для когтевой шайбы справедливы следующие выражения:

$$\varphi_1 = \varphi_7; \varphi_2 = \varphi_8; \varphi_3 = \varphi_9; \varphi_4 = \varphi_{10}; \varphi_5 = \varphi_{11}; \varphi_6 = \varphi_{12}. \quad (5.51)$$

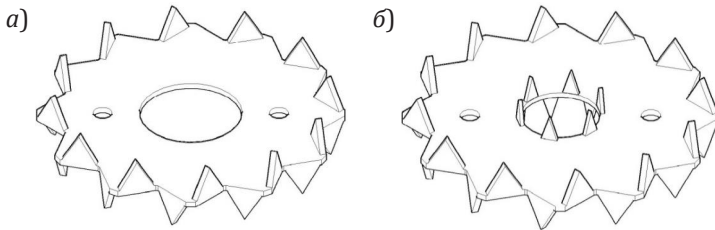


Рис. 5.5. Внешний вид когтевых шайб разного диаметра: а – когтевые шайбы диаметром до 95 мм; б – когтевые шайбы диаметром 95 мм и более

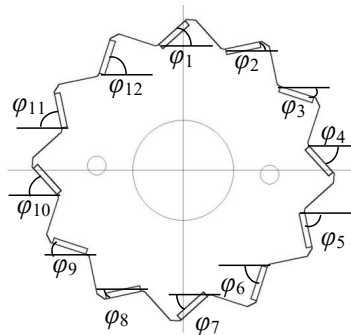


Рис. 5.6. Схема расположения зубьев соединителя

Леннов В. Г. [1] в своей работе для нахождения несущей способности всей шайбы предлагает проецирование каждого когтя шайбы на плоскость, перпендикулярную к направлению силового потока. Затем определяются проекции всех когтей шайбы, и полученная площадь смятия древесины принимается в качестве расчетной. Так как в разработанной

Ленновым В. Г. шайбе минимальная мощность когтя приблизительно равна расчетному напряжению смятия древесины, то с некоторой малой погрешностью можно принять для всей расчетной площади смятия допускаемое напряжение, равное расчетному сопротивлению смятия древесины. Произведением расчетной площади контакта и расчетного сопротивления смятию древесины находится предельное допускаемое усилие на одну когтевую шайбу Леннова.

В нашем случае минимальная мощность когтя (широкой стороной) ниже расчетного напряжения смятия древесины LVL , а при угле поворота когтя относительно своей оси симметрии на 90^0 или близкому (узкой стороной) к этому значению – напряжение смятия древесины ниже мощности когтя. Тогда несущая способность когтевой шайбы может быть найдена как сумма несущих способностей всех когтей:

$$N_{\text{к.ш}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{ког}}, \quad (5.52)$$

где $N_{\text{к.ш}}$ – несущая способность когтевой шайбы;

$N_{\text{ког}}$ – несущая способность i -го когтя.

Суммарная несущая способность одного соединителя на один срез будет найдена как сумма несущих способностей нагеля и когтевой шайбы:

$$N_{\text{соед}} = N_{\text{к.ш.}} + N_{\text{наг}}. \quad (5.53)$$

При передаче нагрузки на узел внутри него могут возникать продольные усилия S_1 , поперечные усилия S_2 , изгибающий момент S_3 . На каждый соединитель внутри одного среза узла будут передаваться эквивалентные продольные усилия $S_{\text{экр.1}}$, поперечные усилия $S_{\text{экр.2}}$, усилие от действия момента $S_{\text{экр.3}}$. Для выполнения расчета за перемещения Δ принимаются смещения соединителей относительно начального положения.

При выполнении расчетов по прочности необходимо соблюдение условия для каждого соединителя:

$$N_{\text{соед}} \geq S_{\text{экр}}. \quad (5.54)$$

Для расчетов принимаются следующие допущения:

1. Положение центра вращения крепежа в соединении остается фиксированным. В соединениях деревянных конструкций центр вращения, как правило, изменяется от изменения нагрузки. Когда соединение подвергается действию изгибающего момента, а также боковой нагрузке, силы, возникшие в соединяемых элементах, будут зависеть от того, изменяется ли центр вращения соединения или он зафиксирован. Однако, из-за относительно высокой жесткости соединителей изменение положения, как правило, будет незначительным. Поэтому предполагается, что центр вращения является зафиксированным. Исходя из этого, центр вращения принимается там же, где и центр группы соединителей.

2. При действии срезающих сил в соединении каждый крепежный элемент принимает равную долю силы. Следовательно, если усилие сдвига в горизонтальной плоскости принять за S_1 , вертикальной плоскости – за S_2 , количество соединителей за n , количество швов за $n_{ш}$, то воспринимаемая сила для каждого соединителя в плоскости сдвига $S_{экр.1}$ и $S_{экр.2}$ будет находиться, как:

$$S_{экр.1} = \frac{S_1}{nn_{ш}}; \quad (5.55)$$

$$S_{экр.2} = \frac{S_2}{nn_{ш}}. \quad (5.56)$$

3. Все крепления в соединении будут иметь линейное смещение при изменении нагрузки. При возникновении малого поворота в соединении под действием крутящего момента, то принимается, что крепеж будет вращаться вокруг центра вращения, а передача нагрузки будет происходить путем передачи напряжений другим элементам в соединении. Чем дальше будет расположен соединитель от центра вращения r_i , тем большим будет смещение Δ_i (рис. 5.7). Так, при появлении в соединении угла поворота Θ , при расстоянии наиболее отдаленного соединительного элемента r_{max} от центра вращения при его смещении Δ_{max} перемещение i -го соединителя Δ_i будет находиться следующим образом:

$$\Delta_i = \frac{r_i}{r_{\max}} \Delta_{\max}. \quad (5.57)$$

4. Характер поведения каждого крепежного элемента зависит от направления силы в каждом элементе. Направление результирующей силы принимается под прямым углом к прямой линии, соединяющей элемент и центр вращения в ненагруженном состоянии.

5. Расстояние до крепежного элемента принимается из условия, что не произойдет преждевременного расщепления или смятия.

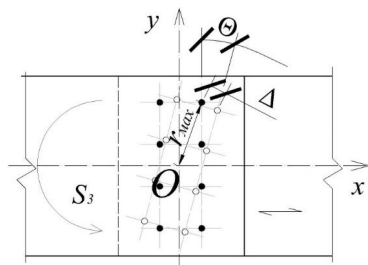


Рис. 5.7. Характер поведения соединителей под действием нагрузки

Рассмотрим двусрезное соединение (рис. 5.8), подвергающееся сочетанию крутящего момента S_3 и сил S_1 и S_2 , в котором есть n крепежных элементов одинакового размера. Горизонтальная и вертикальная составляющие на одной плоскости среза в каждом соединителе будут находиться по уравнениям (5.55, 5.56). Момент, приходящийся на n соединителей в двух плоскостях среза в соединении, будет находиться:

$$S_3 = \frac{S_{\text{эkv.3, макс}}}{r_{\max}} n_{\text{ш}} \sum_{i=1}^n r_i^2. \quad (5.58)$$

Поэтому максимальное усилие $S_{\text{эkv.3, макс}}$ может быть найдено, как:

$$S_{\text{эkv.3, макс}} = \frac{S_3 r_{\max}}{n_{\text{ш}} \sum_{i=1}^n r_i^2}. \quad (5.59)$$

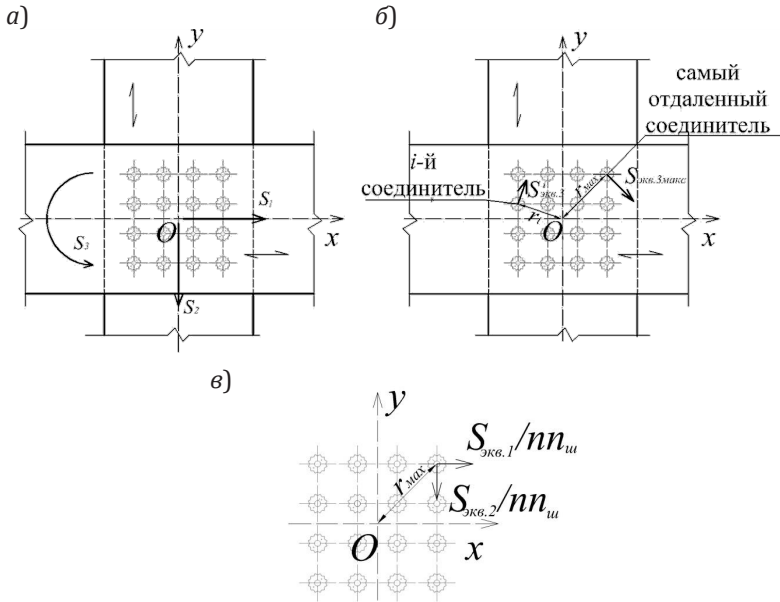


Рис. 5.8. Схема для расчета соединений: а – общий вид соединения; б – возникновение усилий в различных соединительных элементах от действия S_3 ; в – возникновение усилий от действия усилий S_1 и S_2

Если назначить коэффициент линейной жесткости соединения $K_{лин.3}$ под воздействием максимального усилия $S_{эkv.3, макс}$ для выбранного самого отдаленного соединителя можно записать:

$$S_{эkv.3, макс} = K_{лин.3} \Delta_{max} = K_{лин.3} r_{max} \theta, \quad (5.60)$$

где θ – угол поворота под действием момента S_3 ;

r_{max} – расстояние от соединителя до центра вращения.

Аналогично можно записать для i -го соединителя:

$$S_{эkv.3, i} = K_{лин.3} \Delta_i = K_{лин.3} r_{max} \theta \frac{r_i}{r_{max}}. \quad (5.61)$$

Результирующее усилие $S_{эkv'}$, воспринимаемое одной плоскостью среза для одного соединителя, которое включает воздействие $S_{эkv.1}$, $S_{эkv.2}$, $S_{эkv.3}$, будет находиться так (рис. 5.9):

$$S_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(S_{\text{ЭКВ.2}} + S_{\text{ЭКВ.3,макс}} \cos\beta)^2 + (S_{\text{ЭКВ.1}} + S_{\text{ЭКВ.3,макс}} \sin\beta)^2}. \quad (5.62)$$

Угол α приложения нагрузки $S_{\text{ЭКВ}}$ на горизонтальную ось рассчитывается так:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{S_{\text{ЭКВ.1}} + S_{\text{ЭКВ.3,макс}} \sin\beta}{S_{\text{ЭКВ}}}\right). \quad (5.63)$$

Поскольку соединение в плоскости будет иметь три степени свободы, то необходимо задаться тремя значениями жесткостей для узла K_1, K_2, K_3 для перемещений по осям x, y и поворота на угол θ соответственно.

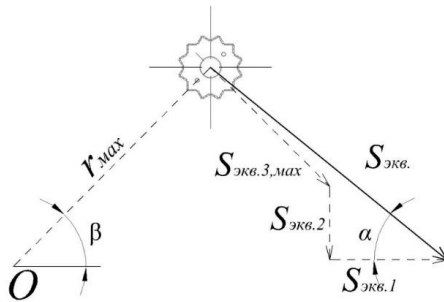


Рис. 5.9. Схема к расчету соединений

Жесткости $K_{\text{наг1}}, K_{\text{наг2}}, K_{\text{наг3}}$ для нагеля на один срез будут определяться:

$$K_{\text{наг1}} = \frac{N_{\text{наг}} \sin\alpha}{\Delta_{x,c}}; \quad K_{\text{наг2}} = \frac{N_{\text{наг}} \cos\alpha}{\Delta_{y,c}}; \quad K_{\text{наг3}} = \frac{N_{\text{наг}} \cdot r_i}{\theta}. \quad (5.64-5.65)$$

Жесткости $K_{\text{к.ш.1}}, K_{\text{к.ш.2}}, K_{\text{к.ш.3}}$ для когтевой шайбы на один срез будут определяться:

$$K_{\text{к.ш.1}} = \frac{\sum N_{\text{ког}} \sin\alpha}{\sum \Delta_{x,c}}; \quad K_{\text{к.ш.2}} = \frac{\sum N_{\text{ког}} \cos\alpha}{\sum \Delta_{y,c}}; \quad K_{\text{к.ш.3}} = \frac{\sum N_{\text{ког}} \cdot r_i}{\sum \theta}; \quad (5.66-5.67)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{2r_i^2 + \sqrt{\Delta_{y,c}^2 + \Delta_{x,c}^2}}{2r_i^2}\right). \quad (5.68)$$

Здесь $\Delta_{x,c}$ и $\Delta_{y,c}$ – смещение соединяемых элементов относительно начального положения по осям u и x , соответственно, определяемые из выражений (5.20) для нагеля и (5.31), (5.37) для каждого когтя шайбы.

Для узла жесткости K_1, K_2, K_3 могут быть найдены путем сложения всех жесткостей соединителей на каждом срезе:

$$K_1 = \sum K_{\text{наг}1} + \sum K_{\text{к.ш.1}}; \quad K_2 = \sum K_{\text{наг}2} + \sum K_{\text{к.ш.2}}; \quad (5.69-5.70)$$

$$K_3 = \sum K_{\text{наг}3} + \sum K_{\text{к.ш.3}}. \quad (5.71)$$

Для расчета конструкций с нагельными соединениями с когтевыми шайбами была принята методика на основе метода конечных элементов (рис. 5.10) [75]. Методикой расчета (рис. 5.11) предусматривается использование нескольких видов конечных элементов в зависимости от вида закрепления. Так, для элементов с жестким защемлением концов принят тип 1, для элементов с жестким защемленным концом и одним шарнирным принят тип 2, для элементов с упруго-податливым защемлением одного конца и жестким защемлением другого – тип 3.

Величины коэффициентов жесткости для упруго-податливых связей будут зависеть от приложенных усилий, а также от наличия в соединителях пластического шарнира, что подразумевает нелинейное распределение зависимостей. Для учета данной особенности необходимо выполнять расчеты с использованием деления нагрузки на несколько частей и поочередного приложения при каждом новом цикле расчета.

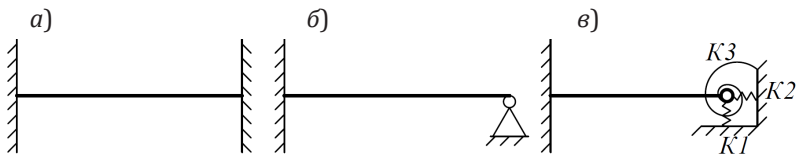


Рис. 5.10. Схемы конечных элементов с упруго-податливым закреплением: а – тип 1; б – тип 2; в – тип 3

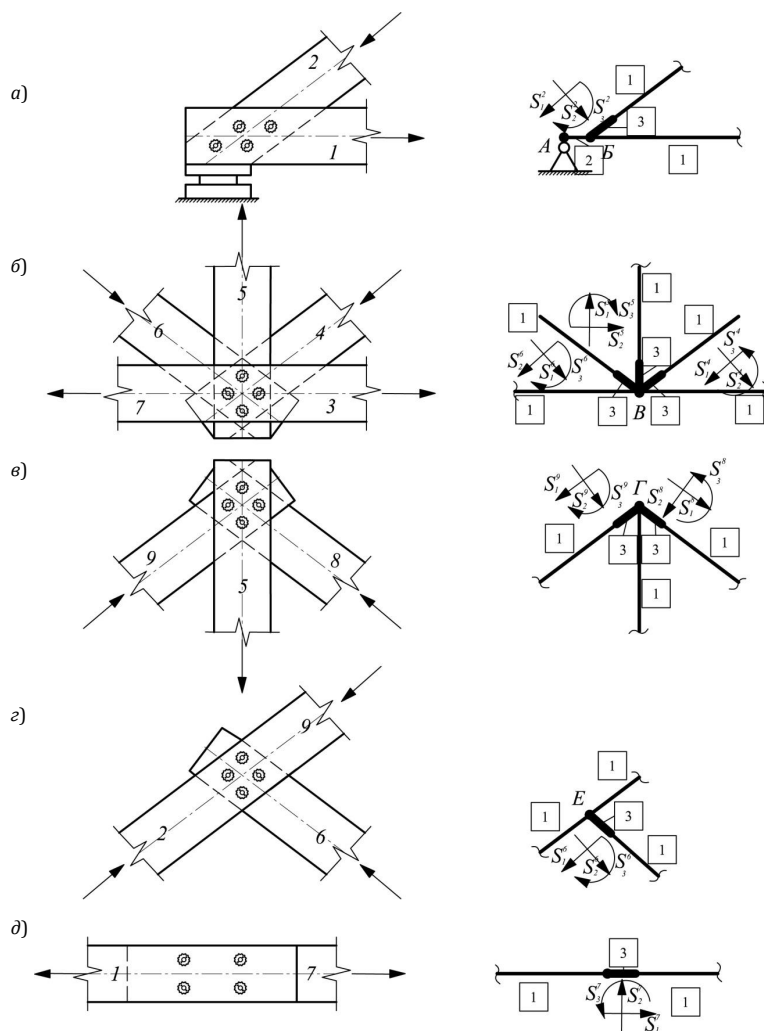


Рис. 5.11. Схемы к расчету соединений в конструкциях ферм с обозначением номеров стержней и принятых типов конечных элементов (в квадратах): а – узел соединения верхнего и нижнего пояса; б – узел соединения нижнего пояса, раскосов и стойки; в – узел соединения стойки и верхнего пояса; г – узел соединения верхнего пояса и раскоса; д – узел соединения элементов по длине

Порядок расчета будет состоять из следующих операций:

1. Указание исходных данных:
 - геометрическая схема конструкции;
 - характеристика соединительных элементов (толщина металла когтевой шайбы t , высота когтя h , ширина когтя b , модуль упругости металла когтевой шайбы и материала нагеля E , расчетное сопротивление стали когтевой шайбы и материала нагеля изгибу $R_{изг}$, диаметр нагеля d);
 - характеристика соединяемых элементов (коэффициент постели C для LVL при воздействии треугольным штампом, коэффициент постели C для LVL при воздействии цилиндрическим штампом, толщина крайних элементов a , толщина средних элементов c , сопротивление древесины сжатию вдоль и поперек волокон $R_{сж}$, влажность W элементов из LVL).
2. Задание расчетной схемы:
 - определение расположения когтевых шайб по отношению к центру вращения;
 - определение типов конечных элементов с указанием жесткостных характеристик, номеров узлов и их координаты;
 - определение параметров ядра $K(t, \tau)$ уравнений деформирования (5.31) (5.37) для когтевых шайб и (5.20) для нагелей.
3. Приложение расчетной нагрузки $N_{расч}$ к узлам.
4. Вычисление внутренних усилий S_1, S_2, S_3 .
5. Проверка сечений элементов конструкции по условиям I и II предельных состояний.
6. Определение эквивалентных усилий восприятия срезом соединителей $S_{эkv}$ для каждого узла.
7. Производится расчет каждого узла с приложением начального усилия N_{01} с последующим догружением.
8. Проверка соблюдения условий (5.46): в случае их несоблюдения производится изменение граничных условий (при $x = h$ угол поворота сечения $\varphi_0 \neq 0$). Проверка соблюдения условий (5.21), (5.22), (5.50): в случае их несоблюдения нагрузка N_n принимается в качестве максимально допустимой отдельно для нагеля ($N_{наг}$) и когтевой шайбы

($N_{к.ш}$). Еще производится определение жесткостей для нагеля и когтевой шайбы, используя полученные деформации Δ , и определение жесткостей узла K_1, K_2, K_3 или их корректировка для повторных циклов. Значения жесткостей для соответствующего направления для нагеля и когтевой шайбы суммируются.

9. Несущая способность нагеля $N_{наг}$ и когтевой шайбы $N_{к.ш}$ складывается, образуя $N_{соед}$. Выполняется проверка справедливости неравенства $N_{соед} \geq S_{экв}$ и определение фактических деформаций, возникающих в расчетном узле.

10. Определение фактических перемещений:

$$\Delta_1 = \frac{S_1}{K_1}; \quad \Delta_2 = \frac{S_2}{K_2}; \quad \theta = \frac{S_3}{K_3}. \quad (5.72-5.74)$$

11. Определение НДС соединения и вывод о соответствии соединения требованиям необходимой прочности и жесткости.

Представленный алгоритм расчета приведен в виде блок-схем в Приложении 1.

5.5. Выводы по главе

1. Разработаны теоретические модели нагеля и когтя шайбы, учитывающие влияние габаритов элементов соединения, влажности LVL , длительности действия усилия, прочностные и жесткостные характеристики исходных материалов.

2. Определено, что применение теории наследственности деформаций вязкоупругих тел для нагельных соединений с когтевыми шайбами в LVL позволяет учесть действие кратковременных и длительных нагрузок на характер деформируемости.

3. Предложен алгоритм расчета деревянных конструкций с соединениями на когтевых шайбах, который позволяет учитывать образование пластического шарнира в соединителях в случаях, когда это не является признаком разрушения соединения.

Глава 6. ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ СОЕДИНЕНИЙ С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КЛЕЕНОГО БРУСА *LVL*

Для применения методики расчета деревянных конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами типа «Бульдог», предложенной в данной работе, требуется знать кратковременные и длительные сопротивления материала *LVL*, а также кратковременные коэффициенты постели для треугольного и цилиндрического штампов, определенные для различных направлений приложения усилий по отношению к волокнам *LVL* и габаритам штампов. Также необходимо определить уравнение описания формы кривой мгновенного деформирования $K_0(t)$, установить жесткость и предел текучести материала соединителей. Для получения прочностных показателей свойств материала *LVL*, необходимо провести испытания по ГОСТ 16483.2–70* [74], ГОСТ 168483.10–73* [75].

Таким образом, для расчета по предлагаемой методике необходимо экспериментально получить:

- диаграмму деформирования материала *LVL* при действии временной и длительной нагрузки вдоль и поперек волокон штампами различной формы (треугольной и цилиндрической), а также в зависимости от габаритов штампов;
- зависимость предела прочности $R_{сж}$ и коэффициента постели C при действии нагрузки вдоль и поперек волокон штампами различной формы, а также в зависимости от габаритов штампов при длительных и кратковременных действиях нагрузки;
- ядро уравнения мгновенного деформирования $K_0(t)$;
- значение длительной прочности $R_{дл}$ для материала *LVL*;
- предел текучести $\sigma_{тек}$ и модуль упругости E металла когтевой шайбы и нагеля;
- коэффициент упрочнения n для стали когтевых шайб при холодной штамповке.

6.1. Исследование прочностных и жесткостных характеристик материала *LVL*

Испытания по определению предела прочности вдоль и поперек волокон, а также по определению модуля упругости вдоль волокон (рис. 6.1) было выполнено по ГОСТ 16483.2-70* [94], ГОСТ 168483.10-73* [95], ГОСТ 16483.9-73* [96]. Материалом для определения расчетных характеристик *LVL* при действии кратковременных нагрузок был выбран брус *LVL Ultralam-R* [152] производства компании «Талион Трейдинг» (г. Торжок, Россия).

Были изготовлены образцы прямоугольной формы сечением 20×20 мм длиной вдоль волокон 300, 60 и 30 мм. Размеры образцов определялись с точностью до 0,1 мм, после чего образцы помещались в испытательную машину. Испытания по определению предела прочности вдоль и поперек волокон проводились на универсальной испытательной машине *Instron*. При подаче нагрузки фиксировалось смещение двумя индикаторами ИЧ-10. Затем определялось значение прочности на сжатие вдоль или поперек волокон для образца. После испытаний была определена влажность образцов по ГОСТ 16483.7-71 [97]. Значения влажности образцов составило составляли 11,5% и 9,8%. Результаты испытаний были приведены к влажности 12%. Полученные значения были статистически обработаны и приведены в табл. 6.1.

Испытания по определению модуля упругости вдоль волокон проводились на универсальной испытательной машине *Instron*. При подаче нагрузки фиксировалось смещение одним индикаторами ИЧ-10 через специальный кронштейн. Затем определялось значение модуля упругости вдоль волокон для образца. После испытаний была определена влажность образцов по ГОСТ 16483.7-71 [97]. Значения влажности образцов составило составляли 11,5 и 9,8 %. Результаты испытаний были приведены к влажности 12% по формуле (4.31). Полученные значения были статистически обработаны и приведены в табл. 6.2. Значение модуля упругости принимается $E = 14\ 000$ МПа.

Таблица 6.1

Результаты определения предела прочности сжатия LVL

Образец №	Предел прочности $\sigma_{сж}$, МПа	Среднее значение $\sigma_{сж}$, МПа	Среднее квадратичное отклонение s , МПа	Коэфф. вариации V , %	Средняя квадратичная погрешность P , %
Испытания вдоль волокон					
1	52,62	57,04	2,04	3,40	2,71
2	58,40				
3	58,97				
4	57,03				
5	58,07				
6	55,84				
7	59,42				
8	58,08				
9	56,70				
10	55,28				
Испытания поперек волокон					
1	9,81	10,60	0,72	6,40	5,02
2	12,14				
3	10,95				
4	11,32				
5	10,66				
6	10,55				
7	10,41				
8	10,24				
9	10,06				
10	9,89				

Таблица 6.2

**Результаты определения модуля упругости *LVL*
вдоль волокон**

Образец №	Модуль упругости E , МПа	Среднее значение E , МПа	Среднее квадратичное отклонение s , МПа	Кoeff. вариации V , %	Средняя квадратичная погрешность P , %
Испытания вдоль волокон					
1	14620,00	14032,00	1159,60	7,84	3,51
2	15600,00				
3	13850,00				
4	12690,00				
5	14180,00				
6	15410,00				
7	11890,00				
8	14460,00				
9	14390,00				
10	13230,00				

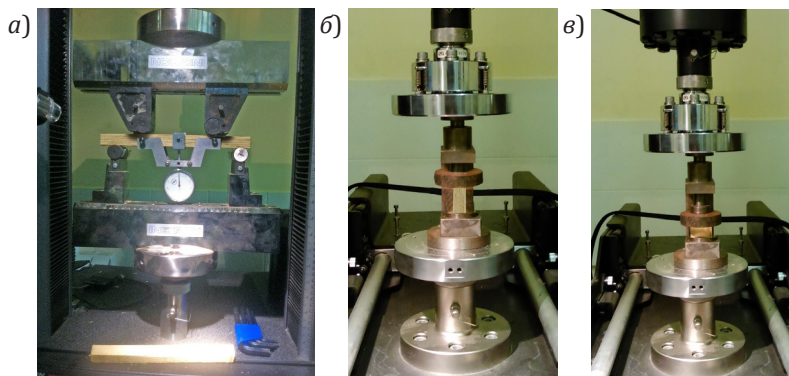


Рис. 6.1. Испытания *LVL*: а – определение модуля упругости вдоль волокон; б – предел прочности на сжатие вдоль волокон; в – предел прочности на сжатие поперек волокон

6.2. Определение расчетных характеристик древесины LVL при смятии штампом различной формы

Для расчета соединений в конструкциях из клееного однонаправленного бруса LVL с когтевыми шайбами по деформациям необходимо знать значение коэффициента постели LVL при передаче нагрузки треугольным когтем и цилиндрическим нагелем вдоль и поперек волокон. Информация о величине коэффициента постели треугольным штампом для бруса LVL отсутствует, а информации о коэффициенте постели цилиндрической формы для бруса LVL при различных размерах штампа недостаточно. В связи с этим является необходимым определение коэффициента постели для треугольного и цилиндрического штампов при различных направлениях приложения усилий к волокнам и габаритам когтя шайбы.

В реальной конструкции в соединении передача нагрузки осуществляется в плоскости конструкции, поэтому считается необходимым произвести испытания образцов в плоскости бруса LVL.

Учет влияния угла смятия α по отношению к волокнам, коэффициента постели и предела прочности на смятие предложено учитывать выражениями (6.29), (6.30). Согласно работам Крицина А. В., Шешуковой Н. В., а также других исследователей [67, 42, 133], опытные данные для прямоугольных плоских и цилиндрических штампов хорошо согласуются со значениями прочности в области упругих деформаций и коэффициентов постели при показателе степени $n = 2$ для древесины. В данной работе предлагается использование параметра n в формулах (6.29), (6.30) для LVL принять равным двум.

Влажность образцов определяется по ГОСТ 16483.7-71 [97]. Для учета влажности образцов LVL и приведения величин прочности и коэффициента постели к влажности $w = 12\%$, используются уравнения (6.29), (6.30).

6.2.1. Исследование влияния высоты треугольного штампа на прочность при смятии и коэффициент постели LVL при действии кратковременной нагрузки

Эксперименты по определению коэффициента постели при смятии треугольным штампом осуществлялись с помощью вдавливания треугольных штампов различных размеров в соответствии с диаметром шайб в образцы, представляющие собой бруски сечением 50×51 мм и длиной вдоль и поперек волокон 120 мм из LVL с фиксацией прикладываемой нагрузки и соответствующих смещений. Материалом LVL был выбран брус LVL Ultralam-R [152].

Для получения коэффициента постели при передаче нагрузки когтем шайбы необходимо исключить деформации самого когтя, поэтому были выполнены металлические штампы треугольной формы, моделирующие когти шайб из металла толщиной 8 мм. Принято допущение о незначительности деформаций штампа данной толщины, не влияющих на общий результат измерений. Размеры штампов указаны на рис. 6.2. Размеры когтей соответствуют когтевым шайбам Ø50 мм, Ø75 мм и Ø117 мм соответственно. Всего было проведено 60 испытаний (6 серий по 10 опытов в каждой).

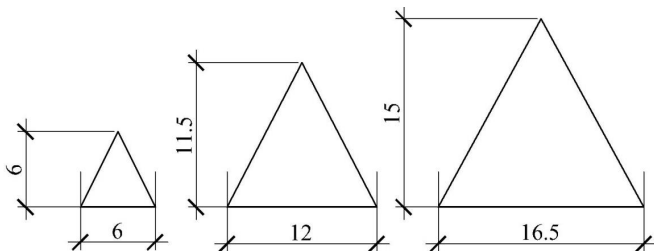


Рис. 6.2. Размеры треугольных штампов, соответствующие диаметрам когтевых пластин 50, 95 и 117 мм соответственно

При передаче нагрузки от треугольного штампа напряжения смятия распределяются под площадью штампа, а на гранях возникают срезающие усилия. В реальном соединении сминающая нагрузка от когтя воспринимается

всей площадью соприкосновения, и только две боковые грани когтя будут создавать срезающие напряжения. Для того, чтобы учесть эту особенность передачи нагрузки при проведении испытаний, был выполнен пропил по центру деревянного образца, как показано на рис. 6.3. Штамп устанавливался таким образом, чтобы одной гранью быть заподлицо с пропилом, и быть по центру деревянного образца, чтобы избежать возможного возникновения эксцентриситета при передаче усилий в образце.

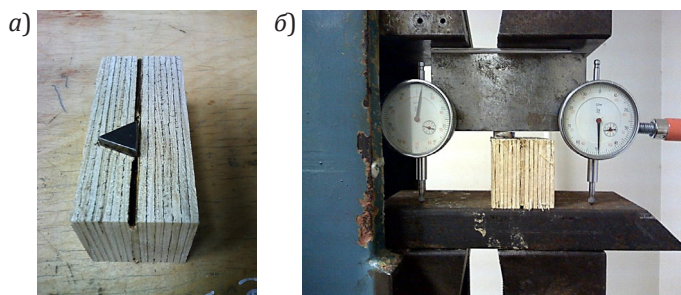


Рис. 6.3. Проведение испытаний для получения коэффициента постели для LVL треугольным штампом: а – образец LVL с пропилом; б – схема испытательной установки

После размещения штампа на деревянном параллелепипеде из LVL устанавливалась пластина для передачи нагрузки с двумя зафиксированными на ней индикаторами перемещения ИЧ-10. Индикаторы дублируют показания перемещений и позволяют учесть влияние перекоса распределяющей нагрузку пластины при испытаниях, усредняя значение фактического смещения.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине РС-5 с установкой шкалы 1000 кг (цена деления 1 кг). Образец из LVL устанавливался на площадку машины с установкой на него треугольного штампа и металлической пластины с индикаторами перемещения. Металлическая пластина служит для передачи нагрузки от рабочих площадок универсальной испытательной машины и увеличения расстояния между ними для свободной работы индикаторов перемещения.

Загружение проводилось с постоянной скоростью перемещения нагружающего устройства 2 мм/мин таким образом, чтобы предельная нагрузка была достигнута в течении 3 мин от начала испытания. Отсчеты перемещения фиксировались одновременно при достижении каждого шага в $0,1F_{est}^{max}$ от ожидаемой максимальной нагрузки. Значение ожидаемой максимальной нагрузки было определено путем пробного нагружения до начала основных испытаний. Результаты испытаний приведены к влажности LVL $W = 12\%$, после чего была проведена статистическая обработка данных, которые приведены в табл. 6.3 и 6.4.

Таблица 6.3

Экспериментальные значения прочности на сжатие LVL треугольным штампом вдоль и поперек волокон

Среднее значение прочности R_{cp} , МПа	Количество испытаний в серии n , шт.	Среднеквадратичное отклонение S , МПа	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P , %
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h = 6$ мм вдоль волокон				
54,81	10	1,98	2,40	3,71
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h = 6$ мм поперек волокон				
27,80	10	1,01	9,12	8,21
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h = 11,5$ мм вдоль волокон				
53,64	10	2,06	3,12	4,89
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h = 11,5$ мм поперек волокон				
26,36	10	0,97	7,85	8,01
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h = 15$ мм вдоль волокон				
52,17	10	2,12	6,04	5,72
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h = 15$ мм поперек волокон				
22,34	10	1,09	9,36	9,08

Таблица 6.4

Экспериментальные значения коэффициента постели LVL при сжатии треугольным штампом вдоль и поперек волокон

Среднее значение коэфф. постели C_{cp} , Н/мм ³	Количество испытаний в серии n , шт	Среднеквадратичное отклонение S , Н/мм ³	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P , %
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h = 6$ мм вдоль волокон				
171,30	10	6,21	4,54	6,84
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h = 6$ мм поперек волокон				
47,93	10	1,89	6,21	4,52
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h = 11,5$ мм вдоль волокон				
167,61	10	8,32	6,29	8,94
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h = 11,5$ мм поперек волокон				
33,80	10	1,27	4,69	8,89
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h = 15$ мм вдоль волокон				
163,04	10	7,24	8,45	6,95
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h = 15$ мм поперек волокон				
27,57	10	0,98	8,53	6,88

Всего было испытано 120 образцов (60 испытаний для цилиндрического и 60 испытаний для треугольного штампа).

После обработки результатов всех испытаний были получены уравнения регрессии, выражающие зависимость между пределом прочности LVL при сжатии по ГОСТ 168483.10-73* [95] и при смятии треугольным штампом R_{CM}^{BP}/R_{CK}^{BP} , а также между величиной коэффициента постели для треугольного штампа C_{CM}^{BP}/R_{CK}^{BP} и высотой когтя шайб h для воздействия вдоль и поперек волокон.

Графики зависимости напряжения и деформации приведены на рис. 6.4–6.5 для смятия вдоль и поперек волокон при высоте когтей, соответствующих диаметрам пластин 50 мм (высота когтя $h = 6$ мм), 95 мм (высота когтя $h = 11,5$ мм), 117 мм (высота когтя $h = 15$ мм).

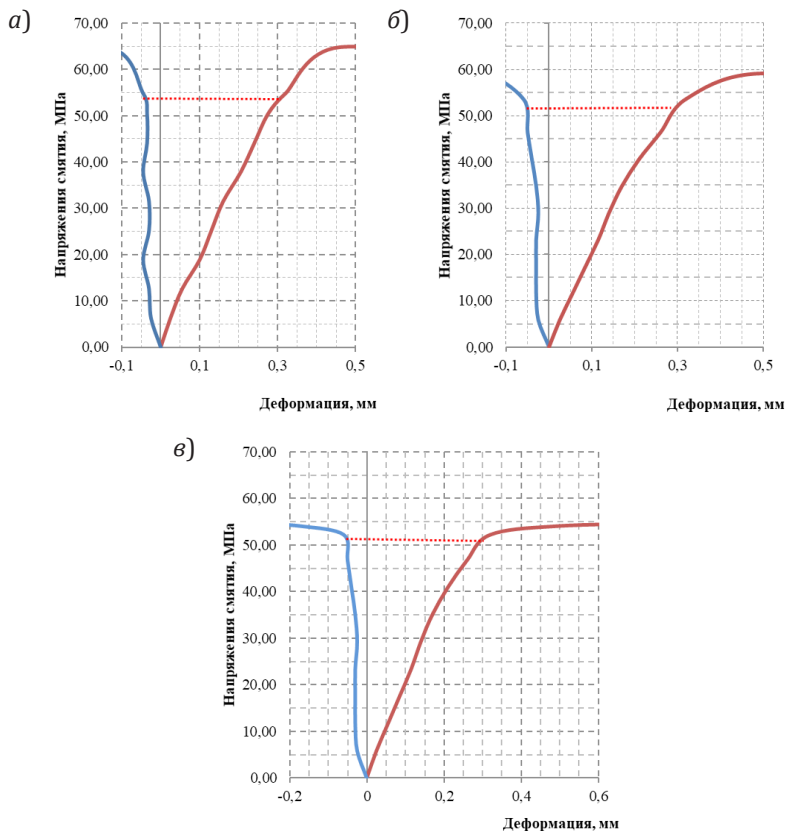


Рис. 6.4. Зависимость деформаций смятия вдоль волокон от напряжения смятия для штампов высотой h : а – при $h = 6$ мм ($\varnothing 50$ мм); б – при $h = 11,5$ мм ($\varnothing 95$ мм); в – при $h = 15$ мм ($\varnothing 117$ мм)

Напряжения смятия для выбранных габаритов когтей были определены по величине прироста деформаций и сведены в один график для разных размеров когтей отдельно для смятия

вдоль и поперек волокон. Это позволило наглядно определить влияние габаритов когтя на исследуемые характеристики.

Для смятия вдоль волокон:

$$R_{см.0} = (-0,005h + 0,993)R_{сж,0};$$

$$C_0 = (-0,016h + 3,103) R_{сж,0}$$

Для смятия поперек волокон:

$$R_{см.90} = (-0,054h + 2,993)R_{сж,90};$$

$$C_{90} = (-0,216h + 5,774) R_{сж,90}.$$

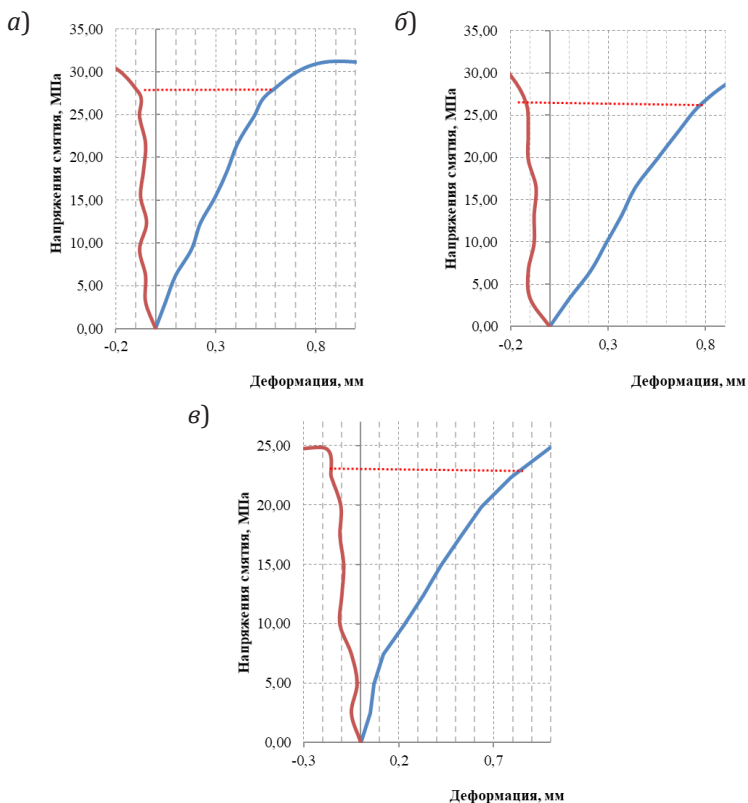


Рис. 6.5. Зависимость деформаций смятия поперек волокон от напряжения смятия для штампов высотой h : а – при $h = 6 \text{ мм}$ ($\emptyset 50 \text{ мм}$); б – при $h = 11,5 \text{ мм}$ ($\emptyset 95 \text{ мм}$); в – при $h = 15 \text{ мм}$ ($\emptyset 117 \text{ мм}$)

Анализируя полученные результаты, можно сказать о некотором снижении прочности на сжатие треугольным штампом при увеличении габаритов когтя, что находит отражение, как для случая сжатия вдоль, так и поперек направления волокон (рис. 6.6–6.7). При сопоставлении данных результатов с испытаниями прямоугольных штампов в древесине сосны можно отметить различие в увеличении отношения предела прочности древесины $R_{см}$ при действии вдоль волокон к пределу прочности $R_{сж}$ при увеличении габаритов штампа. Данное расхождение можно посчитать особенностью работы материала *LVL* при действии треугольным штампом.

Полученные уравнения регрессии необходимы при расчете когтей шайбы в конструкциях из клееного однонаправленного бруса *LVL* по деформациям.

6.2.2. Исследование влияния высоты треугольного штампа на прочность при смятии и коэффициент постели *LVL* при действии длительной нагрузки

Исследования длительной прочности *LVL* при действии треугольным штампом осуществлялись с помощью вдавливания треугольных штампов различных размеров в соответствии с диаметром шайб в образцы из *LVL*, представляющие собой бруски сечением 50×45 мм и длиной вдоль и поперек волокон 120 мм с фиксацией прикладываемой нагрузки и соответствующих смещений. Материалом *LVL* был выбран брус *LVL Ultralam-R*. Размеры когтей соответствуют размерам когтей для шайб Ø50 мм ($h = 6$ мм) и Ø95 мм ($h = 11,5$ мм). Образцы *LVL* имели влажность $W = 11,2\%$ ($R_{сж} = 58,2$ МПа) и $W = 9,8\%$ ($R_{сж} = 62,53$ МПа). Поскольку на практике только две боковые грани когтя будут создавать срезающие напряжения, был выполнен пропил по центру деревянного образца, чтобы была возможность установить штамп одной гранью заподлицо с пропилом и иметь возможность расположения штампа по центру образца *LVL*.

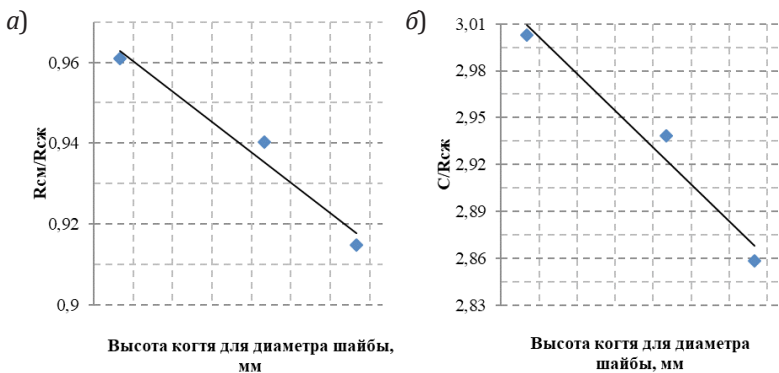


Рис. 6.6. Экспериментальные зависимости: *a* – между отношением предела прочности *LVL* при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданном габарите штампа; *б* – между отношением коэффициента постели *LVL* при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданном габарите штампа

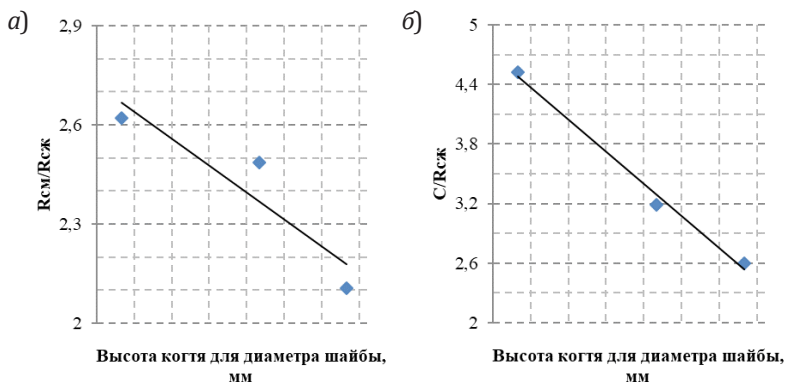


Рис. 6.7. Экспериментальные зависимости: *a* – между отношением предела прочности *LVL* при смятии поперек волокон к пределу прочности при сжатии при заданном габарите штампа; *б* – между отношением коэффициента постели *LVL* при смятии поперек волокон к пределу прочности при сжатии при заданном габарите штампа

Для проведения испытаний была разработана установка рычажного типа, позволяющая прикладывать неизменную нагрузку в течение длительного периода времени с возможностью отслеживания смещения штампа. Схема установки представляет собой металлическую раму, на которой установлено жесткое основание. На него укладывается опора для образца из *LVL* выполняющая также функцию противовеса. Для создания необходимого усилия имеется рычаг, закрепленный к металлической раме и груз, устанавливаемый на конце рычага. Схема установки представлена на рис. 6.8.

Изготовленная конструкция позволяет получать выигрыш в силе 1:17. Для измерения смещений вдавливания штампа на установке были выполнены выступы для крепления одновременно двух индикаторов перемещений с разных сторон от образца, которые измеряли вертикальное смещение штампа относительно *LVL*.

Для фиксирования первоначальной влажности древесины образцы были замотаны в стрэтч-пленку, что позволяло им сохранять одинаковую влажность на весь период испытаний и исключить изменение внешней влажности. Значения в ходе эксперимента считались полученными для материала неизменной влажности на протяжении всего времени испытаний.

Величина длительной нагрузки была выбрана равной $R = 0,4R_{\max}$ от разрушающего усилия. Авторами, проводящими длительные испытания древесины [21, 67, 103], а также *LVL* [98, 99] было выяснено, что кривая деформирования при данном уровне нагрузки будет иметь затухающий характер.

Всего было проведено 16 испытаний (8 серий по 2 опыта в каждой). Испытания проводились в течение 100 суток каждое. Разгрузка образцов выполнялась в течении 24 суток. После испытаний были построены графики кривых деформирования для различных размеров штампа и направления приложения усилия к волокнам. Структура проведенных испытаний приведена в табл. 6.5.

6.2. Определение расчетных характеристик древесины LVL при смятии...

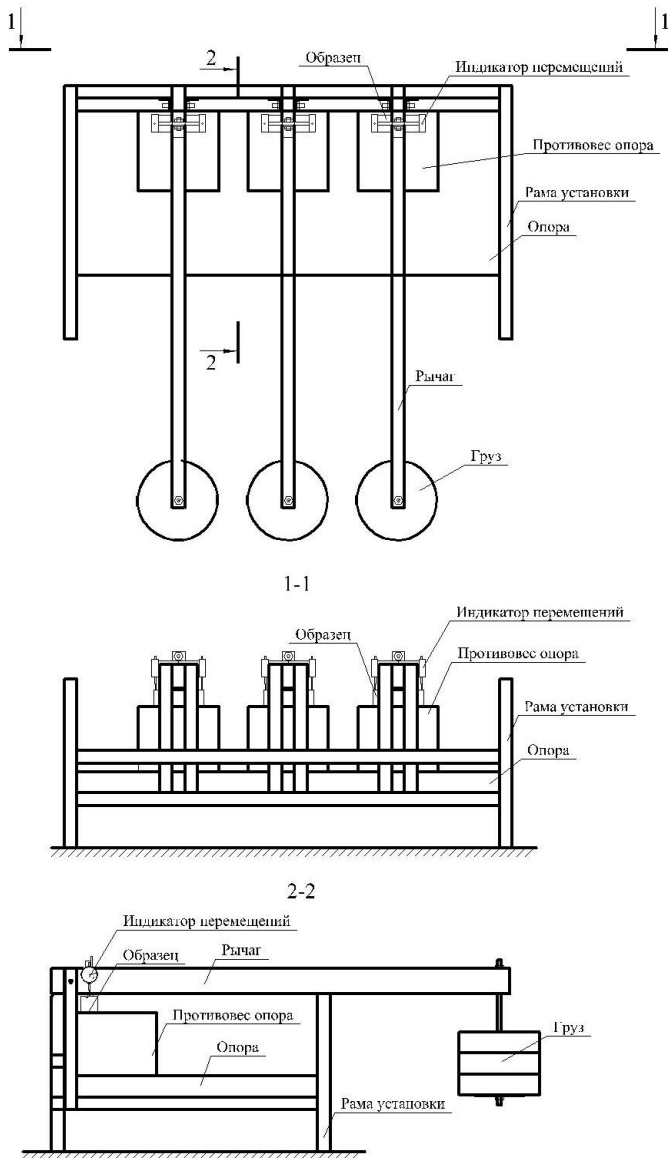


Рис. 6.8. Схема установки для определения сопротивления LVL длительному действию нагрузки

Таблица 6.5

**Структура испытаний на смятие *LVL* треугольным
штампом от действия длительной нагрузки**

Номер серии	1	2	3	4	5	6	7	8
Высота штампа h , мм	6	11,5	6	11,5	6	11,5	6	11,5
Влажность W	9,8 %		11,2 %		9,8 %		11,2 %	
Направление волокон	Вдоль волокон				Поперек волокон			
Количество опытов	2 дубликата в серии							
Длительность испытаний t , сут	100							
Уровень нагрузки R	$0,4R_{max}$							

Для влажности $W = 9,8\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,161 мм, прирост деформаций составил 0,09 мм для когтя высотой $h = 6$ мм, деформации смещения составили 0,41 мм, прирост деформаций составил 0,24 мм для когтя высотой $h = 11,5$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,32 мм, прирост деформаций составил 0,51 мм для когтя высотой $h = 6$ мм, деформации смещения составили 0,43 мм, прирост деформаций составил 0,7 мм для когтя высотой $h = 11,5$ мм.

Для влажности $W = 11,2\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,23 мм, прирост деформаций составил 0,13 мм для когтя высотой $h = 6$ мм, деформации смещения составили 0,57 мм, прирост деформаций составил 0,34 мм для когтя высотой $h = 11,5$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,45 мм, прирост деформаций составил 0,73 мм для когтя высотой $h = 6$ мм, деформации смещения составили 0,62 мм, прирост деформаций составил 0,98 мм для когтя высотой $h = 11,5$ мм. На протяжении всего временного участка испытания (100 сут) кривые ползучести имели затухающий характер, который начинался в среднем на 39-е сутки испытаний, при

этом основной прирост деформаций происходил в первые 10 суток.

Наиболее сильно влияние фактора времени сказывалось для образцов, подверженных действию нагрузки поперек волокон при влажности $W = 11,2\%$, при которой прирост деформаций, в среднем, составил 76% .

Для определения ядра мгновенного деформирования $K_0(t)$ для определенного момента времени можем воспользоваться уравнением:

$$K_0(t)_{\tau=0} = \frac{C}{\sigma_0} \cdot \frac{d\delta(t)}{dt}, \quad (6.1)$$

где C – мгновенный коэффициент постели, Н/мм³;

σ_0 – напряжение под штампом, МПа;

$\frac{d\delta(t)}{dt}$ – скорость роста деформаций упругого последействия, мм/с.

Уравнение (6.1) использовалось Крициным А. В., Дмитриевым П. А. в своих работах [36, 67].

После применения уравнения (6.1) строились кривые $K_0(t)$ для образцов различного размера штампа и направления приложения усилия к волокнам. Полученные кривые статистически обрабатывались с применением уравнения регрессии в виде уравнения:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}, \quad (6.2)$$

где A , α , δ – постоянные уравнения (6.2);

t – время нагружения.

Чтобы учесть влияние влажности образцов W на результаты исследования воспользуемся коэффициентом A , выражающим зависимость от изменения влажности в образцах. Известно, что работах Иванова В. М., Орловича Р. Б., Крицина А. В. [47, 84, 85] используются пары значений одного коэффициента уравнения (3.2) и влажности W для получения линейной зависимости. В данной работе связь параметра A и влажности W может быть принята как линейная зависимость.

Кривые зависимости $K_0(t)$ (рис. 6.9–6.10) удовлетворительно описываются уравнением регрессии при коэффициентах $\alpha = 0,0015$, $\beta = 0,0012$; при этом для влажности $W = 9,8\%$ коэффициент $A = 4,05 \cdot 10^{-6}$, а для влажности $W = 11,2\%$ коэффициент $A = 7,32 \cdot 10^{-6}$.

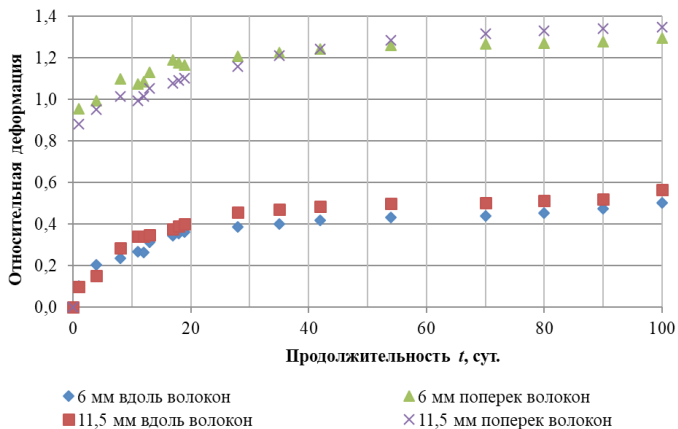


Рис. 6.9. Экспериментальные зависимости относительной деформации ползучести от времени для треугольного штампа в LVL при влажности $W = 9,8\%$

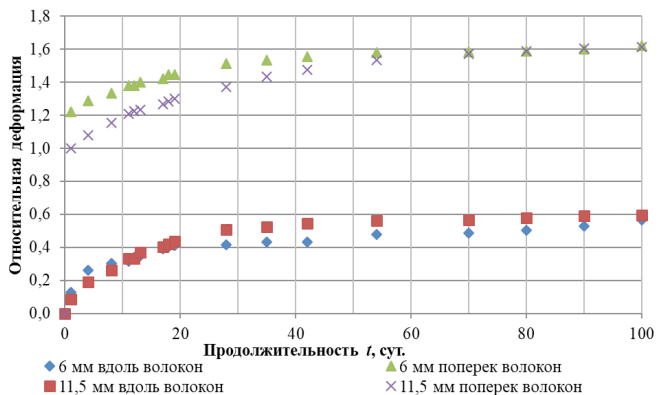


Рис. 6.10. Экспериментальные зависимости относительной деформации ползучести от времени для треугольного штампа в LVL при влажности $W = 11,2\%$

6.2. Определение расчетных характеристик древесины LVL при смятии...

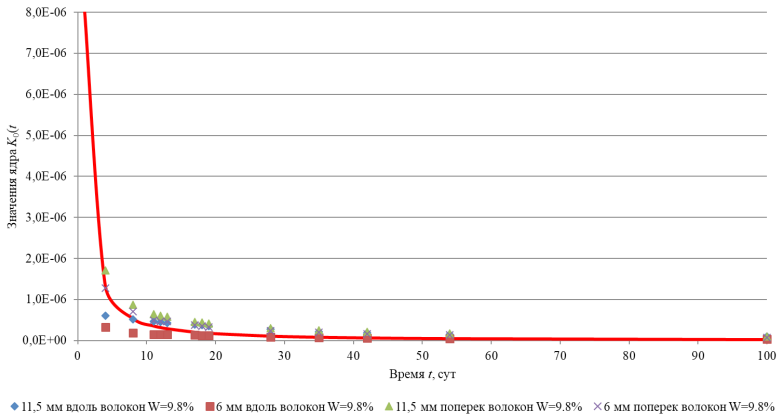


Рис. 6.11. Зависимость ядра интегрального уравнения линейной наследственности от времени для треугольного штампа в LVL при влажности $W = 9,8 \%$

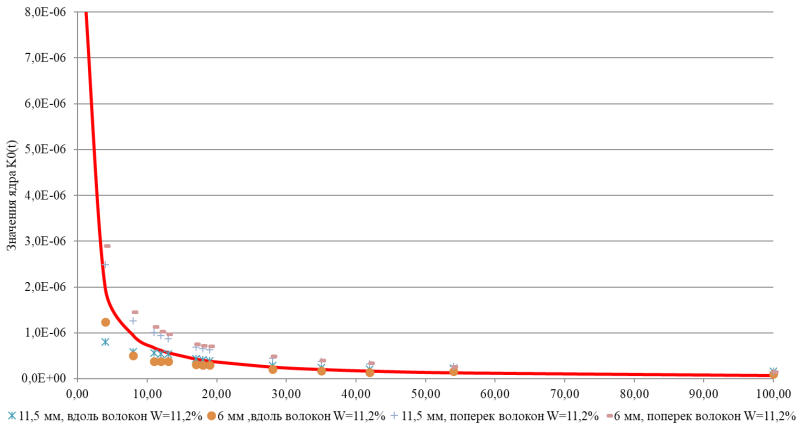


Рис. 6.12. Зависимость ядра интегрального уравнения линейной наследственности от времени для треугольного штампа в LVL при влажности $W = 11,2\%$

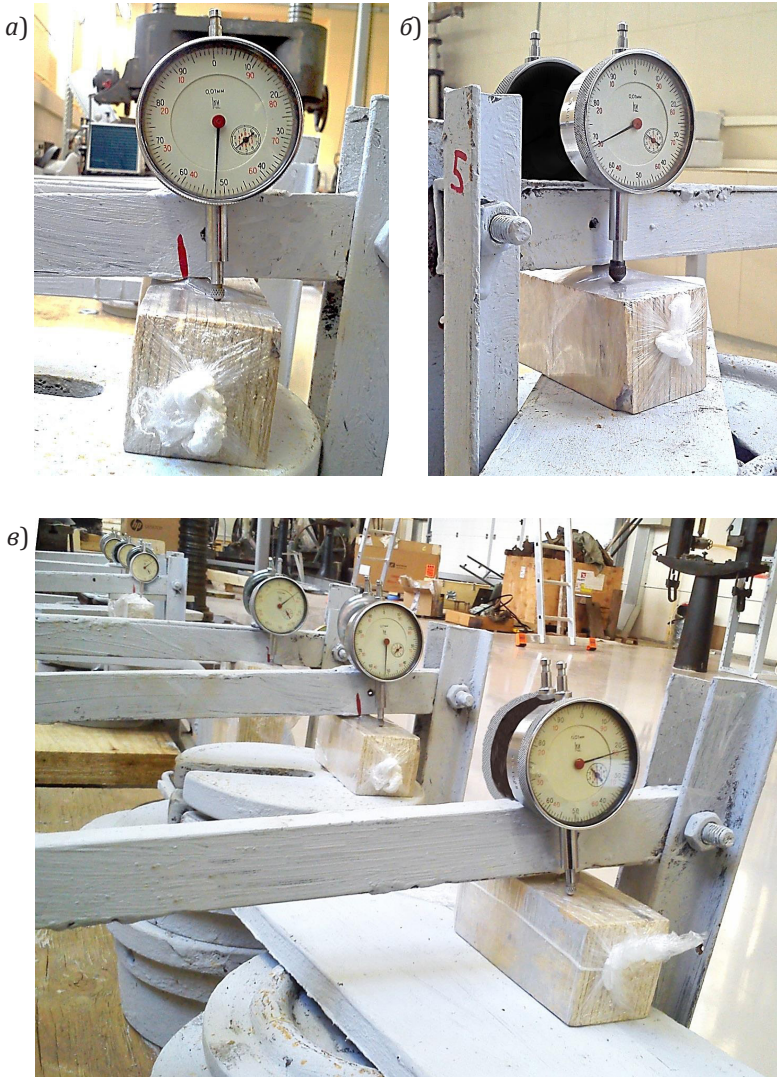


Рис. 6.13. Исследование зависимости высоты треугольного штампа на прочность при смятии и коэффициент постели LVL при действии длительной нагрузки: *а* – штамп высотой $h = 6$ мм, поперек волокон; *б* – штамп высотой $h = 11,5$ мм, вдоль волокон; *в* – общий вид проведения испытаний

Имея пару значений коэффициентов A , соответствующих значениям влажности, возможно описать их взаимосвязь с помощью выражения, которое примет следующий вид:

$$A = 2,32 \cdot 10^{-6} W - 1,88 \cdot 10^{-6}. \quad (6.3)$$

Уравнение зависимости $K_0(t)$ принимает вид:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-0,0012t}}{t^{1-0,0015}}. \quad (6.4)$$

В результате длительных испытаний LVL под действием сжимающего усилия штампа треугольной формы были получены кривые ползучести и ядро мгновенного деформирования $K_0(t)$ для образцов влажностью $W = 9,8\%$ и $W = 11,2\%$ при действии треугольными штампами $h = 6$ мм и $h = 11,5$ мм (для когтевых шайб $\varnothing 50$ мм и $\varnothing 95$ мм). Полученные данные могут быть использованы в уравнениях (6.31), (6.37) (рис. 6.11–6.13).

6.2.3. Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и коэффициент постели LVL при действии кратковременной нагрузки

Эксперименты по определению коэффициента постели при смятии цилиндрическим штампом производятся путем вдавливания стержней различного размера, в соответствии с диаметром нагеля, в бруски толщиной 45 мм из LVL, габариты которых представлены на рис. 6.14 в зависимости от диаметра штампа.

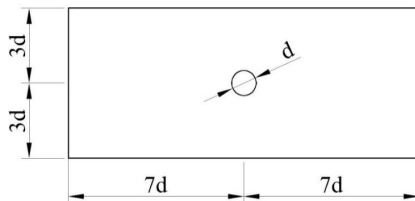


Рис. 6.14. Размеры образцов для определения коэффициента постели при действии цилиндрическим штампом в зависимости от диаметра штампа

Выбранная форма образца принята из предположения, что она является наиболее полно отражающей реальные условия при работе нагельных соединений. Материалом *LVL* был выбран брус *LVL Ultralam-R* [152].

Штампы были изготовлены из используемых для экспериментов главы 7 нагелей диаметрами 12, 14 и 16 мм. На основе предварительных испытаний было выявлено, что при действии нагрузки на нагель не происходит его заметных деформаций, из чего делается допущение о незначительности деформаций штампа, не влияющих на общий результат измерений. В ходе работы было проведено 60 испытаний (6 серий по 10 опытов в каждой).

Передача нагрузки выполнялась с помощью металлических пластин с отверстием для нагеля, располагаемых по краям образца. Это позволило равномерно распределить нагрузку и избежать перекосов в соединении. Также использовался зажим, предотвращающий скольжение металлических пластин по длине нагеля, что гарантировало невозможность раскрытия щели между боковыми металлическими пластинами и брусом *LVL*.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине *Instron 5969*. Образец из *LVL* устанавливался на площадку машины с установкой в него цилиндрического штампа необходимого диаметра и металлических пластин для передачи нагрузки. Загружение проводилось с постоянной скоростью перемещения нагружающего устройства 2 мм/мин так, чтобы предельная нагрузка была достигнута в течении 3 мин от начала испытания. Отсчеты уровня нагрузки и перемещения фиксировались автоматически. Процедура проведения испытаний приведена на рис. 6.15. Для результатов испытаний проведена статистическая обработка данных, которые приведены в табл. 6.8 и 6.9.

В ходе обработки данных эксперимента были получены уравнения регрессии, отражающие зависимость между пределом прочности *LVL* при сжатии по ГОСТ 168483.10–73* [95] и при смятии цилиндрическим штампом $R_{CM}^{BP}/R_{СЖ}^{BP}$ а также между величиной коэффициента постели $C_{CM}^{BP}/R_{СЖ}^{BP}$ и диаметром d для воздействия вдоль и поперек волокон.

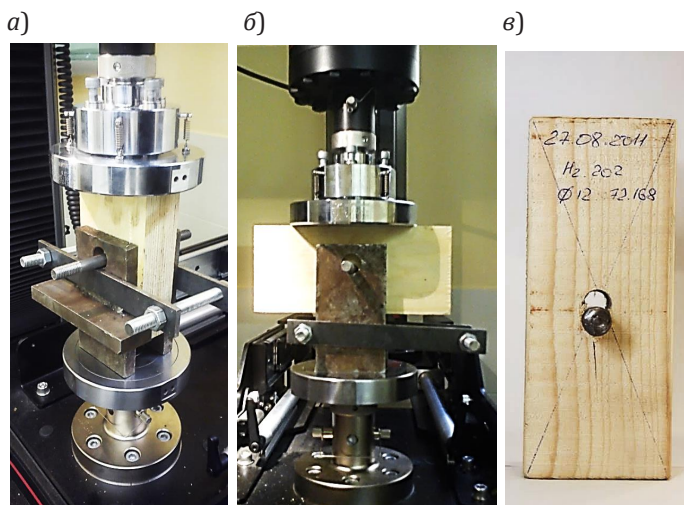


Рис. 6.15. Проведение испытаний: а – образец для смятия вдоль волокон установлен в пресс; б – образец для смятия поперек волокон установлен в пресс; в – образец после испытаний

Таблица 6.8

Экспериментальные значения прочности на сжатие LVL цилиндрическим штампом вдоль и поперек волокон

Среднее значение прочности R_{cp} , МПа	Количество испытаний в серии n , шт.	Среднеквадратичное отклонение S , МПа	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P , %
Прочность LVL на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 12$ мм вдоль волокон				
49,41	10	2,80	5,18	4,53
Прочность LVL на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 12$ мм поперек волокон				
16,43	10	2,82	1,68	9,69
Прочность LVL на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 14$ мм вдоль волокон				
43,09	10	2,77	5,96	14,35

Окончание табл. 6.8

Среднее значение прочности R_{cp} , МПа	Количество испытаний в серии n , шт.	Среднеквадратичное отклонение S , МПа	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P , %
Прочность LVL на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 14$ мм поперек волокон				
19,71	10	1,63	7,64	8,26
Прочность LVL на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 16$ мм вдоль волокон				
38,07	10	1,68	9,69	6,78
Прочность LVL на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 16$ мм поперек волокон				
16,43	10	1,49	8,28	8,70

Таблица 6.9

Экспериментальные значения коэффициента постели LVL при сжатии треугольным штампом вдоль и поперек волокон

Среднее значение коэфф. постели C_{cp} , Н/мм ³	Количество испытаний в серии n , шт.	Среднеквадратичное отклонение S , Н/мм ³	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P , %
Коэффициент постели для LVL при сжатии цилиндрическим штампом $d_H = 12$ мм вдоль волокон				
36,56	10	1,40	3,53	2,65
Коэффициент постели для LVL при сжатии цилиндрическим штампом $d_H = 12$ мм поперек волокон				
10,51	10	1,69	15,26	8,95
Коэффициент постели для LVL при сжатии цилиндрическим штампом $d_H = 14$ мм вдоль волокон				
33,21	10	1,57	4,51	3,15
Коэффициент постели для LVL при сжатии цилиндрическим штампом $d_H = 14$ мм поперек волокон				
10,04	10	1,41	12,90	6,36

Окончание табл. 6.9

Среднее значение коэфф. постели C , Н/мм ³ ср'	Количество испытаний в серии n , шт.	Среднеквадратичное отклонение S , Н/мм ³	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P , %
Коэффициент постели для LVL при сжатии цилиндрическим штампом $d_H = 16$ мм вдоль волокон				
29,23	10	4,39	14,54	7,16
Коэффициент постели для LVL при сжатии цилиндрическим штампом $d_H = 16$ мм поперек волокон				
6,61	10	1,62	22,47	8,02

Графики зависимости напряжения и деформации приведены на рис. 6.16–6.17 для смятия вдоль и поперек волокон при диаметрах $d_H = 12, 14$ и 16 мм.

Напряжения смятия $\sigma_{см}$ были определены по величине прироста деформаций и сведены в один график для разных диаметров отдельно для смятия вдоль и поперек волокон. Это позволило наглядно определить влияние габаритов нагеля на исследуемые характеристики.

Для смятия вдоль волокон:

$$R_{см,0} = (-0,051 d_H + 1,483)R_{сж,0};$$

$$C_0 = (-0,032 d_H + 1,028)R_{сж,0}.$$

Для смятия поперек волокон:

$$R_{см,90} = (-0,109 d_H + 3,29)R_{сж,90};$$

$$C_{90} = (-0,092 d_H + 2,128)R_{сж,90}.$$

Полученные значения коэффициентов постели удовлетворительно согласуются при действии нагрузки вдоль волокон с результатами, полученными Дмитриевым П. А. [38] и ЦНИИСК [76, 77, 78]; при действии поперек волокон результаты сопоставимы с результатами Шешуковой Н. В. [42], что позволяет сделать вывод о близости значений коэффициентов постели цилиндрических штампов при использовании цельной древесины сосны и LVL.

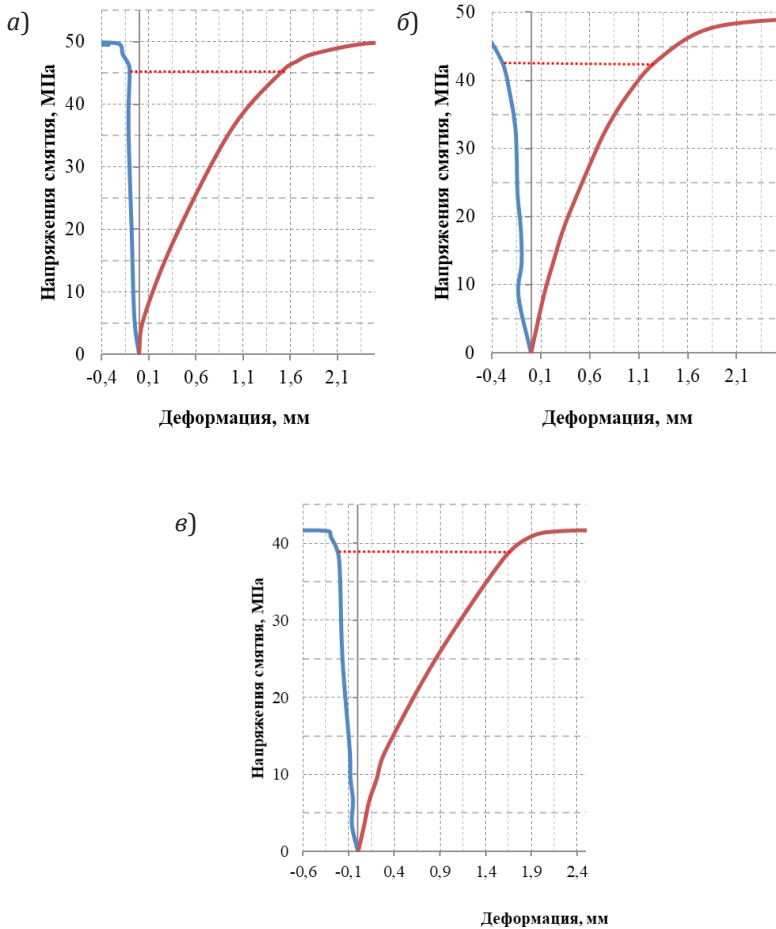


Рис. 6.16. Зависимость деформаций смятия вдоль волокон от напряжения смятия для штампов диаметром d : а) $d_H = 12$ мм; б) $d_H = 14$ мм; в) $d_H = 16$ мм

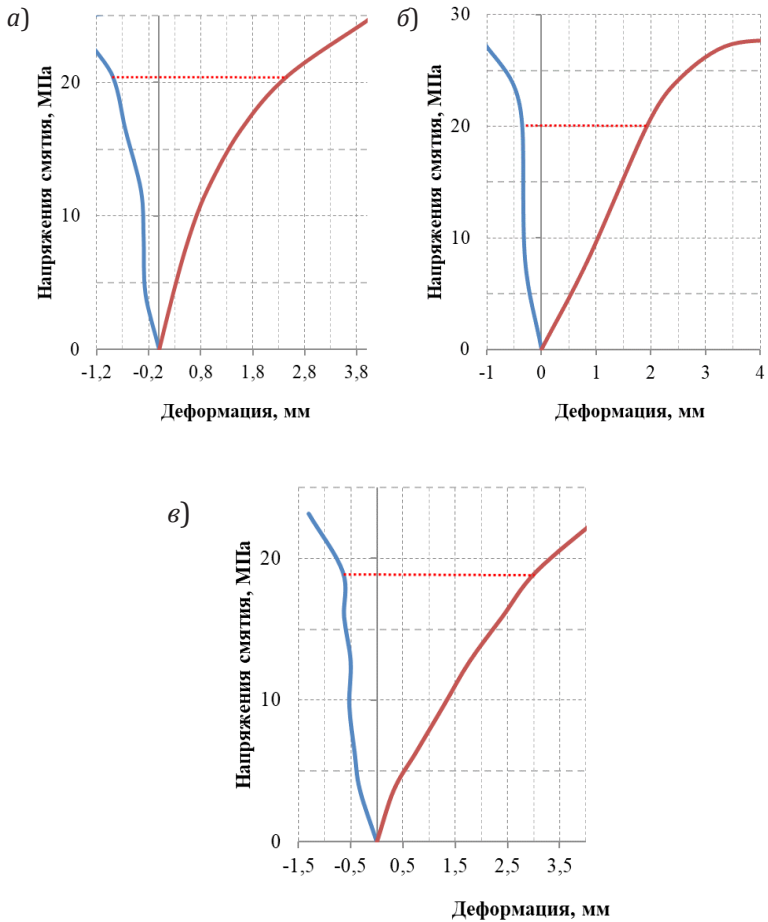


Рис. 6.17. Зависимость деформаций смятия поперек волокон от напряжения смятия для нагеля диаметром d_n : а) $d_n = 12$ мм; б) $d_n = 14$ мм; в) $d_n = 16$ мм

При анализе представленных результатов можно заметить снижение прочности на сжатие цилиндрическим штампом при увеличении диаметра штампа, как для случая сжатия вдоль, так и поперек направления волокон (см. рис. 6.18–6.19). Похожая особенность была замечена при определении коэффициента постели для треугольных штампов, что подтверждает гипотезу о влиянии габаритов штампа на величину предела прочности *LVL* и коэффициент постели.

Полученные уравнения регрессии необходимы при расчете нагельных соединений в конструкциях из клееного однонаправленного бруса *LVL*.

6.2.4. Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и коэффициент постели *LVL* при действии длительной нагрузки

Исследования длительной прочности *LVL* при действии цилиндрическим штампом осуществлялись с помощью вдавливания цилиндрических штампов размерами $d_n = 12$ и 14 мм в образцы, представляющие собой бруски сечением 100×45 мм и длиной вдоль волокон 200 мм из *LVL* с фиксацией прикладываемой нагрузки и соответствующих смещений. Материалом *LVL* был выбран брус *LVL Ultralam-R* [132]. Образцы *LVL* выполнялись из того же материала, что образцы для испытаний с использованием треугольного штампа, поэтому влажность и прочность соответствуют значениям: $W = 11,2\%$ ($R_{сж} = 58,2$ МПа) и $W = 9,8\%$ ($R_{сж} = 62,53$ МПа).

Для проведения испытаний была использована разработанная установка рычажного типа (см. выше), с помощью которой может выполняться приложение неизменной нагрузки в течение длительного периода времени с возможностью отслеживания смещения.

Чтобы зафиксировать влажность древесины первоначальной, образцы были замотаны в стретч-пленку. Это позволило образцам сохранять одинаковую влажность на весь период испытаний.

Величина длительной нагрузки была выбрана равной $R = 0,4R_{max}$ от разрушающего усилия. Всего было проведено

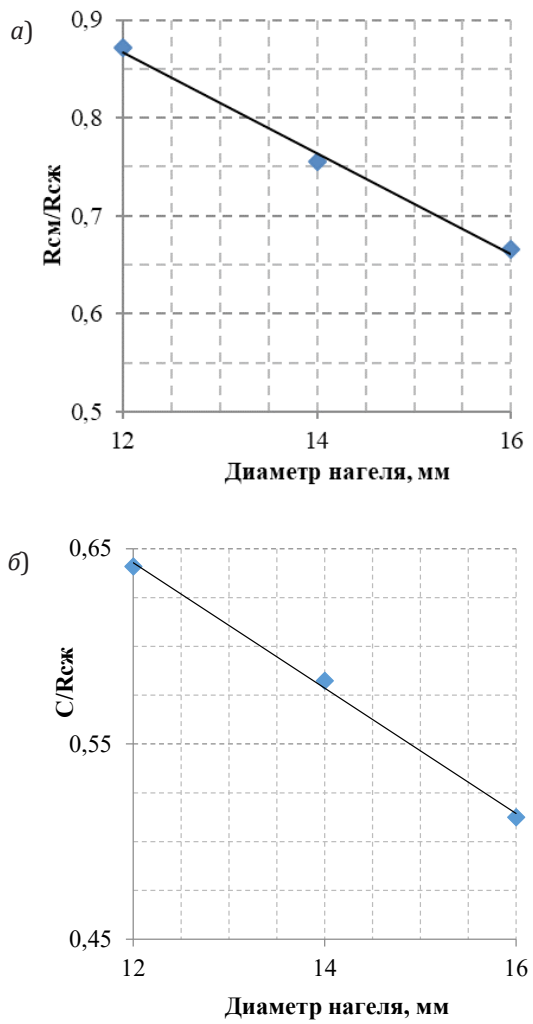


Рис. 6.18. Экспериментальные зависимости: а – между отношением предела прочности LVL при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданном диаметре нагеля; б – между отношением коэффициента постели LVL при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданном диаметре нагеля

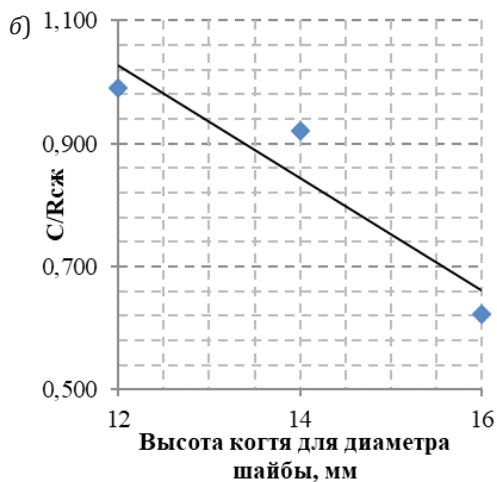
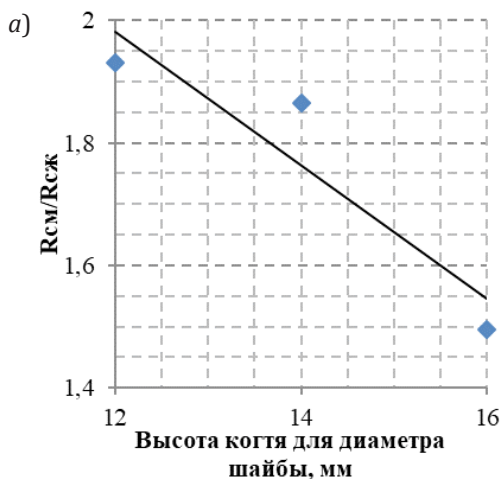


Рис. 6.19. Экспериментальные зависимости: *а* – между отношением предела прочности *LVL* при смятии поперек волокон к пределу прочности при сжатии при заданном диаметре нагеля; *б* – между отношением коэффициента постели *LVL* при смятии поперек волокон к пределу прочности при сжатии при заданном диаметре нагеля

16 испытаний (8 серий по 2 опыта в каждой). Испытания проводились в течение 100 суток. Разгрузка образцов выполнялась 25 суток. После испытаний были построены графики кривых деформирования штампа для различного размера и направления приложения усилия к волокнам. Структура испытаний приведена в табл. 6.10.

Таблица 6.10

Структура испытаний на смятие LVL цилиндрическим штампом от действия длительной нагрузки

Номер серии	1	2	3	4	5	6	7	8
Диаметр штампов d_n , мм	12	14	12	14	12	14	12	14
Влажность W	9,8 %		11,2 %		9,8 %		11,2 %	
Направление волокон	Вдоль волокон				Поперек волокон			
Количество опытов	2 дубликата в серии							
Длительность испытаний t , сут	100							
Уровень нагрузки R	$0,4R_{\max}$							

Для влажности $W = 9,8\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,56 мм, прирост деформаций составил 0,02 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,63 мм, прирост деформаций составил 0,03 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,6 мм, прирост деформаций составил 0,15 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,67 мм, прирост деформаций составил 0,18 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм.

Для влажности $W = 9,8\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,56 мм, прирост деформаций составил 0,02 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,63 мм, прирост деформаций составил 0,03 мм для нагеля

диаметром $d_n = 14$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,6 мм, прирост деформаций составил 0,15 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,67 мм, прирост деформаций составил 0,18 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм.

Для влажности $W = 11,2\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,37 мм, прирост деформаций составил 0,05 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,45 мм, прирост деформаций составил 0,06 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,4 мм, прирост деформаций составил 0,32 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,48 мм, прирост деформаций составил 0,42 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм.

При анализе кривых деформирования можно заметить, что на протяжении всего временного участка испытания (100 сут) кривые ползучести имели затухающий характер, который начинался в среднем на 60-е сутки испытаний, при этом основной прирост деформаций происходил в первые сутки.

Наиболее сильно влияние фактора времени сказывалось для образцов, подверженных действию нагрузки поперек волокон при влажности $W = 11,2\%$, при которой прирост деформаций в среднем составил 82%.

Распределение изменений величин относительной ползучести LVL вдоль и поперек волокон при влажности $W = 11,2\%$ аналогично распределению для древесины сосны.

Для определения ядра мгновенного деформирования $K_0(t)$ применяем уравнение регрессии в виде выражения

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}$$
. Учет влияния влажности W на результаты

исследования производится в использовании коэффициента A аналогично пп. 6.2.2. При аппроксимации кривых

ползучести *LVL* под действием цилиндрического штампа значение коэффициента β было найдено, как $\beta = 0,0025$, для α принято значение $\alpha = 0,102$. Уравнение ядра ползучести принимает вид:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-0,0025t}}{t^{1-0,102}}, \quad (6.5)$$

где A – коэффициент, зависящий от влажности W .

Влияние влажности *LVL* на форму деформирования выражается коэффициентом A и представляет следующую зависимость:

$$A = 1,21 \cdot 10^{-6} W - 1,076 \cdot 10^{-5}. \quad (6.6)$$

В результате длительных испытаний *LVL* под действием сжимающего усилия штампа цилиндрической формы были получены кривые ползучести и ядро мгновенного деформирования $K_0(t)$ для образцов влажностью $W = 9,8\%$ и $W = 11,2\%$ при действии цилиндрическими штампами $d = 12$ и 14 мм (рис. 6.20–6.23).

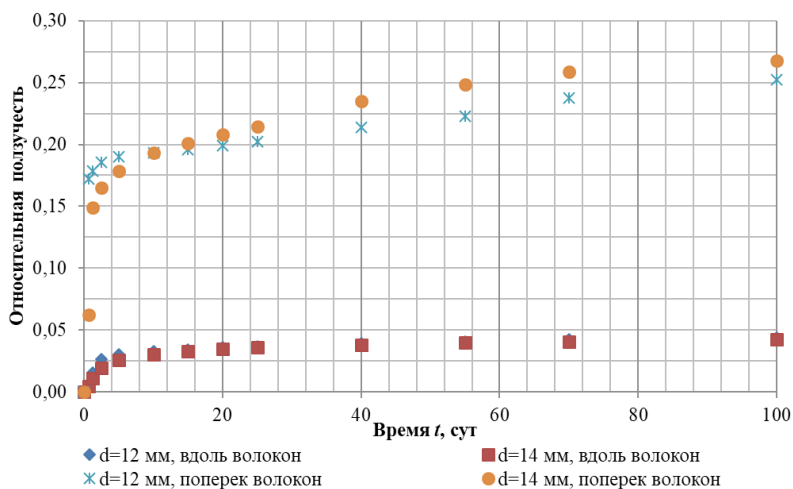


Рис. 6.20. Экспериментальные зависимости относительной ползучести от времени для цилиндрического штампа в *LVL* при влажности $W = 9,8\%$

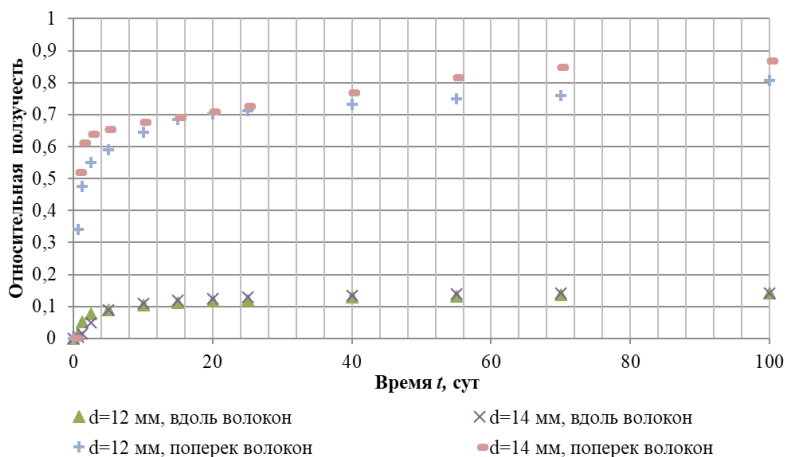


Рис. 6.21. Экспериментальные зависимости относительной ползучести от времени для цилиндрического штампа в LVL при влажности $W = 11,2\%$

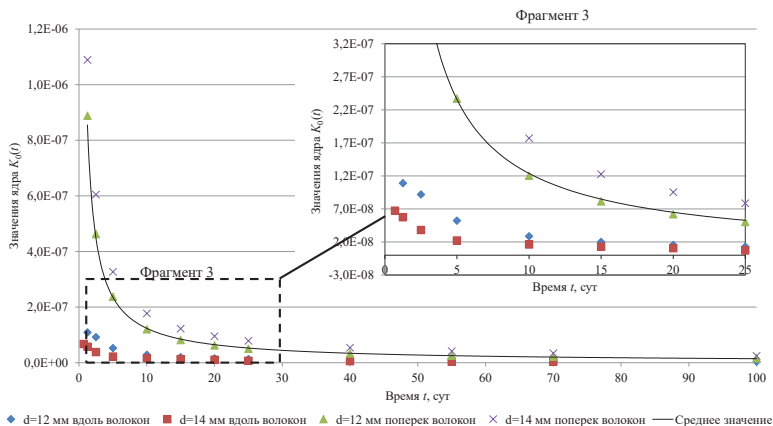


Рис. 6.22. Зависимость ядра интегрального уравнения линейной наследственности от времени для цилиндрического штампа в LVL при влажности $W = 9,8\%$

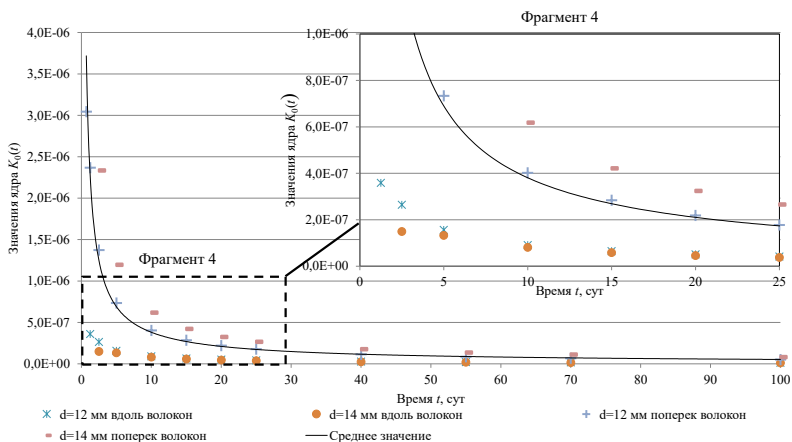


Рис. 6.23. Зависимость ядра интегрального уравнения линейной наследственности от времени для цилиндрического штампа в LVL при влажности $W = 11,2\%$

6.3. Определение прочностных характеристик стали соединителей

На производство когтевых шайб существует европейский нормативный документ стандарт EN 912 [24]. Для изготовления когтевых шайб используется низкоуглеродистая сталь с холоднокатаным покрытием (без покрытия). Материал тела шайбы должен соответствовать типам сталей DC01+C390 по EN 10139 [114] или холоднокатанной высокопрочной стали для холодной штамповки H320M по EN 10268 [115].

Для производства нагелей для деревянных конструкций, как правило, используется конструкционная углеродистая сталь A240 обыкновенного качества (Ст3сп по ГОСТ 380–94 [116]).

Для определения предела текучести и модуля упругости сталей были проведены испытания на растяжение по ГОСТ 1497–84 [97] и ГОСТ 11701–84 (рис. 6.24) [118]. Для когтевой шайбы образцы были вырезаны из тела когтевой шайбы $\varnothing 140$ мм. Для нагелей образцы были изготовлены из стали,

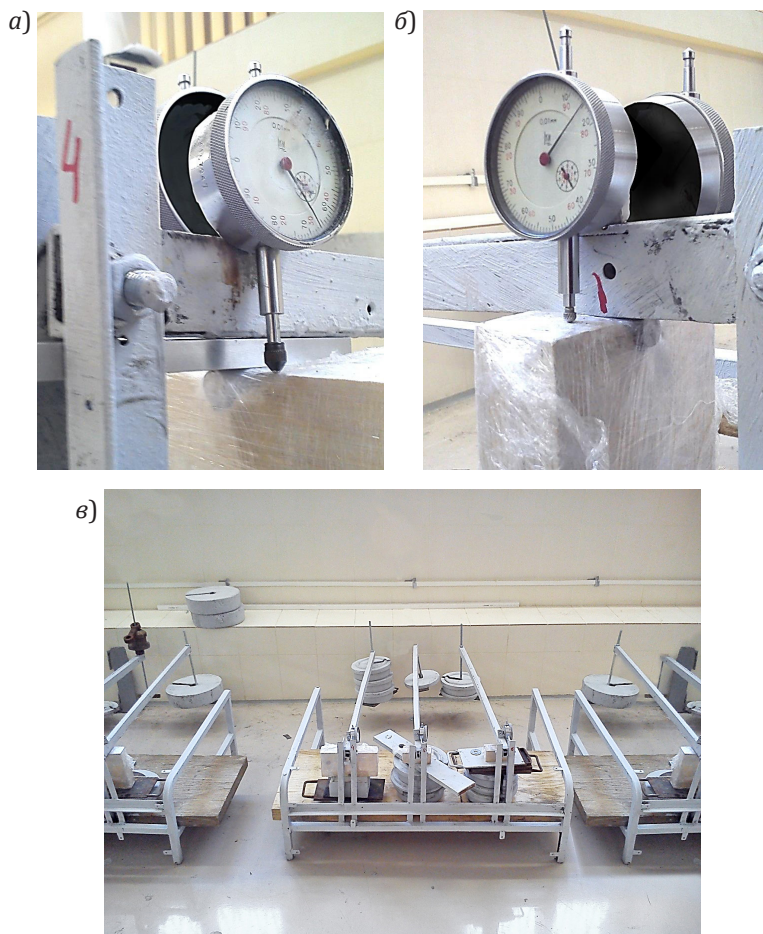


Рис. 6.24. Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и коэффициент постели LVL при действии длительной нагрузки: а – штамп диаметром $d = 14$ мм, поперек волокон; б – штамп диаметром $d = 12$ мм, вдоль волокон; в – общий вид проведения испытаний

идентичной той, что используется при испытаниях соединений в главе 7. Испытания проводились на испытательных машинах *Instron 5969* и *Instron 5989*. Снятие по приборам

информации о перемещении и уровне нагрузке фиксировалось в автоматическом режиме. Программное обеспечение испытательной машины позволило получить график зависимости между напряжением в материале и его перемещениями. Размеры образцов приведены на рис. 6.25 и 6.27.

Модуль упругости для образцов был определен как среднее значение нескольких ступеней загрузки в области упругой работы материала. Предел текучести был определен по диаграммам растяжения согласно ГОСТ 1497–84. Результаты испытаний приведены в табл. 6.11 и 6.12. Усредненные диаграммы работы материалов на растяжение приведены на рис. 6.26 и 6.28.

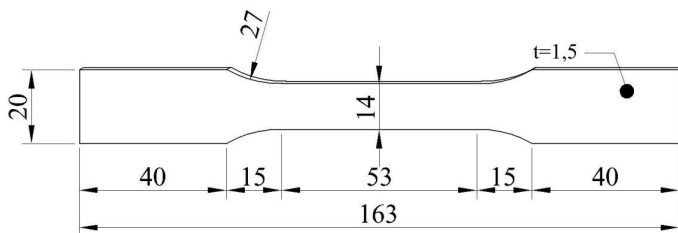


Рис. 6.25. Размеры образцов для испытания стали когтевых шайб на растяжение

Таблица 6.11

Результаты испытания стали когтевой шайбы

Образец №	Ширина b_0 , мм	Толщина, t , мм	Площадь расчетного сечения, мм ²	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа
1	14,24	1,51	21,502	470,599	397,537	199565
2	14,47	1,5	21,705	477,448	402,903	193768
3	13,13	1,54	20,22	445,001	374,081	210032
4	14,38	1,49	21,426	458,224	395,684	212350
5	14,18	1,54	21,837	451,065	368,912	201251
Средние значения				460,467	387,823	203393

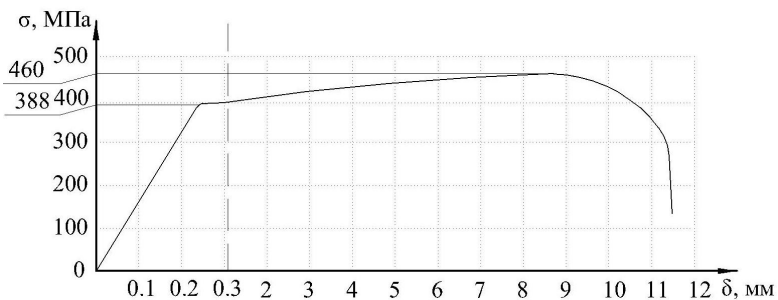


Рис. 6.26. Усредненная диаграмма работы стали когтевой шайбы на растяжение

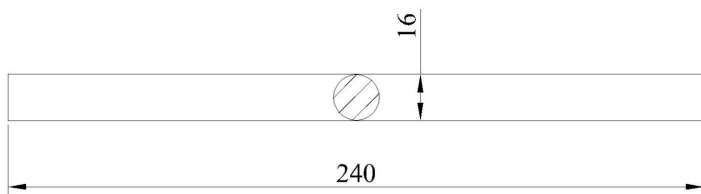


Рис. 6.27. Размеры образцов для испытания стального нагеля на растяжение

Таблица 6.12

Результаты испытания стального нагеля

Образец №	Диаметр d , мм	Площадь расчетного сечения, мм ²	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа
1	15,7	193,593	310,82	278,31	213705
2	15,6	191,135	310,00	279,48	202053
3	15,8	196,067	297,62	272,81	210321
4	15,8	196,067	311,28	271,04	204560
5	15,7	193,593	312,65	280,35	209434
Средние значения			308,47	276,40	208014

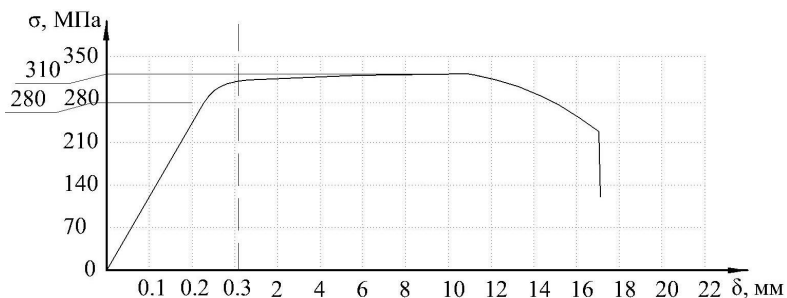


Рис. 6.28. Усредненная диаграмма работы стального нагеля на растяжение

При холодной штамповке когтевых шайб возникает некоторое изменение прочностных свойств материала стали (рис. 6.29, 6.30). В месте основания когтя шайбы имеет место некоторое упрочнение, которое необходимо учитывать при расчете когтей шайбы на изгиб. Для определения коэффициента упрочнения металла n при холодной штамповке когтевых шайб было проведено испытание, для чего было

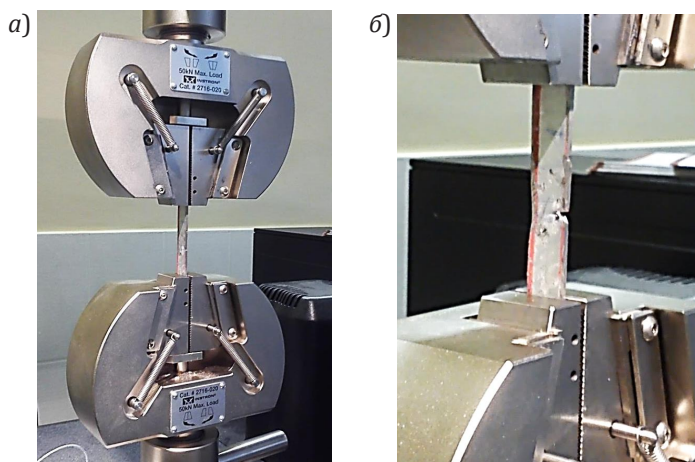


Рис. 6.29. Определение прочностных характеристик стали когтевой шайбы: а – закрепление образца в щечках испытательной установки; б – разрушение образца

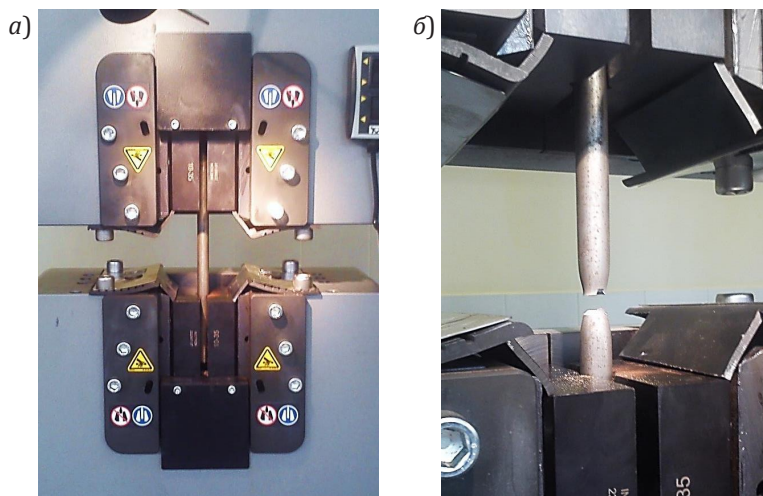


Рис. 6.30. Определение прочностных характеристик стального нагеля: а – закрепление образца в щечках испытательной установки; б – разрушение образца

необходимо изготовить испытуемый коготь из стали марки *DC01+C390* по *EN10139* [114] или *H320M* по *EN10268* [115] с геометрическими размерами, соответствующими зубцам выбранного типа когтевой шайбы. В связи с дефицитностью данной марки стали было принято решение использовать в качестве образца коготь предварительно подготовленной самой шайбы диаметрами $d = 50, 95$ и 117 мм. Для этого все когти (кроме одного) были выпрямлены таким образом, чтобы обеспечить удобное опирание полосы с когтем 3 в жесткое основание 1 через прорезь 4 (см. рис. 6.31) и обеспечивать надежное закрепление в захватах 2 испытательной машины. Минимальное количество образцов каждого диаметра было принято 5 штук.

Для проведения испытания применялась следующая аппаратура: универсальная машина *Instron 5969*, обеспечивающая заданную скорость перемещения нагружаемой головки $0,5$ мм/мин и позволяющая измерять нагрузку с погрешностью не более 1%; приспособление (кондуктор),

обеспечивающее необходимое опирание когтя в жесткое основание; штангенциркуль с погрешностью измерения не более 0,01 мм. Испытание продолжалось до разрушения образца с определением максимального показания стрелки силоизмерителя. Максимальная нагрузка P_{\max} определялась с погрешностью не более 1 %.

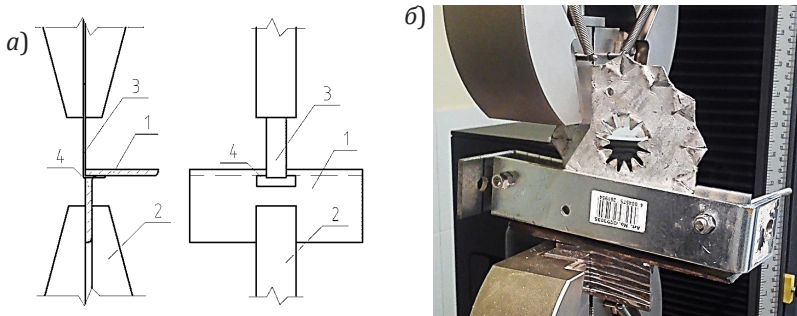


Рис. 6.31. Схема испытания для определения коэффициента упрочнения n для стали шайбы: а) 1 – равнополочный уголок 50×5 мм; 2 – захват испытательной машины; 3 – полоса с когтем; 4 – прорезь для когтя в равнополочном уголке; б) образец во время испытания

Момент, действующий на сечение в основании когтя, будет найден как произведение максимального усилия и плеча c_{Δ} , с которым будет передаваться нагрузка:

$$M = P_{\max} c_{\Delta}, \quad (6.24)$$

где c_{Δ} – плечо передачи нагрузки P_{\max} к основанию когтя, которое принимается как $c_{\Delta} = h/3$, мм;

h – величина высоты когтя, мм.

Для определения коэффициента упрочнения металла n необходимо сравнить значения момента M , действующего на сечение, при котором фактически образуется пластический шарнир со значением $M_{\text{пл}}$, рассчитанным по формулам:

$$M_{\text{пл}} = R_u W_{\text{пл}}; \quad R_u = \sigma_{\text{тек}} n; \quad W_{\text{пл}} = S_{\text{пл}}^B + S_{\text{пл}}^H, \quad (6.25-6.27)$$

где R_u – расчетное сопротивление когтя шайбы с учетом упрочнения металла при штамповке, МПа;

$W_{пл}$ – пластический момент сопротивления сечения зуба, мм³;

$\sigma_{тек}$ – предел текучести материала стали когтя шайбы, принимаемый 390 МПа;

$S_{пл}^в, S_{пл}^н$ – статические моменты сопротивления верхней и нижней частей сечения относительно пластической нейтральной оси, мм³.

Результаты эксперимента приведены в табл. 6.13, причем здесь указаны средние значения для пяти образцов для каждого размера когтя шайбы.

Таблица 6.13

Результаты определения коэффициента упрочнения металла n при холодной штамповке

$h, \text{ мм}$	Результат эксперимента			Результат расчета по формулам (5.47–5.49)			n
	$P_{max}, \text{ Н}$	$c_{\Delta}, \text{ мм}$	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$\sigma, \text{ МПа}$	$W, \text{ мм}^3$	$M_{пл}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	
6 (для $d = 50 \text{ мм}$)	722	2	1444	390	3	1170	1,234
11,5 (для $d = 95 \text{ мм}$)	1359	3,833	5209,5		10,935	4264,65	1,222
15 (для $d = 117 \text{ мм}$)	1734	5	8670		16,875	6581,25	1,317
Среднее							1,258

В ходе испытаний стали соединителей с округлением по ГОСТ 1497–84 [97] было выяснено, что предел текучести $\sigma_{тек}$ для когтевых шайб составил 390 МПа, для нагелей 620 МПа, модуль упругости E принят 203000 МПа для когтевых шайб и $E = 208000$ МПа для нагелей. Также был получен

коэффициент упрочнения стали при холодной штамповке n , определенный из испытаний, принимаемый $n = 1,258$. Полученные данные используются в дальнейшем для решения уравнений (6.31), (6.37).

6.4. Приведение параметров к расчетным значениям

В результате экспериментальных исследований определены необходимые для расчётов характеристики материалов.

Для стали когтевой шайбы расчетное сопротивление изгибу принимается $R_u = \sigma_t \cdot n = 390 \cdot 1,258 = 490,62$ МПа, модуль упругости принимается $E = 203000$ МПа.

Для стального нагеля расчетное сопротивление изгибу принимается $R_u = 280$ МПа, модуль упругости принимается $E = 208000$ МПа.

Средние временные сопротивления LVL и коэффициентов постели при различных углах приложения нагрузки и форм штампов представлены в табл. 6.14.

Таблица 6.14

Средние временные сопротивления LVL и коэффициентов постели при различных углах приложения нагрузки и форм штампов

Направление приложения нагрузки	Для когтя шайбы	Для нагеля
Вдоль волокон	$R_{см,вр_0} = (-0,005h + 0,993)R_{сж,0};$ $C_{вр_0} = (-0,016h + 3,103) R_{сж,0}$	$R_{см,вр_0} = (-0,051d + 1,483)R_{сж,0};$ $C_{вр_0} = (-0,032d + 1,028) R_{сж,0}$
Поперек волокон	$R_{см,вр_{90}} = (-0,054h + 2,993)R_{сж,90};$ $C_{вр_{90}} = (-0,216h + 5,774) R_{сж,90}$	$R_{см,вр_{90}} = (-0,109d + 3,29)R_{сж,90};$ $C_{вр_{90}} = (-0,092d + 2,128) R_{сж,90}$
Под углом α к волокнам	$R_{см,\alpha}^{вр} = \frac{R_{см,0}^{вр}}{1 + \left(\frac{R_{см,0}^{вр}}{R_{см,90}^{вр}} - 1\right) \sin^2 \alpha};$	$C_{см,\alpha}^{вр} = \frac{C_{см,0}^{вр}}{1 + \left(\frac{C_{см,0}^{вр}}{C_{см,90}^{вр}} - 1\right) \sin^2 \alpha}$

Здесь $R_{см}^{вр_0}$ – среднее значение временных сопротивлений *LVL* сжатию вдоль волокон при влажности 12%, принимаемое 57,04 МПа из испытаний;

$R_{см}^{вр_{90}}$ – среднее значение временных сопротивлений *LVL* сжатию поперек волокон при влажности 12%, принимаемое 10,60 МПа из испытаний;

α – угол по отношению к нормали сминающей стороны когтя и направление волокон, градус;

h – высота когтя шайбы, мм;

d – диаметр нагеля, мм.

Переход к расчетным характеристикам длительной прочности $R_{дл,\alpha}$ и нормативным значениям коэффициента постели C_α^H может быть выполнен следующим образом:

$$R_{дл,\alpha} = R_{вр,\alpha} (1 - 2,33v)m_{дл}; \quad (6.28)$$

$$C_\alpha^H = C_{вр,\alpha} (1 - 1,65v)m_{дл}, \quad (6.29)$$

где v – коэффициент вариации сопротивления древесины при местном смятии;

$m_{дл}$ – коэффициент учета длительности загрузки.

Данные прочностные и жесткостные характеристики материалов используются для расчета соединений деревянных конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами.

6.5. Выводы по главе

1. Найдены временные прочностные характеристики материала *LVL*. Для влажности $W = 12\%$ прочность на сжатие вдоль волокон составила $R_{см}^{вр_0} = 57,04$ МПа, прочность на сжатие поперек волокон $R_{см}^{вр_{90}} = 10,60$ МПа, модуль упругости $E = 14000$ МПа.

2. Разработана методика определения взаимосвязи между пределами прочности *LVL* при сжатии $R_{сж,\alpha}$ и коэффициентами постели C_α при смятии штампами треугольных и цилиндрических форм, и габаритами штампов.

3. Подтверждена гипотеза о влиянии габаритов штампа на величину предела прочности *LVL* и коэффициент постели. Найдена взаимосвязь между пределами прочности *LVL*

при сжатии $R_{сж.α}$ и коэффициентами постели $C_α$ при смятии штампами треугольных и цилиндрических форм, а также размерами h и d штампов. При увеличении габаритов штампа происходит снижение прочности на сжатие $R_{сж.α}$ и уменьшается коэффициент постели $C_α$ для любого направления волокон.

4. Получены кривые ползучести и найдено ядро мгновенного деформирования $K_0(t)$, отражающее характер ползучести материала *LVL* при воздействии цилиндрическим и треугольным штампом при длительной нагрузке. Установлено и количественно выявлено влияния влажности *W* на ползучесть материала *LVL*.

5. Получены значения прочностных и жесткостных характеристик материалов. Для стали когтевой шайбы расчетное сопротивление изгибу $R_u = 490,62$ МПа, модуль упругости $E = 203000$ МПа. Для стали нагеля расчетное сопротивление изгибу $R_u = 280$ МПа, модуль упругости $E = 208000$ МПа. Коэффициент упрочнения стали при холодной штамповке n был определен из испытаний и принят $n = 1,258$.

Глава 7. Исследование НДС соединений и конструкций из однонаправленного клееного бруса с когтевыми шайбами

Проведение испытаний соединений с использованием когтевых шайб обусловлено необходимостью апробации предлагаемой методики расчета, путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

7.1. Действие на соединение осевого усилия

7.1.1. Исследование соединений фиксированной толщины элементов

В поясах конструкций часто встречаются соединения, подверженные только растягивающему или сжимающему усилиям. При возникновении малого изгибающего момента и поперечного усилия, ими можно пренебречь.

Для изучения воздействия на соединение продольного усилия ранее проводились исследования [129]. Испытаниями учитывались воздействия сдвигающего усилия при различных диаметрах когтевых шайб и нагеля. Испытания проводились в виде двусрезных соединений с установленной парой когтевых шайб и одним нагелем с гайками и без. Использование одного нагеля аргументировано попаданием нагелей в различные слои древесины по прочности, что влечёт за собой различные деформации нагеля при одном и том же среднем значении деформаций древесины.

Для изучения воздействия продольного усилия на соединение с элементами из *LVL* было произведено несколько серий испытаний двусрезных соединений. Характеристики испытаний приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Характеристики проводимых испытаний

Характеристика соединения	Номер подгруппы испытаний:		
	1	2	3
Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 0^\circ$			
Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш}$, мм	50	95	117
Диаметр нагеля $d_{н}$, мм	12	16	20
Толщина элементов t , мм	45	45	45
Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 90^\circ$			
Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш}$, мм	50	95	117
Диаметр нагеля $d_{н}$, мм	12	16	20
Толщина элементов t , мм	45	45	45

Форма и размеры образцов приняты согласно конструктивным требованиям к соединениям деревянных элементов, выполненных с использованием когтевых шайб и нагелей. Образцы выполнялись в двусрезном исполнении с учетом необходимых требований [23, 59, 71], и в образце был использован один нагель для возможности сопоставления с результатами проводимых ранее экспериментов.

Для изготовления образцов использовался материал *LVL Ultralam* [152] толщиной 45 мм. В качестве когтевых шайб использовались двухсторонние зубчато-кольцевые пластины типа *C1* [54], диаметрами 50, 95 и 117 мм производства компании *Simpson*. В качестве нагелей использовались гладкие стальные шпильки диаметрами 12, 16 и 20 мм по ГОСТ 9066–75 с гайками и шайбами. Размеры образцов представлены на рис. 7.1–7.3.

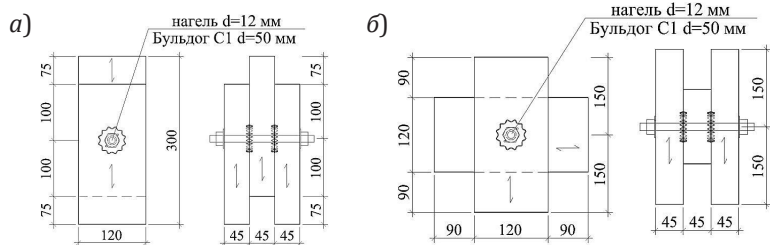


Рис. 7.1. Размеры образцов для 1-го типа испытаний для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов:
 а - при $\alpha = 0^\circ$; б - при $\alpha = 90^\circ$

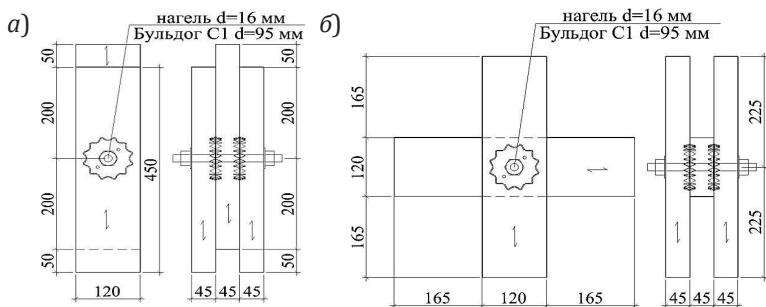


Рис. 7.2. Размеры образцов для 2-го типа испытаний для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов:
 а - при $\alpha = 0^\circ$; б - при $\alpha = 90^\circ$

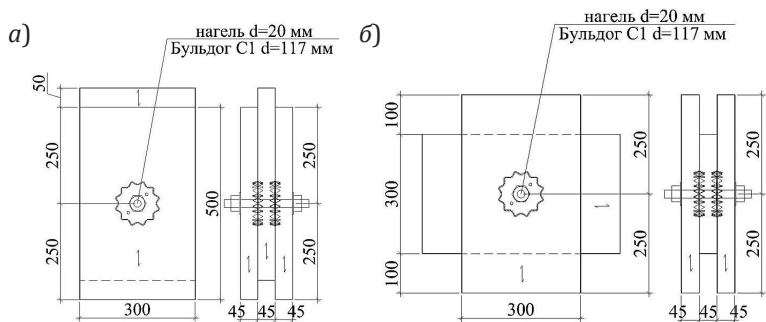


Рис. 7.3. Размеры образцов для 3-го типа испытаний для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов:
 а - при $\alpha = 0^\circ$; б - при $\alpha = 90^\circ$

Первая серия испытывалась при действии нагрузки вдоль волокон для всех элементов. Всего было испытано 9 образцов (3 дубликата для 3-х типов испытаний). Вторая серия была выполнена при действии нагрузки на средний элемент, повернутый на угол $\alpha = 90^\circ$ к направлению волокон крайних элементов. Толщина элементов *LVL* принята $t = 45$ мм. Было испытано 9 образцов (3 дубликата для 3-х типов испытаний) (рис. 7.4, 7.5).

Перед испытаниями к образцам были прикреплены металлические пластины во избежание поворота элементов относительно друг друга. Для измерения деформаций к образцам с противоположных сторон предварительно были прикреплены индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Прикрепление индикаторов и упоров для штифтов к древесине производилось при помощи шурупов. Для измерения вертикального смещения среднего элемента относительно крайних индикаторы были установлены так, чтобы под нагрузкой они выдвигались из корпуса, что исключило возможность повреждения датчиков и дало возможность оставить их на образце до его разрушения.

Проведение испытаний выполнялось согласно существующим рекомендациям [49]. При испытании образцов на сжатие вдоль волокон нагрузка передавалась через стальную распределительную призму испытательной машины, установленную над средним элементом и фиксирующую точку приложения сжимающего усилия. При испытании образцов на сжатие поперек волокон нагрузка передавалась через стальную призму, установленную под рабочим органом испытательной машины на средний элемент образца.

До приложения первоначальной ступени нагрузки записывались начальные показания индикаторов перемещений. Испытания на сжатие проводились ступенчато, с постоянной ступенью загрузки, определяемой в ходе пробных экспериментов и принимаемой как 0,1 ед. от максимального разрушающего значения N_d . Нагрузка передавалась универсальной испытательной машиной *Instron*

5989. После каждой ступени загрузки производилась разгрузка до значения, равного $0,1N_d$. По достижении каждой ступени нагрузка выдерживалась в течение 30 с и с индикаторов снимались показания смещений. По окончании испытаний индикаторы демонтировались и производилась полная разборка образцов. После испытаний из элементов вырезались образцы для определения физико-механических свойств материала, при этом влажность составила $W = 12,1\%$, прочность на сжатие вдоль волокон составила $R_{сж} = 56,3$ МПа.

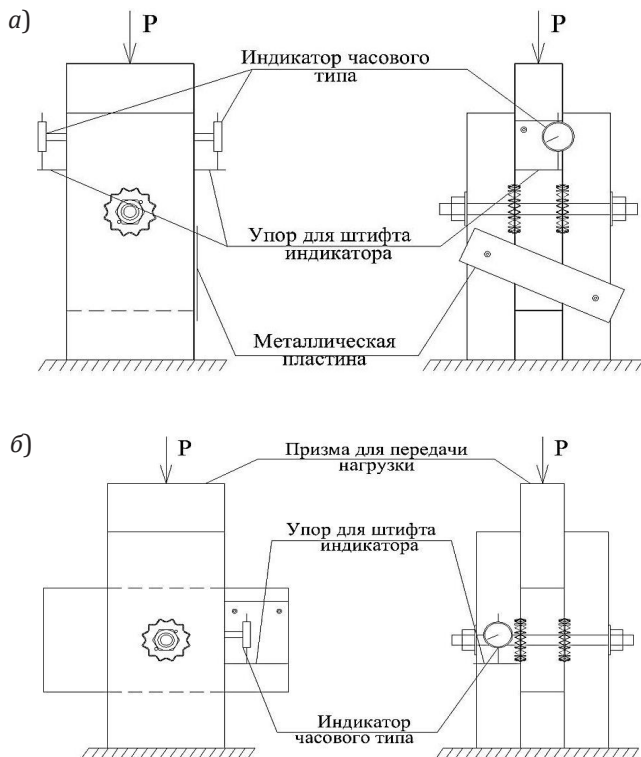


Рис. 7.4. Схема проведения испытаний на сжатие для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов: а - при $\alpha = 0^\circ$; б - при $\alpha = 90^\circ$

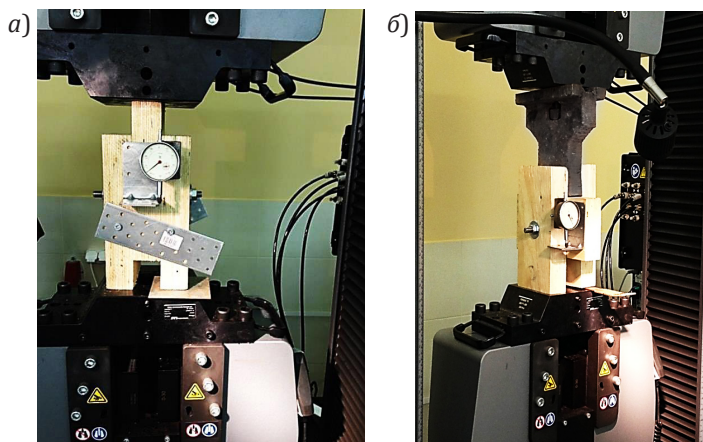


Рис. 7.5. Испытание образцов на сжатие для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов:
а- при $\alpha = 0^\circ$; б- при $\alpha = 90^\circ$

По результатам испытаний были построены кривые зависимости смещения от прикладываемой нагрузки, представленные на рис. 7.7. Также на этих графиках приведены значения расчетной несущей способности, посчитанные с применением предлагаемой методики расчета и используя методику расчета СтАДД 3.2-2011 и *EuroCode 5* [23, 59]. Методики расчета, предлагаемые в данной работе, подразумевают ограничение нагрузки, исходя из условий (5.21).

Результаты расчетов из условия достижения предельного смещения, равного 2 мм, представлены на рис. 7.6, 7.7 как линия «1», результаты при достижении напряжений смятия в древесине обозначены как линия «2». Из графиков видно, что линия «2» повторяет характер изменения экспериментальных кривых деформирования достаточно адекватно, что обосновывает рассмотрение результатов расчетов с использованием всех ограничительных условий (5.21–5.22) совместно друг с другом.

Результаты определения максимальных $N_{\text{разруш}}$ для теории и эксперимента приведены в табл. 7.2. Средняя разница в результатах составила 14 %.

Таблица 7.2

Линейная жесткость испытанных соединений

Угол приложения нагрузки к волокнам α , град.	Диаметр когтевой шайбы $d_{кш}$, мм	Диаметр нагеля, $d_{наг}$, мм	Экспериментальные значения $N_{разруш}$, кН	Теоретические значения $N_{разруш}$, кН	Отклонение теоретических и экспериментальных значений
0	50	12	39,55	23,35	40,96%
	95	16	71,61	66,5	7,14%
	117	20	88,20	81,78	7,28%
90	50	12	31,53	24,95	20,87%
	95	16	71,31	62,75	12,00%
	117	20	78	83,95	-7,63%

Анализируя результаты экспериментальных исследований (рис. 7.6, 7.7), было определено значительное снижение величины отношения экспериментальной и расчетной теоретической нагрузки $N_{I-II \text{ эксп.}}/N_{I-II \text{ теор.}}$, из чего можно сделать вывод о влиянии фактора толщины на исследуемые параметры прочности соединений с когтевыми шайбами. Это может быть объяснено тем фактом, что при прорезании волокон когтями шайбы возникает некоторое ослабление соединения, которое влечет снижение его несущей способности. Для деревянных элементов значение минимальных возможных толщин элементов нормируется, как $t_{\min} = 2,25 h_e$, где за h_e принимается высота когтя шайбы в существующих методиках проектирования когтевых шайб [23, 59]. При этом указывается, что заметного изменения несущей способности когтевой шайбы не будет происходить при увеличении толщины элементов при $t_{\min} \geq 5 h_e$. Предлагаемая методика расчета соединений на когтевых шайбах в данной работе учитывает снижение несущей способности когтевой шайбы при изменении толщин элементов соединения в пределах толщин при $t < 5 h_e$.

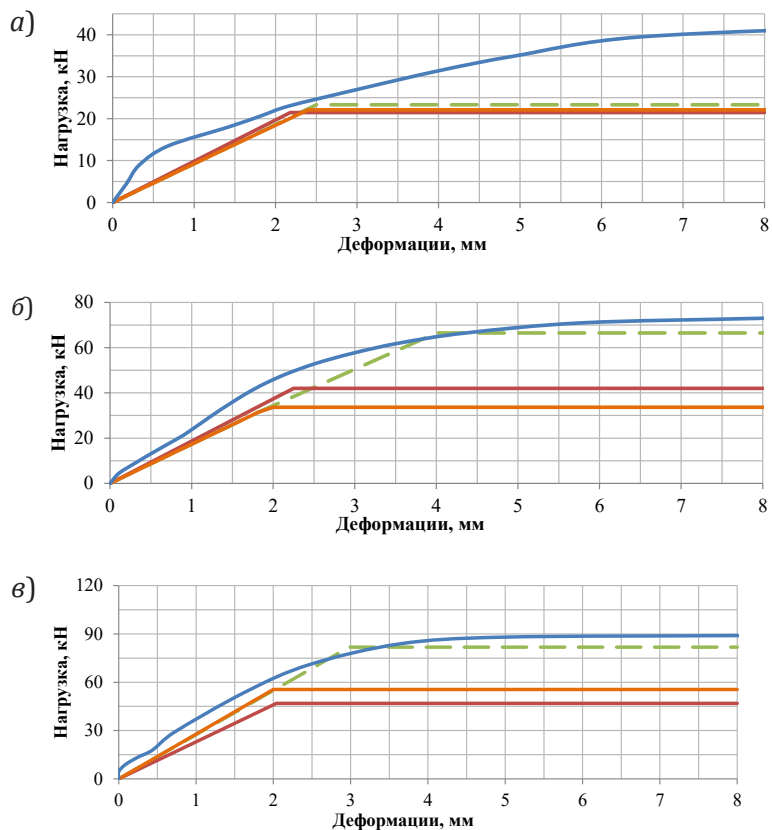


Рис. 7.6. Теоретические и экспериментальные диаграммы деформирования для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 0^\circ$ при диаметре когтевой шайбы $d_{к.ш}$ и диаметре нагеля d_H : а) $d_{к.ш} = 50$ мм, $d_H = 12$ мм; б) $d_{к.ш} = 95$ мм, $d_H = 16$ мм; в) $d_{к.ш} = 117$ мм, $d_H = 20$ мм

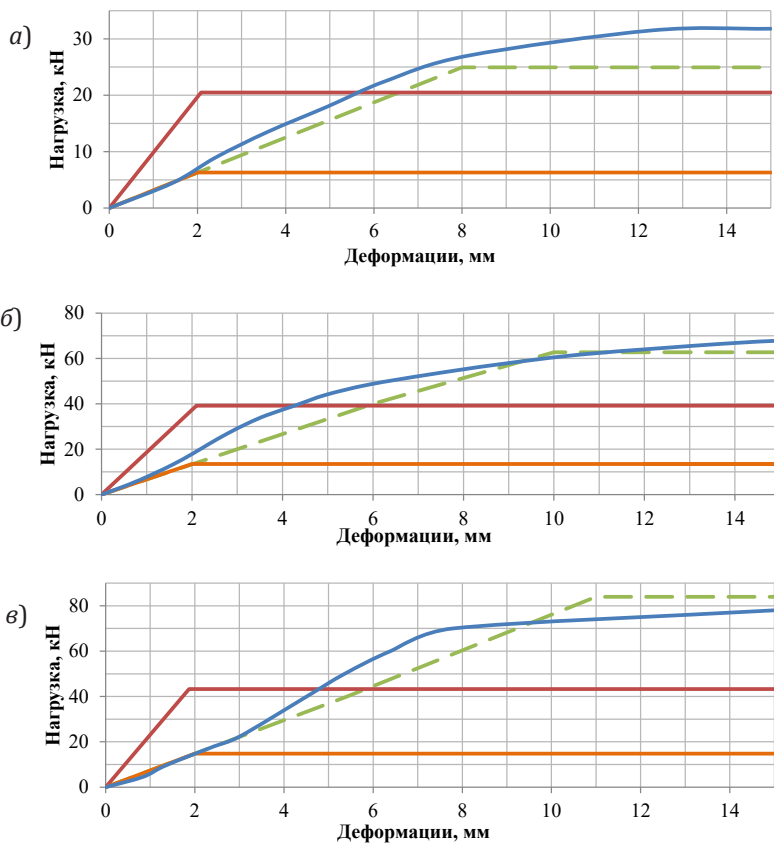


Рис. 7.7. Теоретические и экспериментальные диаграммы деформирования для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 90^\circ$, при диаметре когтевой шайбы $d_{к.ш}$ и диаметре нагеля d_H : а) $d_{к.ш} = 50$ мм, $d_H = 12$ мм; б) $d_{к.ш} = 95$ мм, $d_H = 16$ мм; в) $d_{к.ш} = 117$ мм, $d_H = 20$ мм

В ходе анализа результатов теоретических расчетов были определены значения линейной жесткости K для узлов с разными значениями диаметра нагеля и когтевой шайбы и фиксированной толщине элементов LVL (45 мм) при действии нагрузки вдоль и поперек волокон. Данные значения приведены в табл. 7.3. Они определялись в зоне упругих деформаций и используются в предлагаемой методике для определения перемещений элементов узлов.

Для апробации предлагаемой методики определения жесткостных характеристик узлов соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами необходимо проверить полученные значения для испытанных узлов и для рассчитанных по предлагаемой методике. Для этого были получены жесткости для различных вариантов использования диаметров нагелей (12, 16, 20 мм) и когтевых шайб (50, 75, 117 мм).

При известной зависимости линейной жесткости в соединениях с когтевыми шайбами в LVL для любых заданных значений (из выбранного диапазона) можно произвести интерполяцию зависимостей линейной жесткости K от факторов, находящихся в промежуточных значениях диаметров нагелей $d_{нар}$, диаметров когтевых шайб $d_{к.ш}$ или промежуточных значений угла действия нагрузки по отношению к волокнам α .

Результаты определения жесткости соединений приведены на рис. 7.8.1–7.8.3 и в табл. 7.3.

Из табл. 7.3 видно, что теоретические и экспериментальные значения близки друг к другу (средняя разница значений составляет 12%), что характеризует предлагаемую методику, как корректную для рассматриваемого диапазона значений.

Данная методика позволяет рассчитать теоретические значения линейной жесткости для более широкого диапазона геометрических параметров соединений – различных соотношений диаметра нагеля, диаметра когтевой шайбы, угла приложения нагрузки к волокнам. Результаты данных вычислений представлены на рис. 7.8.1–7.8.3, и используются для вычисления смещений элементов соединений в конструкциях из LVL с когтевыми шайбами. При необходимости выполнения расчета к узлам конструкции назначаются жесткости

соединения в соответствии с углом приложения нагрузки и габаритами элементов соединений, что позволяет рассчитать деформации конструкции с учетом смещений в узлах.

Таблица 7.3

Линейная жесткость испытанных соединений

Угол приложения нагрузки к волокнам α , град.	Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	Диаметр нагеля, $d_{наг}$, мм	Факт. жесткость K , кН/мм	Теор. жесткость K , кН/мм	$\left(\frac{K_{факт}}{K_{теор}} - 1 \right) 100\%$
0	50	12	11,2	10	12,0%
	95	16	18,5	16,43	12,6%
	117	20	24,15	20,19	19,6%
90	50	12	1,89	1,78	6,2%
	95	16	2,85	3,34	-14,7%
	117	20	4,91	4,45	10,3%

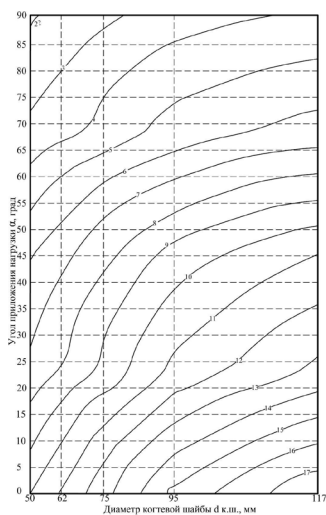


Рис. 7.8.1. Теоретическая зависимость жесткости K для нагельных соединений с когтевыми шайбами в LVL при диаметре нагеля $d_{наг}$ 12 мм, на 1 уловный срез соединения, кН/мм

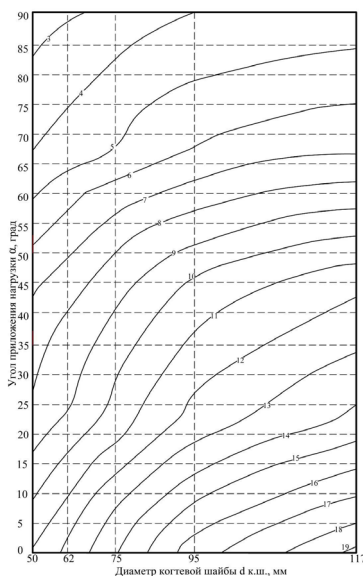


Рис. 7.8.2. Теоретическая зависимость жесткости K для нагельных соединений с когтевыми шайбами в LVL при диаметре нагеля $d_{\text{наг}}$ 16 мм на 1 уловный срез соединения, кН/мм

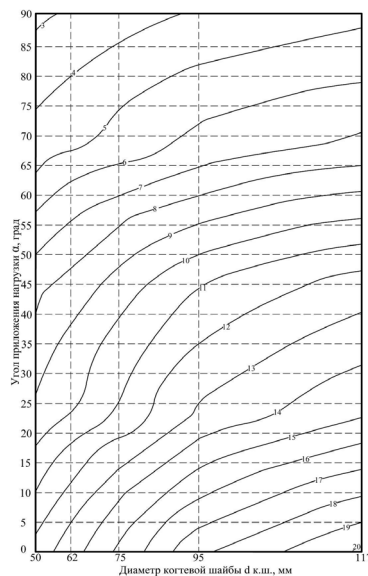


Рис. 7.8.3. Теоретическая зависимость жесткости K для нагельных соединений с когтевыми шайбами в LVL при диаметре нагеля $d_{\text{наг}}$ 20 мм на 1 уловный срез соединения, кН/мм

7.1.2. Исследование зависимости НДС соединений от изменения толщин элементов LVL

Для изучения воздействия толщин элементов LVL на прочность соединений с когтевыми шайбами были произведены испытания по определению прочности соединений при изменяемой толщине элементов и фиксированном диаметре когтевой шайбы и нагеля для определения необходимости эмпирической корректировки полученных результатов.

Испытания проводились в две серии с использованием образцов форм и размеров, указанных на рис. 7.9 (серия 2). Толщина элементов LVL принята была принята: для серии 1 как $t = 45$ мм, $t = 63$ мм, $t = 75$ мм; для серии 2 как $t = 36$ мм,

$t = 45$ мм, $t = 63$ мм. Было испытано 12 образцов (2 серии по 2 дубликата для 3-х типов толщин). Методика испытаний была выбрана аналогичной воздействию на соединение продольного усилия. Результаты испытаний приведены на рис. 7.10–7.12. Параметры испытаний для оценки влияния толщин на несущую способность приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Данные испытаний для оценки влияния толщин на несущую способность

Испытания			Толщины элементов t , мм		
№ серии	$d_{к.ш}$, мм	$d_{ш}$, мм			
1	117	20	45	63	75
2	95	16	36	45	63

По результирующим графикам (рис. 7.10–7.11) можно заметить увеличение сходимости результатов теоретических расчетов и экспериментов при увеличении толщин элементов соединения. В качестве корректирующего коэффициента

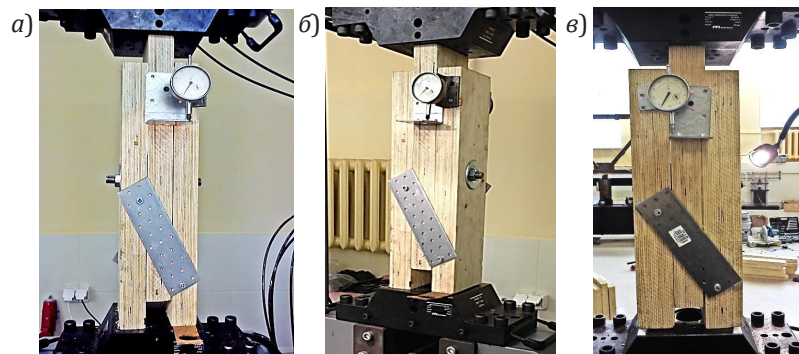


Рис. 7.9. Образцы серии 2 в период испытаний: *a* – толщина элементов $t = 36$ мм; *б* – толщина элементов $t = 45$ мм; *в* – толщина элементов $t = 63$ мм

7.1. Действие на соединении осевого усилия

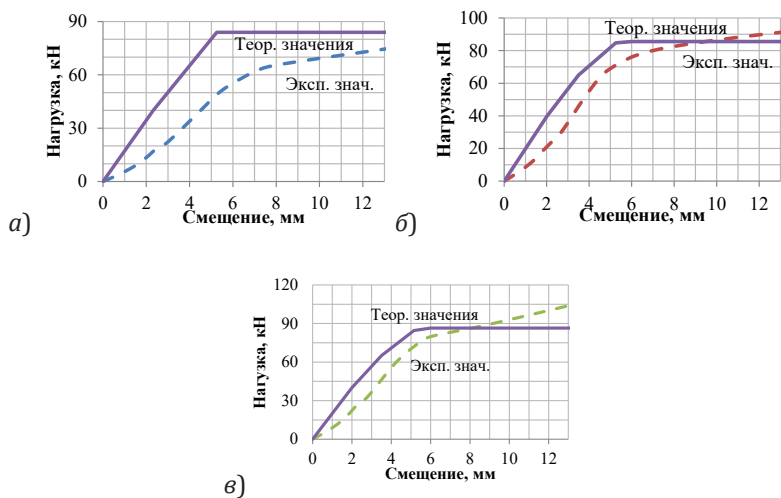


Рис. 7.10. Результаты испытаний 1-й серии: а – толщина элементов $t = 45$ мм; б – толщина элементов $t = 63$ мм; в – толщина элементов $t = 75$ мм

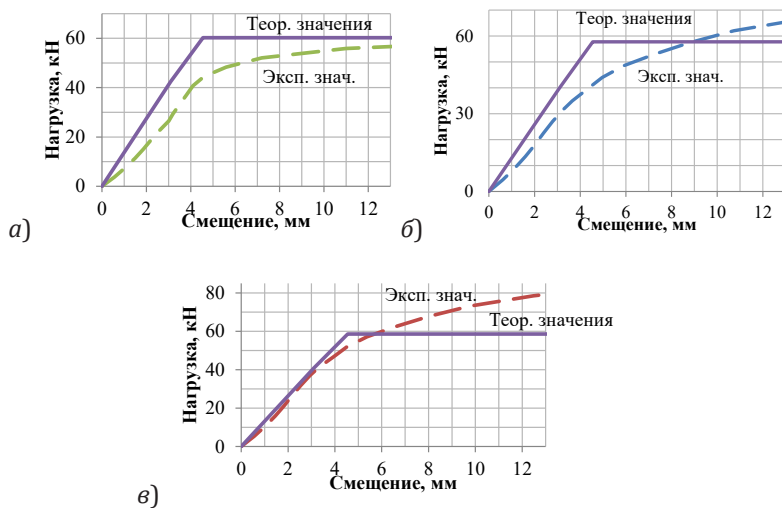


Рис. 7.11. Результаты испытаний 2-й серии: а – толщина элементов $t = 36$ мм; б – толщина элементов $t = 45$ мм; в – толщина элементов $t = 63$ мм

для теоретических значений используется величина k_t , с помощью которой учитывается разница в показания расчетной и фактической несущими способностями:

$$k_t = N_{I-II \text{ эксп}} / N_{I-II \text{ теор}}, \quad (7.1)$$

где k_t – расчетный коэффициент, учитывающий изменение толщин элементов LVL в соединении; $N_{I-II \text{ эксп}}$ – экспериментальное значение несущей способности в упругой зоне работы соединения; $N_{I-II \text{ теор}}$ – теоретическое значение несущей способности в упругой зоне работы соединения.

По результатам эксперимента возможно построение зависимости между значениями отношений t/h_e и $N_{I-II \text{ эксп}} / N_{I-II \text{ теор}}$ для двух серий (рис. 7.12).

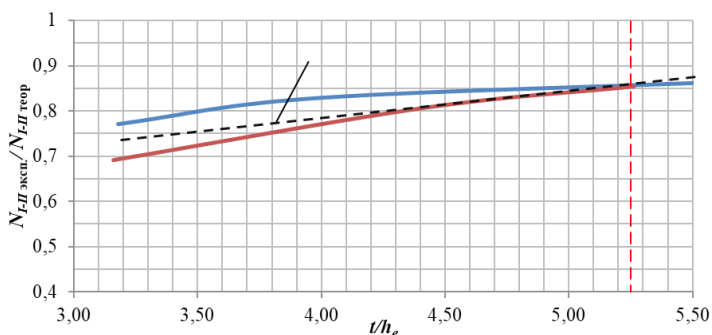


Рис. 7.12. Зависимость отношений толщины элементов и высоты когтей шайбы t/h_e и теоретических и экспериментальных несущих способностей $N_{I-II \text{ эксп}} / N_{I-II \text{ теор}}$

По рис. 7.12 для всех испытаний заметна аналогия в распределении величин. Отношение разницы экспериментальных и теоретических значений ближе к единице при увеличении отношения t/h_e до 5,25. При значениях t/h_e более 5,25 значительного изменения разницы между значениями $N_{I-II \text{ эксп}}$ и $N_{I-II \text{ теор}}$ не происходит. Это значит, что при фиксированном диаметре когтевой шайбы и нагеля при толщинах элементов LVL $t_{\min} \geq 5,25h_e$ предлагаемая методика позволяет рассчитывать несущую способность с постоянной

достоверностью, а при толщинах лежащих в интервале $3h_e \leq t_{\min} < 5,25h_e$ постоянство достоверности теоретических значений учитывается коэффициентом k_t . Величину коэффициента k_t можно определить по рис. 7.12 как средние величины между показаниями 1 и 2 серии испытаний и аппроксимировать в виде следующего уравнения:

$$k_t = 0,068 \frac{t}{h_e} + 0,51. \quad (7.2)$$

Использование корректирующего коэффициента k_t обосновано при использовании ограничительного условия (5.50) для расчета соединений с когтевыми шайбами.

7.2. Исследование влияния изгибающего момента на НДС соединения с когтевыми шайбами

Особенности работы соединений при воздействии изгибающего момента в соединении с когтевыми шайбами на сегодняшний момент изучены недостаточно. Для определения влияния изгибающего момента на соединение с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL* авторами были произведены испытания шести образцов (3 образца в двух сериях).

Были изготовлены балки пролетом 4 м с двусрезным соединением по центру. Для изготовления деревянных элементов использовался *LVL Ultralam* сечением 300×45 мм (1-я серия) и 400×45 мм (2-я серия). Элементы были закреплены на 4 гладкие шпильки $d = 12$ мм (1-я серия) $d = 14$ мм (2-я серия) по ГОСТ 9066–75 с шайбами и гайками, а также на 8 когтевых шайб в виде двусторонних зубчато-кольцевых пластин типа *C1* [24] $d = 50$ мм (1-я серия) и $d = 62$ мм (2-я серия). Размеры образцов представлены на рис. 7.15.

Для уменьшения трудоемкости изготовления образцов было использовано универсальное устройство для запрессовки когтевых шайб [130]. В используемом устройстве содержатся опорные элементы, соединенные между собой с возможностью возвратно-поступательного перемещения одного элемента относительно другого, полый механизм для нагнетания нагрузки, опирающийся на втулку, связанную

с одним из опорных элементов, и центральный стержень, со-
относительно центрального стержня с возможностью их пово-
рота и последующей жесткой фиксации, а полый механизм
для нагнетания нагрузки выполнен в виде гидравлического
домкрата, причем каждый телескопический стержень одно-
го опорного элемента соединен с симметричным телескопи-
ческим стержнем другого элемента.

Использование указанного устройства позволило изгото-
вить качественное соединение за счет обеспечения рав-
номерной передачи усилий запрессовки и их равномерного
распределения по поверхности соединяемых элементов *LVL*
при запрессовке одновременно нескольких пар когтевых
шайб. Причем используемое устройство обеспечило сокра-
щение рабочего времени на изготовление образца и упро-
стило его сборку. Принципиальный вид полезной модели
представлен на рис. 7.13. Сборка соединения с использова-
нием универсального устройства для запрессовки когтевых
шайб приведена на рис. 7.14.

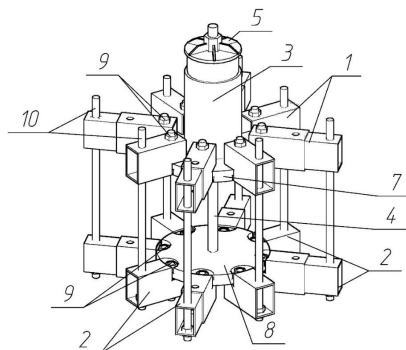


Рис. 7.13. Полезная модель устройства для запрессовки когтевых шайб: 1, 2 – опорные элементы; 3 – механизм для нагнетания нагрузки; 4 – центральный стержень; 5, 6 – гайка-крышка; 7, 8 – втулка; 9 – стяжные элементы; 10 – цилиндрические стержни



Рис. 7.14. Сборка узла с использованием универсального устройства для запрессовки когтевых шайб

Для измерения горизонтальных и вертикальных смещений к изготовленным образцам были прикреплены прогибомеры ПАО-6 с ценой деления 0,01 мм с возможностью отслеживать смещения в крайних опорах балки и с обеих сторон центрального узла. Прикрепление прогибомеров производилось при помощи шурупов. Горизонтальные и вертикальные смещения позволяют получить значения углов поворота конструкции под воздействием изгибающего момента.

Проведение испытаний выполнялось согласно существующим рекомендациям [29]. При испытании образцов на действие изгибающего момента нагрузка передавалась через стальную распределительную призму от гидравлического домкрата, установленную над крайними элементами соединения. Это позволяло среднему элементу вращаться относительно крайних элементов. Над гидравлическим домкратом был установлен динамометр, позволяющий определять сжимающие нагрузки с точностью 0,01 кН. Для предотвращения выхода конструкции из плоскости были предусмотрены перекрестные связи, удерживающие испытываемые балки в горизонтальном положении. Схема проведения испытаний и процесс приведены на рис. 7.15–7.16.

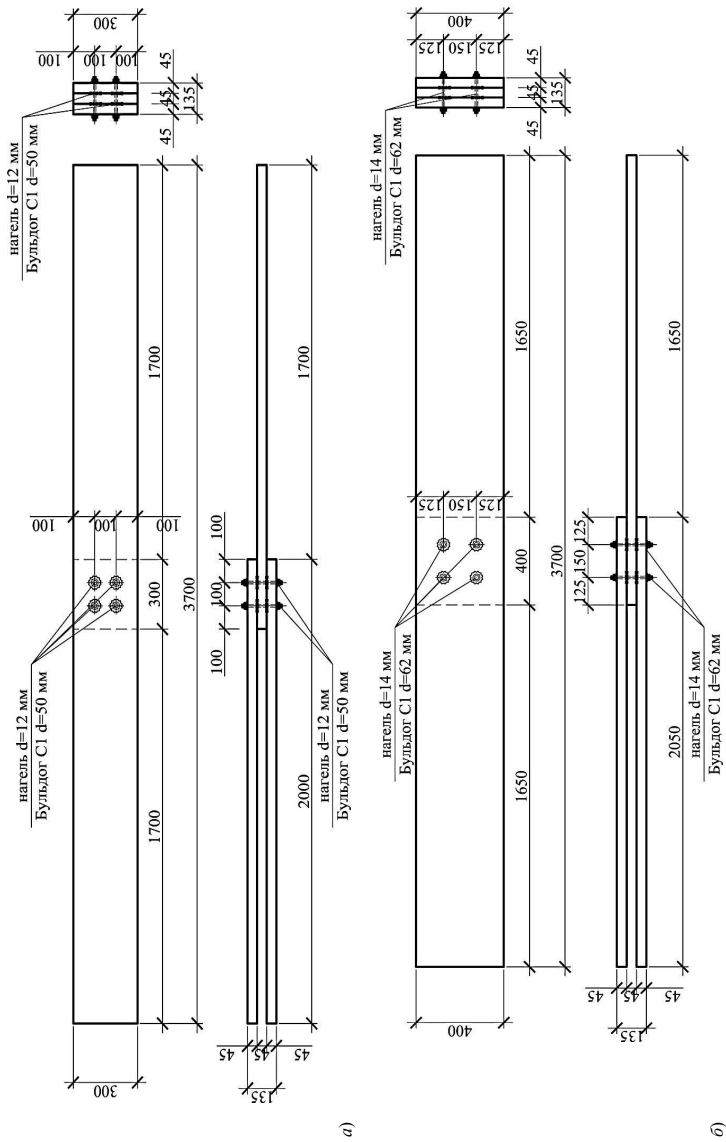


Рис. 7.15. Изготовительный чертеж образцов на действие момента: а – 1 серии; б – 2 серии

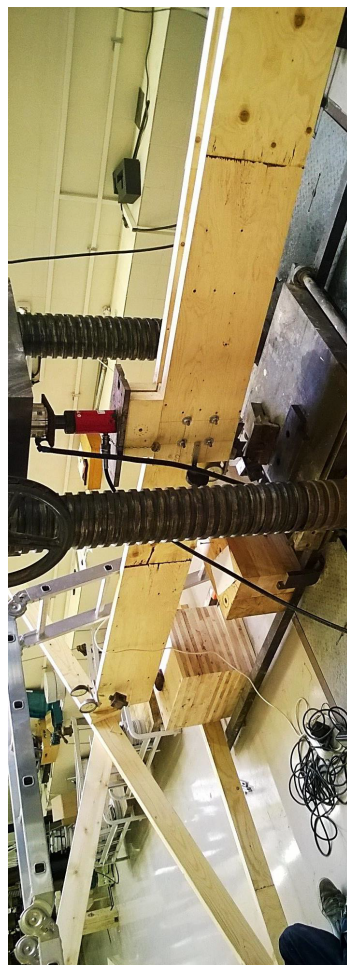
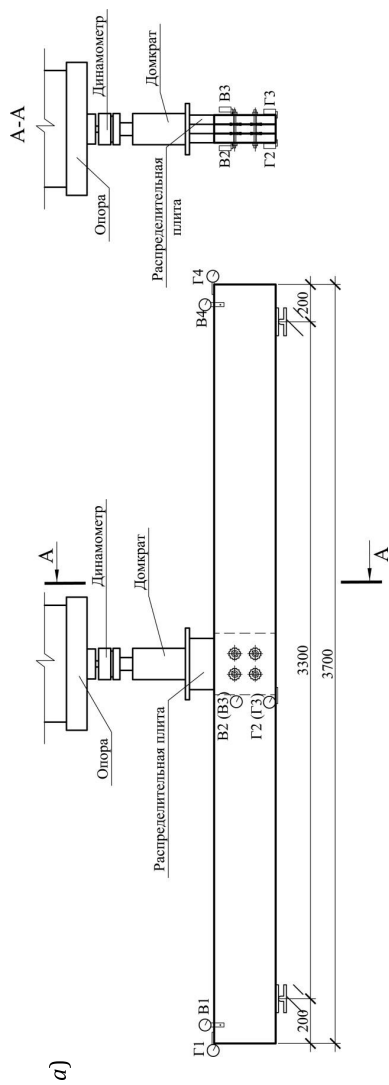


Рис. 7.16. Испытание соединений на действие момента: а) схема испытаний; б) проведение испытания

До приложения первоначальной ступени нагрузки записывались начальные показания прогибомеров. Испытания на действие изгибающего момента проводились ступенчато, с постоянной ступенью загрузки, определяемой в ходе пробных экспериментов и принимаемой как 3% от предполагаемого разрушающего значения N_d , которое было принято 800 кг. Нагрузка подавалась с равномерной скоростью 2,5 кг/с. При достижении каждой ступени нагрузка выдерживалась в течении 20 с и с прогибомеров снимались показания смещений. Прогибомеры демонтировались при достижении вертикальных смещений $\delta_y = 50$ мм, и образцу передавалось максимальное усилие. После испытаний из элементов вырезались образцы для определения физико-механических свойств материала, при этом влажность составила $W = 11,4$ %, прочность на сжатие вдоль волокон $R_{сж} = 54,52$ МПа.

Сопоставленные диаграммы деформирования соединений с когтевыми шайбами, подверженные крутильному моменту, полученные с помощью предлагаемой методики и экспериментально, показывают сходимость в области достижения максимальных нагрузок в пределах 6–9 % (рис. 7.17–7.18).

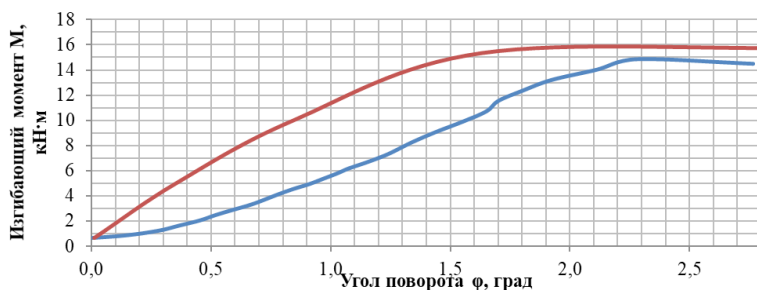


Рис. 7.17. Экспериментальные и теоретические зависимости угла поворота соединения от изгибающего момента для соединений 1-й серии

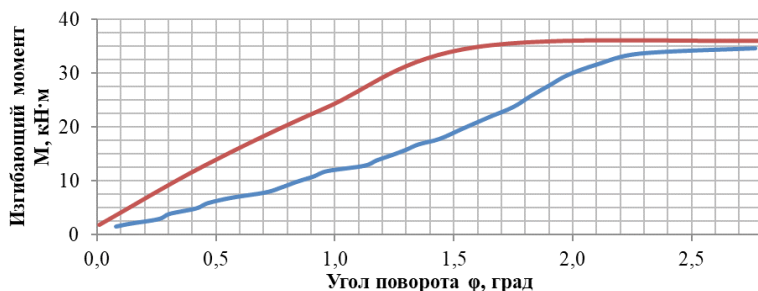


Рис. 7.18. Экспериментальные и теоретические зависимости угла поворота соединения от изгибающего момента для соединений 2-й серии

7.3. Исследование НДС соединений с когтевыми шайбами при действии длительного усилия

Для изучения влияния на соединение с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL* действия длительного осевого усилия и исследования характера развития деформаций во времени, а также апробации предлагаемой методики расчета были проведены соответствующие длительные испытания для 4-х образцов.

Для испытания были выбраны образцы в двусрезном исполнении, форма и размеры которых приняты согласно соответствующим конструктивным требованиям к соединениям деревянных элементов [23, 59, 71]. Образцы выполнены с использованием одного нагеля в образце для возможности сопоставления с результатами проводимых ранее аналогичных экспериментов (в том числе испытаний при кратковременном действии нагрузки). Двусрезные соединения выполнялись с углом между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 0^\circ$.

Материал элементов соединения – брус *LVL Ultralam* [152] толщиной 45 мм. В качестве когтевых шайб применялись двухсторонние зубчато-кольцевые пластины типа *C1* [24], диаметрами 50 (1-я серия) и 95 (2-я серия) мм производства компании *Simpson*. В качестве нагелей использовались гладкие стальные шпильки диаметрами 12 (1-я серия)

и 16 (2-я серия) мм по ГОСТ 9066–75 с гайками и шайбами. Размеры образцов представлены на рис. 7.2, а–7.3, а.

Аналогично испытаниям на кратковременное воздействие осевого усилия перед испытаниями к образцам были прикреплены металлические пластины во избежание поворота элементов относительно друг друга. Перед установкой измерительного оборудования образцы были обмотаны герметичной стрэтч-пленкой для фиксации неизменности влажности на период испытаний. Также для измерения деформаций к образцам с противоположных сторон предварительно были прикреплены индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Из элементов образцов были выпилены параллелепипеды и определены прочность на сжатие вдоль волокон ($R_{сж} = 56,3$ МПа) и влажность материала ($W = 12,1$ %).

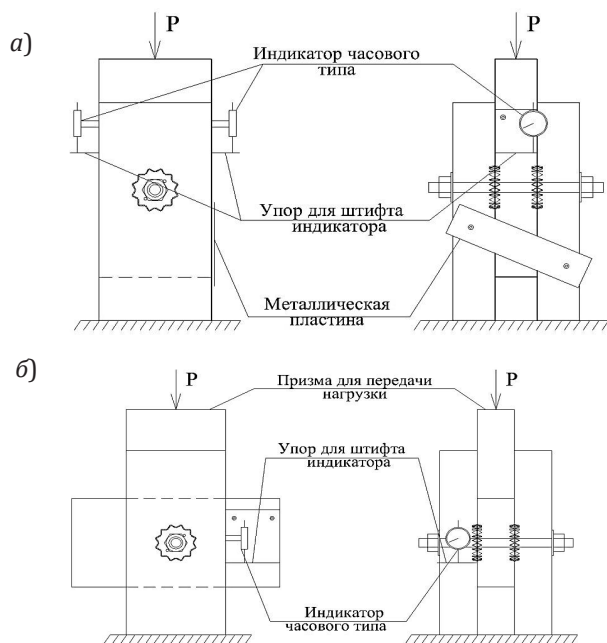


Рис. 7.19. Схема проведения длительных испытаний на сжатие для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов: а – при $\alpha = 0^\circ$; б – при $\alpha = 90^\circ$

Экспериментальные образцы были испытаны в пружинных прессах с передачей нагрузки равной 0,3 ед. от максимального нагружения, передаваемого при кратковременных испытаниях и составили для 1-й серии $P = 9,525$ кН, для 2-й серии $P = 20,4$ кН. Перед передачей усилия пружинные установки были оттарированы с помощью электронного динамометра с возможностью контролирования усилия с точностью до 0,1 кН.

Всего было проведено 4 испытания (2 серии по 2 опыта в каждой). Испытания проводились в течение 100 сут каждая. Разгрузка образцов выполнялась в течении 24 сут. После испытаний были построены графики кривых деформирования для экспериментальных значений и произведено сравнение с теоретическими значениями.

Диаграммы прироста деформаций представлены на рис. 7.20. Средняя величина смещения по истечении 10 мин после загрузки составила 0,45 мм для 1-й серии и 0,51 мм для 2-й серии. По истечении срока испытаний конечная величина смещения составила 0,68 мм для 1-й серии и 0,77 мм для 2-й серии. Относительная ползучесть в конце испытания составила 0,56 мм для 1-й серии, 0,61 мм для 2-й серии.

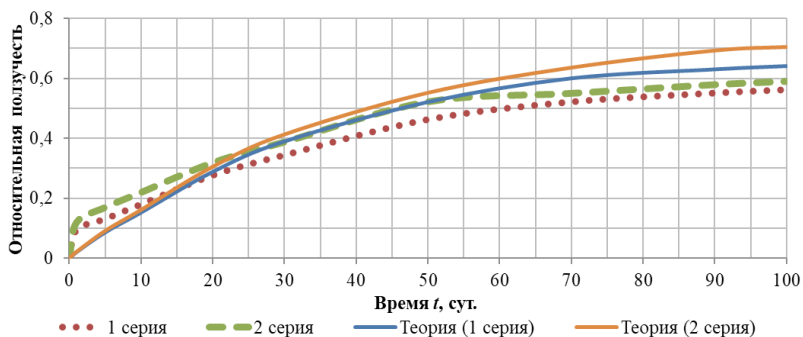


Рис. 7.20. Экспериментальные и теоретические зависимости относительной ползучести соединения от времени для уровня нагрузки в $0,3 P_{\max}$

При сопоставлении результатов длительных испытаний *LVL* и древесины с когтевыми шайбами заметна аналогия в распределении величин относительной ползучести во времени. Для древесины на 100-е сутки была отмечена величина средней относительной ползучести на уровне 0,75. Для *LVL* эта величина была меньше и составила в среднем 0,57.

Используя алгоритм расчета соединений (см. п. 5.4), были получены теоретические значения изменений деформаций во времени, при этом относительная ползучесть на 100-е сутки составила для 1-й серии 0,641 мм и для 2-й серии 0,704 мм, при этом расхождения расчетных теоретических и экспериментальных значений оказались равными 9,5 и 16,05 % соответственно, что является удовлетворительной сходимостью.

7.4. Исследование НДС ферм из *LVL* с когтевыми шайбами при действии статической нагрузки

Для оценки достоверности предлагаемой методики расчета стержневых конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами, а также изучения работы конструкции под нагрузкой были проведены экспериментальные исследования полномасштабной модели фермы с параллельными поясами пролетом 4,6 м.

Эксперимент выполнен с целью апробации методики расчета и определения напряженно-деформированного состояния ферм при действии статической нагрузки, приложенной в узлах верхнего пояса.

В процессе подготовки и испытаний опытной конструкции требовалось:

- оценить технологичность изготовления конструкции;
- оценить деформативность узлов конструкции;
- определить распределение напряжений в элементах конструкции.

7.4.1. Конструирование и сборка образца конструкции для испытания

Изготовление опытной фермы из *LVL* с когтевыми шайбами производилось в условиях механической лаборатории

СПбГАСУ силами авторов в соответствии с требованиями [23, 59, 71]. Геометрические размеры конструкции представлены на рис. 7.21.1. В качестве материала элементов конструкции был использован брус *LVL Ultralam-R* производства завода *Taleon Terra* (г. Торжок). В качестве соединителей были использованы стальные цилиндрические болты из стали *C255* диаметрами 16 мм с гайками и усиленными шайбами и когтевые шайбы типа «Бульдог» *C1* диаметрами 62 мм производства компании *Simpson* (США). При проектировании испытуемой фермы предполагалось будущее разрушение по узлу с когтевыми шайбами, так как запас несущей способности по материалу принят минимум 44%, запас несущей способности по узлу 7 %. Ферма была запроектирована для уровня разрушающей нагрузки, соответствующей $P_n = 6,68$ кН/м в соответствии [150].

Перед испытаниями из материалов элементов конструкции фермы были изготовлены образцы для определения влажности W , прочности на кратковременное сжатие вдоль волокон R_c и модуля упругости E . Влажность материала *LVL* для нижнего и верхнего поясов составила $W = 10,6\%$, при приведении к стандартной влажности $W = 12$ прочность на сжатие составила $R_c = 56,6\text{--}56,9$ МПа в соответствии с ГОСТ 16483.10-73* [95], модуль упругости $E = 14000$ МПа в соответствии с ГОСТ 16483.24-73* [132]. Для элементов раскосов влажность составила $W = 11,1$ %; при приведении к стандартной влажности $W = 12$ % прочность на сжатие составила $R_c = 52,1\text{--}53,4$ МПа в соответствии с ГОСТ 16483.10-73* [95]; модуль упругости $E = 13\ 800\text{--}13\ 900$ МПа в соответствии с ГОСТ 16483.24-73* [132]. Значения характеристик для *LVL* при приведении к 12 % влажности определялись как среднее арифметическое для каждого значения элементов конструкции. Геометрические и прочностные характеристики элементов представлены в табл. 7.5. Обозначение элементов фермы представлено на рис. 7.21.2.

Порядок сборки конструкции состоял из следующих операций:

- размещение элементов конструкции в проектное положение и закрепление с помощью зажимных средств;

- сверление отверстий для стяжных болтов;
- установка когтевых шайб в предусмотренные проектом места;
- поочередная запрессовка слоев конструкции;
- установка стяжных болтов.

Таблица 7.5

Геометрические и прочностные характеристики элементов конструкции испытываемой фермы, приведенные к влажности $W = 12\%$

Элемент конструкции	Габариты ($l \times h \times b$), мм	Прочность на сжатие R_c , МПа	Модуль упругости E , МПа
ВП	3240×100×45	56,6	14000
НП	4800×100×45	56,9	14000
P1	1190×100×45	52,1	13800
P2	1160×100×45	53,4	13900
P3	1090×100×45	52,8	13800
Ст1	475×100×45	50,9	12300

Элементы конструкции были замаркированы и размещены в соответствующее положение согласно размерам, указанными на рис. 7.21.1. При этом контуры элементов относительно друг друга фиксировались на частях соседних элементов для контроля сборки конструкции при дальнейших операциях. Закрепление элементов относительно соседних выполнялось с помощью струбцин.

Сверление отверстий выполнялось без использования дополнительной оснастки, контролирующей точность сверления, при этом вертикальность сверла определялась визуально, путем осмотра с двух взаимноперпендикулярных сторон и корректировки угла действия сверла.

Установка когтевых шайб подразумевала их постановку в проектное положение и фиксацию от смещения путем закрепления шайб с помощью гвоздей. Гвозди закреплялись в когтевую шайбу через предусмотренные в ней монтажные отверстия. При этом использование в качестве крепежных

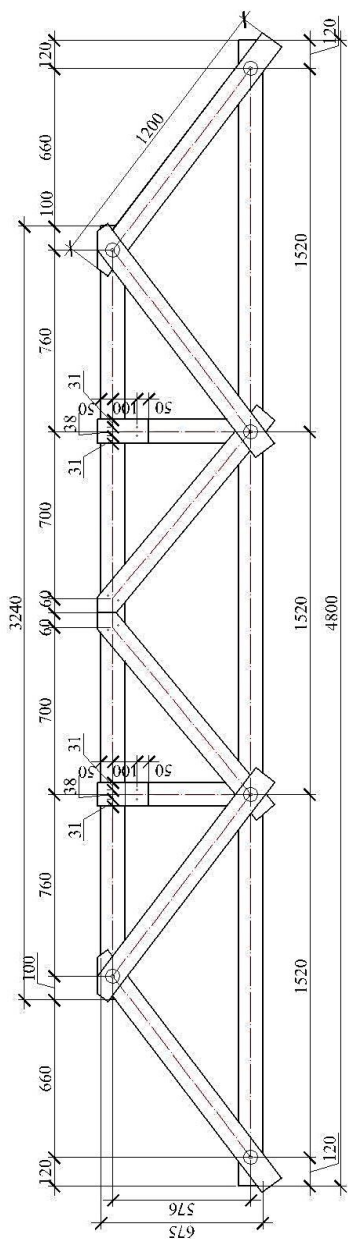


Рис. 7.21.1. Деталировочный чертеж испытываемой фермы

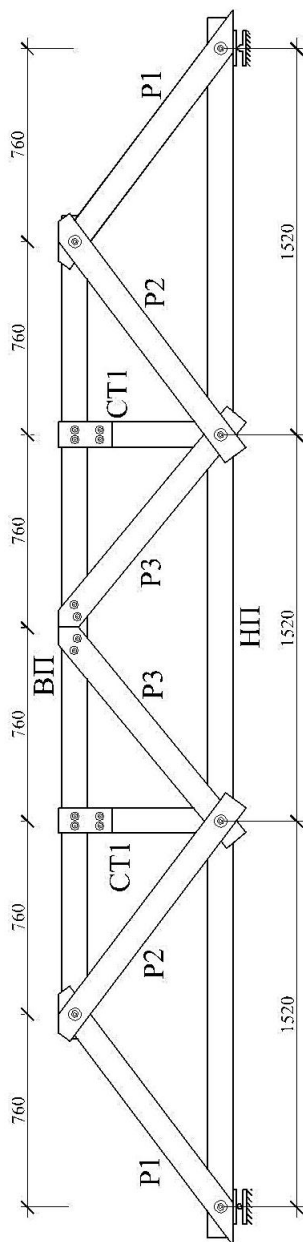


Рис. 7.21.2. Обозначение элементов фермы

средств гвоздей не препятствовало дальнейшей запрессовке и не изменяло несущей способности соединения. Затем элементы с закрепленными когтевыми шайбами устанавливались в проектное положение.

Запрессовка когтевых шайб выполнялась с использованием гидравлического домкрата с полым штоком. При этом сквозь отверстие для болта продевалась металлическая шпилька, с одной стороны устанавливался гидравлический полый домкрат с продетой внутри шпилькой, с обеих сторон которой установлены широкие усиленные шайбы с гайками. Поскольку изготавливаемая конструкция состоит из 5 слоев элементов, то для сохранения необходимой точности сборку производили в начале трех внутренних слоев 2, 3, 4, а затем внешних 1, 5.

После запрессовки выполнялась затяжка с помощью рабочих болтов с гайками и усиленными шайбами. Затяжка гаек выполнялась из условия сохранения просветов между сплавляемыми элементами на толщину тела когтевой шайбы согласно требованиям [59].

В ходе работы по сборке конструкции фермы было отмечено, что использование размеченного сборочного стола и гидравлического инструмента для запрессовки когтевых шайб значительно ускоряет процесс сборки в построечных условиях и увеличивает технологичность сборки конструкции. Так, трудоемкость изготовления конструкции фермы в хорошо отлаженных условиях может быть ниже 1,167 чел./ч на 1 м пролета конструкции, что представляет деревянные конструкции на когтевых шайбах как имеющие преимущество. При производстве конструкций в заводских условиях процесс сборки достаточно просто усовершенствовать путем использования высокоэффективных универсальных сборочных столов, а также автоматических прессов.

7.4.2. Методика и проведение испытаний сквозных ферм

Испытания проводились на семиштемпельном гидравлическом прессе *Amsler*. Конструктивная особенность данного

испытательного стенда заключается в возможности подачи нагрузки только с нижней стороны, поэтому было принято решение перевернуть конструкцию фермы для подачи нагрузки на верхний пояс. Горизонтальные связи были закреплены к элементам верхнего пояса для обеспечения пространственной жесткости конструкции. Для передачи нагрузок от гидравлических домкратов были предусмотрены распределительные пластины. Конструкция фермы проектировалась для передачи нагрузки в узлы закрепления раскосов, стоек и верхнего пояса. Закрепление фермы в опорной зоне выполнялось путем опирания конструкции на распределительную плиту, которая, в свою очередь, передавала нагрузки на цилиндрические опоры, жестко связанные с конструкцией пресса.

Измерения перемещений выполнялись с использованием прогибомеров Аистова 6ПАО с ценой деления 0,01 мм путем установки приборов в опорной зоне фермы и по узлам верхнего и нижнего поясов. Всего было установлено 9 прогибомеров, расположение которых приведено на рис. 7.24.

Деформации и напряжения в элементах фермы определялись с использованием тензометрических преобразователей *Kyowa* с базой 50 мм и номинальным сопротивлением 405 Ом, коэффициент тензочувствительности – 4.42. Измерения сигналов датчиков производилось на измерительно-вычислительном комплексе (ИВК) *Tokyo Sokki Kenkyujo Co. TDS-150* с возможностью снятия показаний с частотой 60 Гц. ИВК имеет 40 измерительных каналов и обеспечивает измерением по различным схемам включения датчиков, в том числе: измерение по схеме «1/4 моста», «1/2» мост, полный мост, а также позволяет снятие показаний с термопар. Для измерения деформаций и напряжений элементов конструкции применялись розетки, составленные из отдельных датчиков, ориентированных под углами 0° , 45° , 90° к волокнам. Использование такого вида расстановки датчиков позволяет определить вектор главных деформаций. Установка тензодатчиков на элементах конструкции фермы приведена на рис. 7.22–7.23, 7.25.

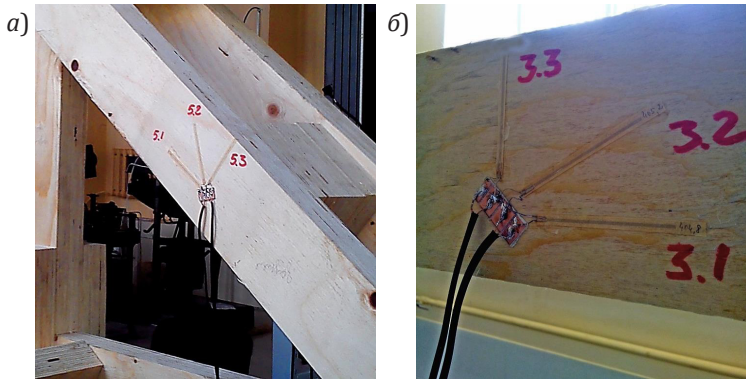


Рис. 7.22. Установка розеток тензодатчиков: а – на раскосах фермы; б – на нижнем поясе фермы

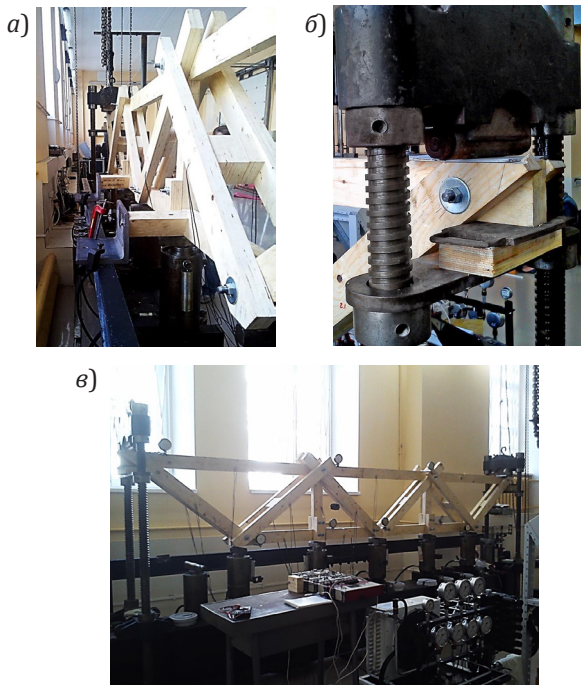


Рис. 7.23. Испытуемая ферма: а – раскрепление из плоскости верхнего пояса фермы; б – опорный узел фермы; в – внешний вид конструкции

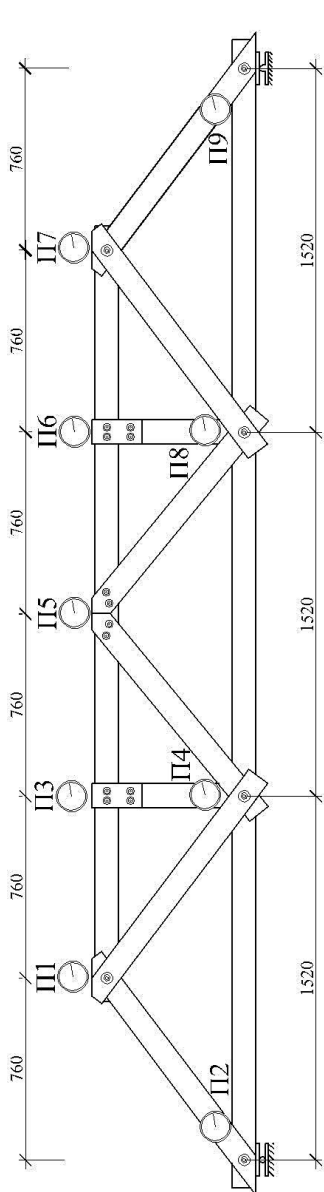


Рис. 7.24. Расположение прогибомеров на конструкции

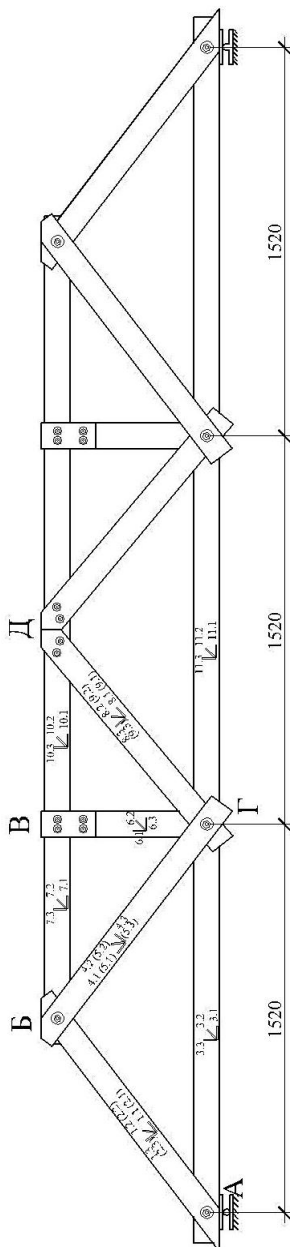


Рис. 7.25. Расположение тензодатчиков на конструкции

Перед испытаниями была произведена тарировка используемой партии тензодатчиков [133], которая позволила корректно интерпретировать результаты испытаний конструкции. Тарировка производилась в универсальной испытательной машине *Instron 5989* путем сжатия образца *LVL* с размерами $100 \times 45 \times 185$ мм с фиксацией усилия и соответствующего показания тензорезисторов. Тарирование тензодатчиков представлено на рис. 7.26.

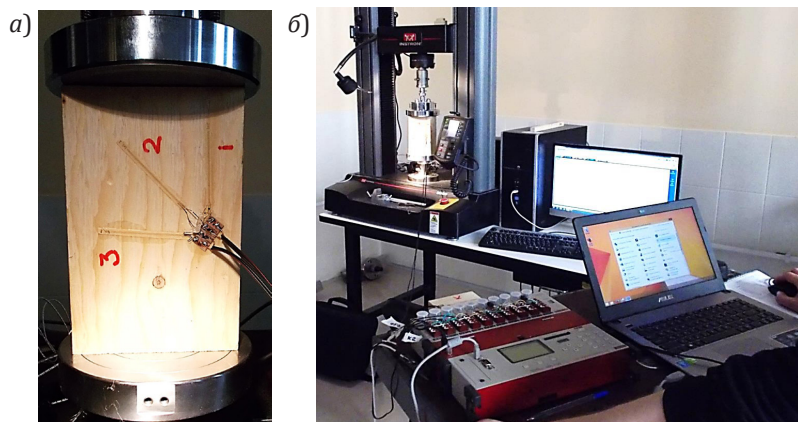


Рис. 7.26. Тарировка тензодатчиков на бруске *LVL*: а – образец с расположением тензодатчиков; б – общий вид регистрации отсчетов по приборам

Перед проведением основного испытания было произведено несколько пробных загрузок в 4 ступени при передаче суммарной нагрузки, равной $0,4P_{расч}$. Была произведена проверка регистрирующих приборов на работоспособность.

При проведении основного испытания нагрузка прикладывалась к верхнему поясу ступенчато, согласно рекомендациям к испытанию деревянных конструкций [102]. Продолжительность приложения нагрузки составляла 3 мин. Выдержка конструкции для перераспределения усилий в ней составляла 25–40 мин. Разгрузка конструкции проводилась в обратном порядке. В ходе проведения

эксперимента фиксировались смещения узлов элементов фермы и напряжения в элементах при передаче нагрузки в интервале от 2,34 до 8,19 кН/м с шагом загрузки 0,73 кН/м. После выполнения основного цикла загрузений и разгрузений (до 8,19 кН/м), конструкция фермы была доведена до разрушения при уровне нагрузки 15,48 кН/м. При этом при уровне загрузки выше 8,19 кН/м снятия показаний с тензометров не проводилось.

Таблица 7.5

Этапы нагружения

Этапы нагружения	Нагрузка на домкрате, кН					Всего на этапе, кН	Всего на этапе, кН/м
	1	2	3	4	5		
1	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	10,670	2,34
2	2,772	2,772	2,772	2,772	2,772	13,862	3,04
3	3,447	3,447	3,447	3,447	3,447	17,237	3,78
4	4,387	4,387	4,387	4,387	4,387	21,934	4,81
5	4,852	4,852	4,852	4,852	4,852	24,259	5,32
6	5,481	5,481	5,481	5,481	5,481	27,406	6,01
7	6,110	6,110	6,110	6,110	6,110	30,552	6,7
8	6,794	6,794	6,794	6,794	6,794	33,972	7,45
9	7,469	7,469	7,469	7,469	7,469	37,346	8,19
10	8,828	8,828	8,828	8,828	8,828	44,141	9,68
11	10,187	10,187	10,187	10,187	10,187	50,935	11,17
12	11,546	11,546	11,546	11,546	11,546	57,730	12,660
13	12,905	12,905	12,905	12,905	12,905	64,524	14,150
14	14,118	14,118	14,118	14,118	14,118	70,589	15,480
15	13,58	13,58	13,58	13,58	13,58	67,90	14,89
16	14,12	14,12	14,12	14,12	14,12	70,59	15,48

В ходе проведения эксперимента отсчеты по приборам снимались непосредственно перед приложением нагрузки и в момент достижения требуемого уровня загрузки. Снятие отсчетов по приборам выполнялось одновременно в течение 0,5 мин.

7.4.3. Исследование НДС четырехугольной фермы с параллельными поясами из LVL с когтевыми шайбами

Результаты испытаний представлены в виде диаграмм перемещений нижних и верхних узлов фермы, а также относительных деформаций конструкции (см. рис. 7.27). По показаниям прогибометров были построены эпюры перемещений для верхнего и нижнего поясов конструкции (см. рис. 7.28–7.29).

Анализ перемещений в узлах соответствует упругому характеру работы соединений до уровня нагрузки 3,78 кН/м фермы; при повышении нагрузки до 8,19 кН/м заметно изменение угла наклона кривой нагрузка–смещение, которая характеризуется сравнительно пропорциональным изменением смещения от уровня нагрузки. Перераспределения в элементах фермы начинают возникать при уровне нагрузок 6,68 кН/м, что видно по рис. 7.27, при соответствующем перемещении узлов конструкции в среднем на 9,5 мм. При достижении расчетного усилия $P_p = 6,68$ кН/м прогиб фермы составил 1/484 от пролета, при допустимом прогибе 1/300 [71].

Начало интенсивных деформаций возникает при уровне нагрузки N_{I-II} 9,67 кН/м. Данная нагрузка определяет границу области сравнительно небольших деформаций и области их интенсивного развития. Характерное пластическое разрушение замечается при загрузке от 12,68 кН/м. На ферме отмечались значительные деформации, был слышен характерный треск разрывающихся волокон материала LVL, однако разрушений узлов замечено не было. При увеличении нагрузки до 15,48 кН/м в течение 12 мин произошло разрушение в нижнем поясе фермы, что вызвало выход из строя всей правой части конструкции. Нижний пояс фермы был разрушен от воздействия изгибающего момента в узле

(узел установки прогибомера П8). После перераспределения усилий возникла трещина в элементе верхнего пояса, и за счет передачи усилий под углом от крайнего раскоса она раскрылась, расщепив при этом элемент верхнего пояса пополам (узел установки П7) (рис. 7.30–7.32).

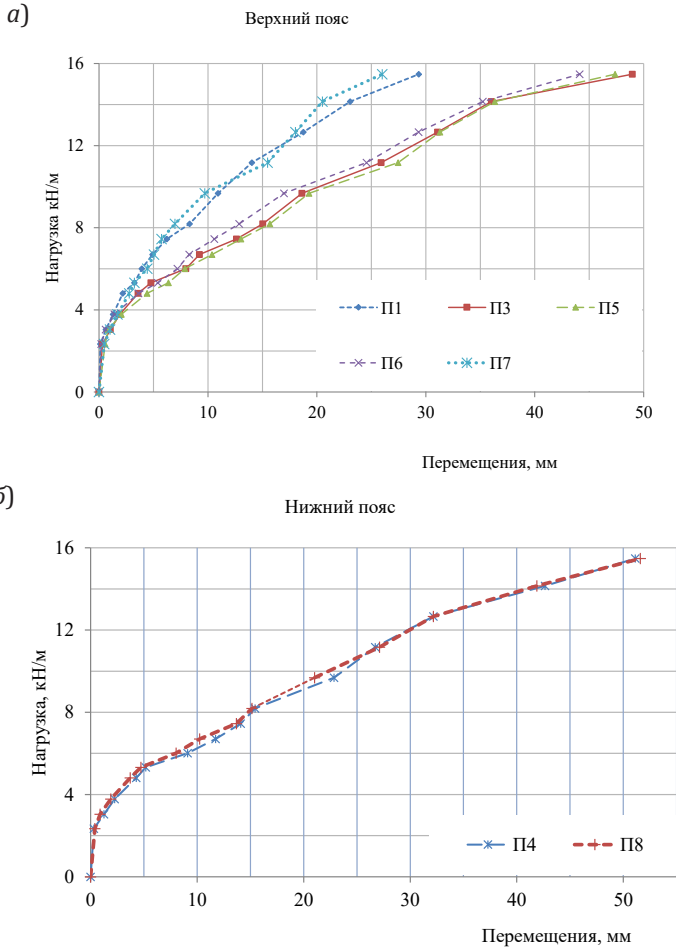


Рис. 7.27. Диаграмма перемещений узлов фермы:
а – верхний пояс; б – нижний пояс

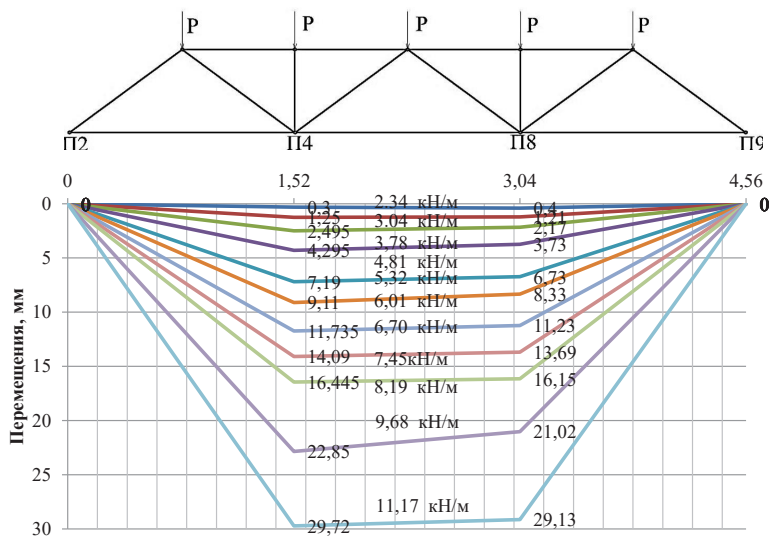


Рис. 7.28. Эпюры прогибов узлов нижнего пояса фермы

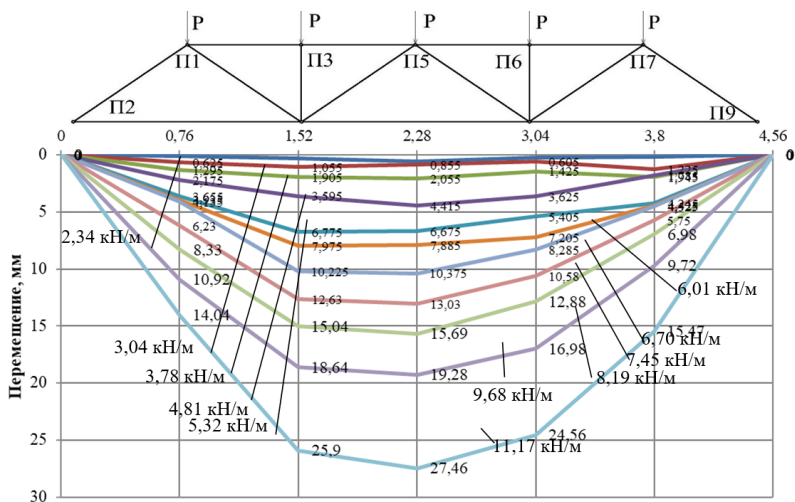


Рис. 7.29. Эпюры прогибов узлов верхнего пояса фермы

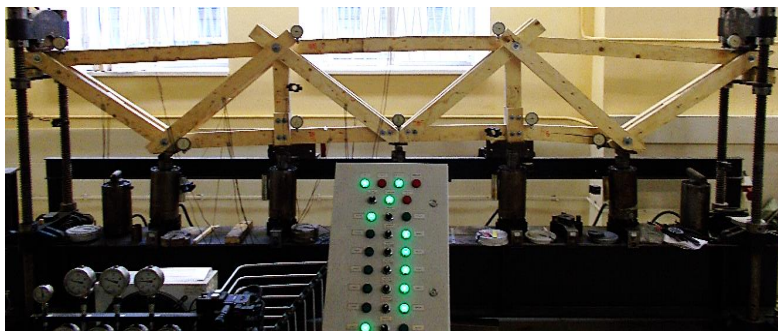


Рис. 7.30. Конструкция фермы при испытаниях

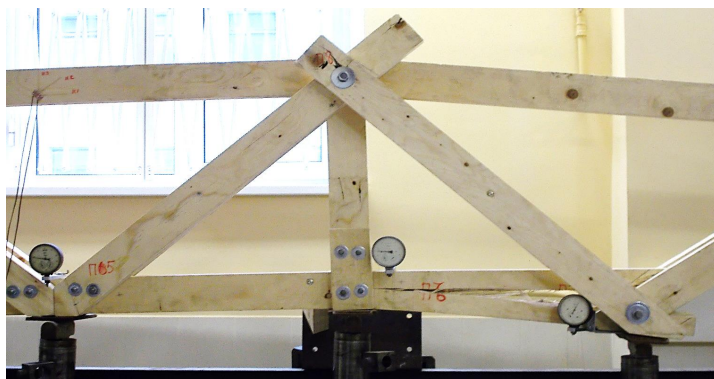


Рис. 7.31. Разрушение конструкции фермы при испытаниях

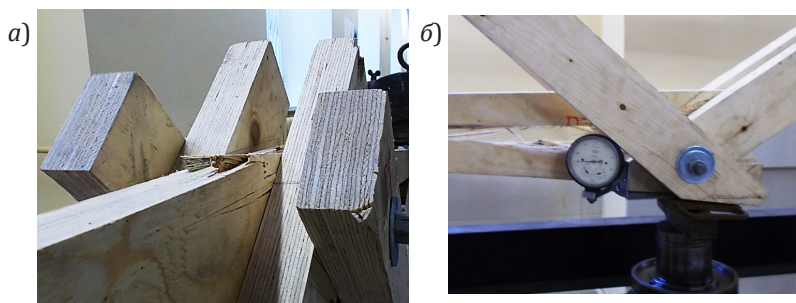


Рис. 7.32. Узлы разрушенной конструкции фермы: а – нижний пояс (место установки П8); б – верхний пояс (место установки П7)

Распределение нагрузок в стержнях фермы на симметричной части конструкции в зависимости от уровня нагружения узлов приведено на рис. 7.33. Упругие деформации наблюдались во всем диапазоне нагрузок. Градиент продольных деформаций в нижнем поясе превышал поперечные деформации в 3,9 раза. В ходе испытаний выхода из строя измерительного оборудования замечено не было.

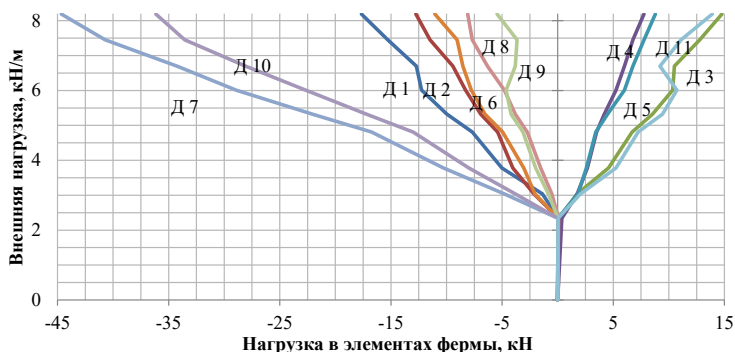


Рис. 7.33. Распределение нагрузок в стержнях фермы на части конструкции в зависимости от уровня внешней нагрузки

Для опорного узла А относительные деформации элементов приведены на рис. 7.34. В элементах раскосов возникали сжимающие деформации, которые в среднем составили $0,000879 \mu \text{ мм/мм}$. В элементе нижнего пояса были замечены растягивающие деформации, составляющие $0,000863 \mu \text{ мм/мм}$. В среднем при увеличении нагрузки на 1 кН/м на ферму, элементы раскосов деформировались на $0,000107 \mu \text{ мм/мм}$, а нижний пояс – на $0,000106 \mu \text{ мм/мм}$.

Для карнизного узла Б относительные деформации элементов приведены на рис. 7.35. В крайних раскосах конструкции возникали сжимающие деформации, которые в среднем составили $0,000893 \mu \text{ мм/мм}$. В элементах раскосов, соединяющих узлы Б и Г, замечены растягивающие деформации, составляющие в среднем $0,000491 \mu \text{ мм/мм}$. Элемент верхнего пояса был сжат на $0,0027 \mu \text{ мм/мм}$. По сравнению с элементами

решетки градиент развития деформаций верхнего пояса был больше. Для него скорость деформирования больше скорости деформирования крайних раскосов в 2,65 раза.

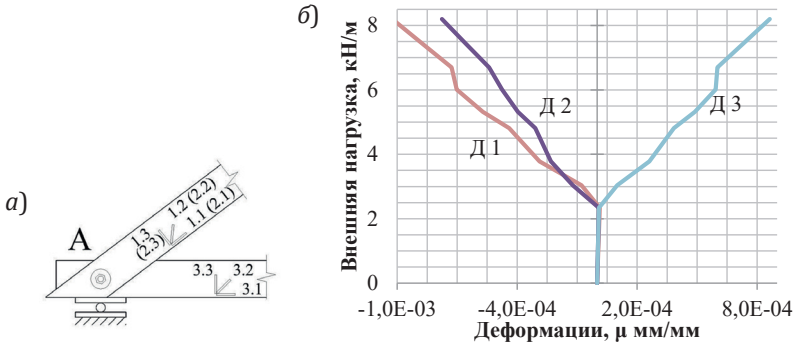


Рис. 7.34. Узел А: а – схематическое отображение расположения датчиков в узле А; б – относительные деформации элементов фермы для узла А

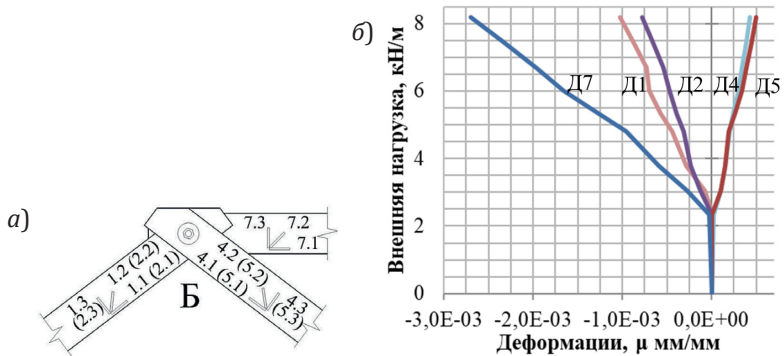


Рис. 7.35. Узел Б: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле Б; б) относительные деформации элементов фермы для узла Б

Относительные деформации элементов для узла В верхнего пояса приведены на рис. 7.36. В элементах верхнего пояса конструкции возникали сжимающие деформации, которые в среднем составили 0,00245 μ мм/мм. В стойке возникли сжимающие деформации, составляющие 0,000549 μ мм/мм.

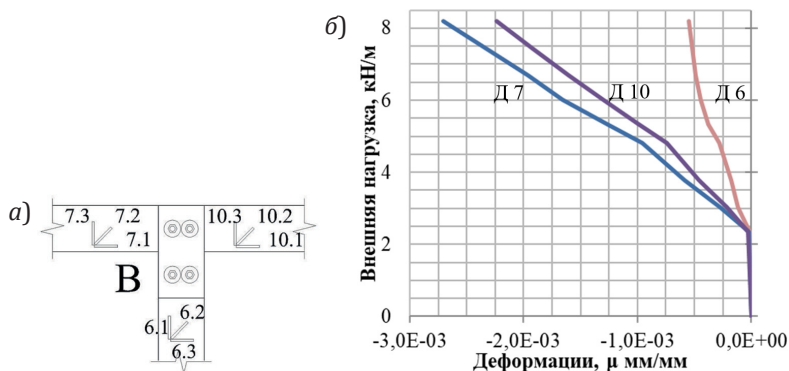


Рис. 7.36. Узел В: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле В; б) относительные деформации элементов фермы для узла В

Для узла Г нижнего пояса относительные деформации элементов представлены на рис. 7.37. В раскосах, соединяющих узлы Г и Д возникали сжимающие деформации, которые в среднем составили $0,000516 \mu \text{ мм/мм}$. Разница между показаниями ветвей этих раскосов объясняется неравномерным

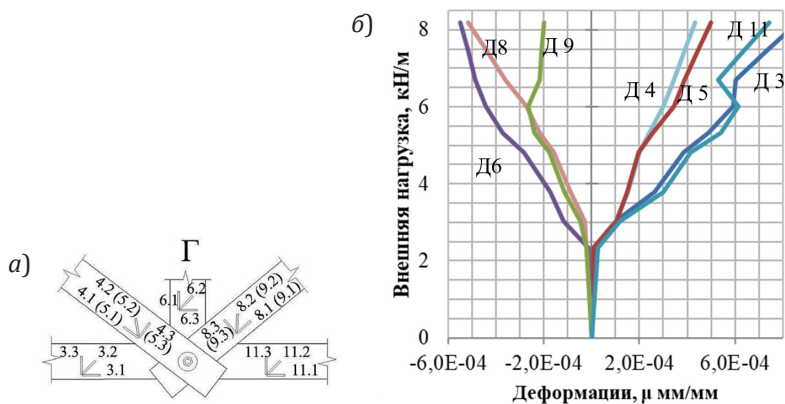


Рис. 7.37. Узел Г: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле Г; б) относительные деформации элементов фермы для узла Г

перераспределением нагрузок ввиду малых усилий в данных стержнях, которых недостаточно для равномерной обжимки узлов. В нижнем поясе по центру конструкции возникали растягивающие деформации, составляющие $0,000741 \mu\text{ м/мм}$. По сравнению с элементами верхнего пояса градиент развития деформаций нижнего пояса был ниже. Для него скорость деформирования ниже скорости деформирования элементов верхнего пояса в 3,3 раза.

Для узла Д верхнего пояса результаты измерений относительных деформаций элементов представлены на рис. 7.38. По сравнению с элементами верхнего пояса градиент развития деформаций раскосов данного узла был ниже. Для них скорость деформирования ниже скорости деформирования элемента верхнего пояса в 4,1 раза.

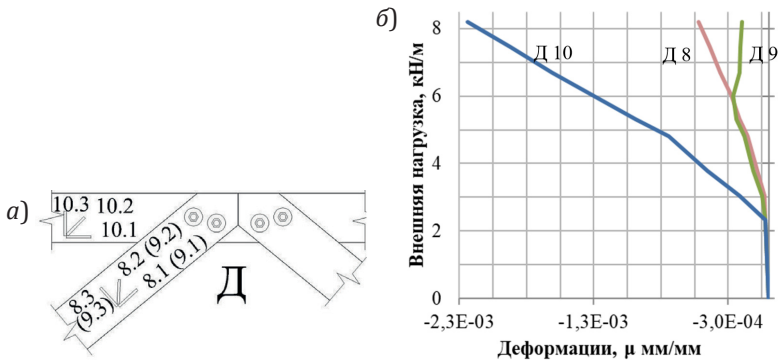


Рис. 7.38. Узел Д: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле Д; б) относительные деформации элементов фермы для узла Д

Разрушение узлов характерно для хрупкого типа разрушения. Время приведенного действия нагрузки t :

$$t = 0,02t'_1 + t_2 = 0,02 \cdot 21900 + 720 = 1158 \text{ с,}$$

где t'_1 – время доведения нагрузки до разрушающей величины; t_2 – время, в течение которого конструкция выдерживала разрушающую нагрузку.

Коэффициент безопасности для хрупкого разрушения K_{xp} для оценки несущей способности испытанной конструкции вычислен по формуле:

$$K_{xp} = 1,25 \cdot (1,88 - 0,106 \lg t) = \\ = 1,25 \cdot (1,88 - 0,106 \lg(1158)) = 2,302.$$

По результатам испытаний отношение уровня разрушающей нагрузки I_t к расчетной P_n составило:

$$I_t/P_n = 15,48/6,68 = 2,317,$$

что больше вычисленного коэффициента безопасности ($2,317 > 2,302$). Для конструкций с вдавливаемыми элементами соединений, таких как фермы с когтевыми шайбами, рекомендуется выполнять проверку на выполнение условий [82]:

$$P_{I-II}/P_n = 9,67/6,68 = 1,448 > 1,2.$$

Так как конструкция выдерживала разрушающую нагрузку I_t в течении времени t , то длительная несущая способность I_T для расчетного срока эксплуатации 50 лет найдется как:

$$I_T = \frac{I_t}{B - C \lg t} = \frac{15,48}{2,1 - 0,12 \lg 1158} = 8,94 \text{ кН/м},$$

где B, C – постоянные коэффициенты для определения длительной прочности. Величина длительной нагрузки выше расчетной в 1,33 раза.

В механической лаборатории СПбГАСУ ранее Животовым Д. А. проводились исследования конструкций ферм из LVL с использованием нагельных соединений [134]. Сопоставляя эпюры прогибов нижнего пояса испытываемой данной конструкции и фермы, испытанной Животовым Д. А., можно отметить повышенную жесткость фермы с когтевыми шайбами в отличие от конструкции с соединениями на нагелях при уровне нагрузки до 8,19 кН/м. В среднем, узлы фермы на когтевых шайбах сместились на 9,5% меньше, чем аналогичная ферма при одинаковых нагрузках.

7.5. Расчет соединений ферм по предлагаемой методике

Предлагаемой методикой расчета предусмотрено проведение расчета стержневых конструкций с учетом снижения прочности соединений во времени, возможности образования пластического шарнира в когтях шайбы и нагеле с использованием метода конечных элементов.

Расчетная схема для рассчитываемой конструкции задавалась из учета реальных условий проведения эксперимента. Так, например, верхний и нижний пояса фермы заданы неразрезными стержнями, а присоединение раскосов и стоек закрепляются шарнирно. Расчетная схема представлена на рис. 7.39.

Для расчета были приняты следующие характеристики соединительных элементов: диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш} = 75$ мм, толщина металла когтевой шайбы $t = 1,2$ мм, высота когтя $h = 7,5$ мм, ширина когтя $b = 7$ мм, модуль упругости металла когтевой шайбы $E = 203000$ МПа, расчетное сопротивление изгибу когтя шайбы $R_u = 490$ МПа, диаметр нагеля $d = 16$ мм, модуль упругости металла нагеля $E = 208000$ МПа, расчетное сопротивление изгибу нагеля $R_u = 280$ МПа. Определение прочностных характеристик для элементов фермы из LVL принято по формулам (6.28–6.29) главы 6 с учетом времени приложения усилия, соответствующего кратковременному нагружению.

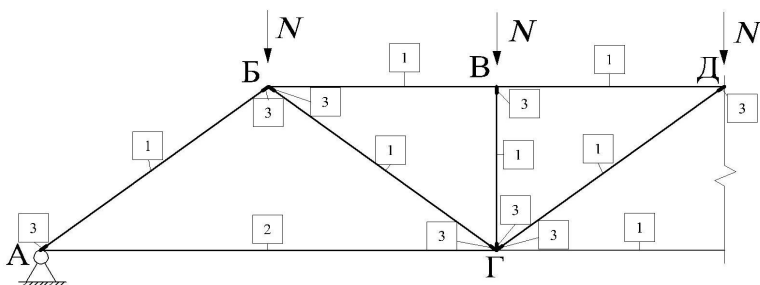


Рис. 7.39. Расчетная схема конструкции фермы: узлы обозначен буквенными символами, номер типа конечных элементов обведен в рамку

Были определены усилия и деформации в элементах конструкции без учета податливости узлов при передаче нагрузки за этап 4,81 кН/м (1-й случай) и 7,45 кН/м (2-й случай).

Сечения элементов были проверены на прочность по существующим нормативам [51].

Определена величина передаваемых усилий S на каждый узел. Исходя из существующей расстановки соединителей в узлах, были получены значения эквивалентных усилий восприятия срезом соединителей $S_{\text{ЭКВ}}$ для каждого узла.

Затем выполнялся расчет каждого узла с приложением начального усилия N_{01} с последующим догружением. При выполнении расчетов на каждом этапе нагружения контролировалось соблюдение условий (5.21–5.22). При достижении условий возникновения пластических шарниров в когтях шайбы изменялись начальные условия, при которых угол поворота сечения когтя $\varphi_0 \neq 0$. Когда достигались условия (5.42–5.45) уровень нагрузки N_n для нагеля или когтя шайбы принимался как максимально допустимый. Затем уровни нагрузки N_n для когтей шайбы складывались, образуя $N_{\text{к.ш}}$.

Для нагеля и когтевой шайбы определялись жесткости по выражениям (5.67–5.68), используя расчетное значение деформации Δ . Несущая способность нагеля $N_{\text{наг}}$ и когтевой шайбы $N_{\text{к.ш}}$ складывались, образуя F_{vRk} . Выполнялась проверка справедливости неравенства $F_{\text{vRk}} \geq S_{\text{ЭКВ}}$. Затем определялись фактические деформации, возникающие в расчетном узле.

Результаты перемещений узлов для верхнего и нижнего поясов приведены в табл. 7.6. Эпюры прогиба для экспериментальных и расчетных значений приведены на рис. 7.40–7.41.

Из табл. 7.6 и рис. 7.40–7.41 видно, что разница между теоретическими и экспериментальными значениями прогибов для уровня нагрузки 4,81 кН/м отличается на 35–50%, что вызвано особенностью методики расчетов для зоны упругих деформаций при малом времени загрузки (до

24 ч). Для уровня нагрузки 7,45 кН/м заметна разница в результатах от 1% до 23%, что является удовлетворительной сходимостью результатов. В прогибомерах П3 и П7 для уровня нагрузки 4,81 кН/м наблюдается разница в экспериментальных показаниях 25–29% между собой (несимметричная картина прогибов), что может являться следствием неравномерного включения в работу элементов фермы ввиду недостаточного уровня нагрузки для уплотнения гнезд соединений. Для уровня нагрузки 7,45 кН/м для прогибомера П6 наблюдается расхождение с теоретическими значениями в 23%, что может являться следствием дефекта изготовления элементов конструкции, неточностью сборки конструкции или неравномерностью передачи усилий от нагружающего пресса *Amsler*. Следствием одной из этих причин может объясняться неравномерность деформаций остальных узлов конструкции.

Таблица 7.6

Сопоставление результатов эксперимента и расчетов

№ прогибомера	Экспериментальное значение прогибов, мм		Теоретическое значение прогибов, мм		Сходимость результатов, %	
	4,81	7,45	4,81	7,45	4,81	7,45
Уровень нагрузки, кН/м	4,81	7,45	4,81	7,45	4,81	7,45
П1	2,575	6,23	4,367	6,904	41,04	9,76
П2	0	0	0	0	0,00	0
П3	3,95	12,63	8,725	13,795	54,73	8,45
П4	5,15	14,09	8,704	13,761	40,83	-2,39
П5	4,815	13,03	9,562	15,118	49,64	13,81
П6	3,963	10,58	8,725	13,795	54,58	23,31
П7	2,785	5,75	4,367	6,904	36,23	16,71
П8	4,03	13,69	8,704	13,761	53,70	0,52
П9	0	0	0	0	0	0

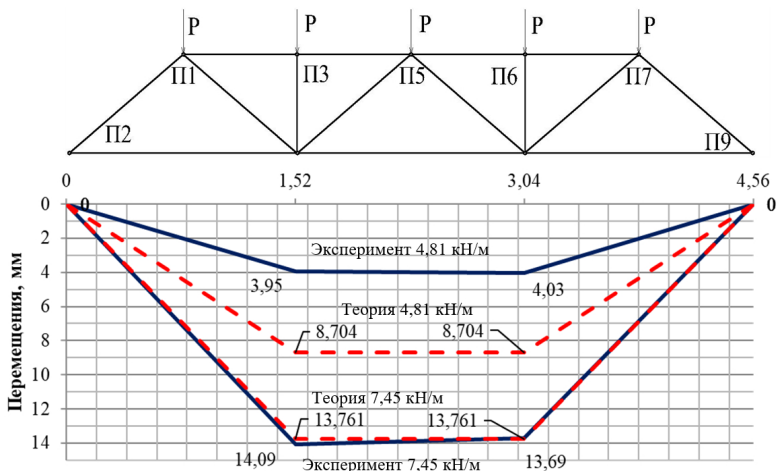


Рис. 7.40. Экспериментальные и теоретические эпюры прогибов узлов нижнего пояса фермы

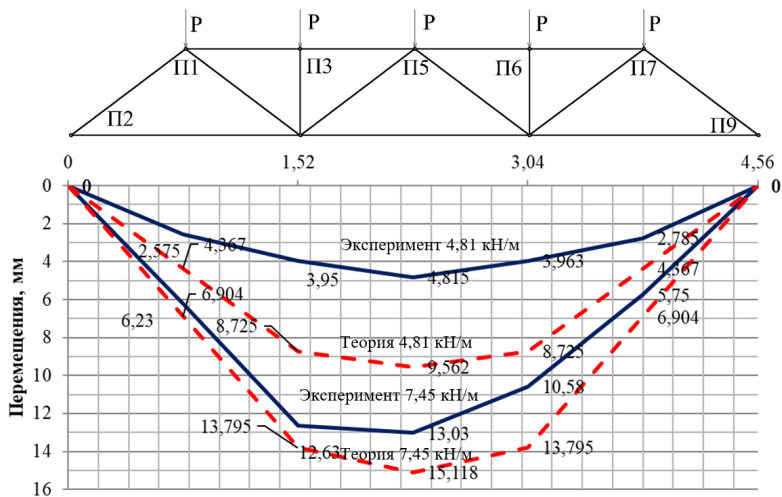


Рис. 7.41. Экспериментальные и теоретические эпюры прогибов узлов верхнего пояса фермы

Таким образом, в ходе экспериментальных и теоретических исследований были выявлены и сопоставлены деформации узлов конструкции фермы из клееного однонаправленного шпоночного бруса с использованием когтевых шайб. Точность расчета предлагаемой методики в области действия усилий N_{I-II} является приемлемой для применения при проектировании аналогичных конструкций.

7.6. Выводы по главе

1. Экспериментально доказана применимость разработанной методики расчета соединений *LVL* с когтевыми шайбами.

2. Определено изменение несущей способности при изменении толщин соединяемых элементов. Изменения толщины элементов *LVL* учитываются коэффициентом k_t при толщинах элементов $3h_e \leq t_{min} < 5,25h_e$.

3. Подтверждена справедливость используемой зависимости прилагаемого крутящего момента и получаемых угловых смещений, определена нелинейность характера зависимости. Получена высокая сходимость результатов расчетов и эксперимента: 6–10 %.

4. Установлено, что использование ядра мгновенного деформирования $K_0(t)$ позволяет учитывать влияние комплекса факторов и описывать характер изменения кривой ползучести соединений *LVL* с когтевыми шайбами во времени. Определена сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований при длительном нагружении соединений в 9–16 %.

5. Оценена технологичность возведения конструкций ферм из *LVL* с использованием когтевых шайб. Трудоемкость изготовления конструкции фермы составила 1,167 чел./ч на 1 пог. м пролета конструкции.

6. Подтверждена высокая прочность и жесткость ферм из *LVL* с когтевыми шайбами по результатам экспериментального исследования. Разрушение испытываемой конструкции произошло от раскалывания узлов при нагрузках,

в 2,317 раза превышающих расчетные, что больше необходимого коэффициента безопасности ($K_{\text{кр}} = 2,304$). При достижении расчетного усилия $\Pi_{\text{п}} = 6,68$ кН/м прогиб фермы составил 1/484 от пролета. Перераспределения в элементах фермы начинают возникать при уровне нагрузок 6,68 кН/м, при перемещении узлов конструкции в среднем на 9,5 мм.

7. Определена величина длительной нагрузки по результатам испытаний соединений *LVL* с когтевыми шайбами. Длительная нагрузка выше расчетной в 1,33 раза.

8. Установлена сходимость результатов экспериментальных и теоретических исследований в 1–23%. Доказана пригодность теоретической модели для использования в инженерной практике.

9. Разработана полезная модель прессы для соединений с когтевыми шайбами (№ 146232), повышающая надежность соединений и увеличивающая производительность их сборки.

Глава 8. Рекомендации по проектированию соединений с использованием когтевых шайб

1. При совместном использовании конструкций ферм из *LVL* и когтевых шайб обосновано использование дощатых ферм.

2. При использовании ферм на больших пролетах обосновано использование многоветвевых стержней дощатых ферм с деревянными прокладками.

3. Слабонагруженные элементы решетки фермы допустимо выполнять из деревянных элементов, а в слабонагруженных узлах возможно использование когтевых шайб меньших диаметров или использовать расчетное количество нагелей без когтевых шайб.

4. При сборке конструкций обосновано использование средств механизации труда для увеличения производительности производства. Многонагельные соединения конструкций с использованием когтевых шайб могут изготавливаться с использованием универсального прессы (Авторское свидетельство № 146232). Предлагаемый пресс позволяет повысить надежность соединения за счет обеспечения равномерной передачи усилий запрессовки и их равномерного распределения по поверхности соединяемых деревянных конструкций, что позволяет обеспечить запрессовку деревянных конструкций одновременно несколькими парами когтевых шайб. Пресс обеспечивает сохранение усилий запрессовки до завершения производства работ по сплачиванию элементов деревянных конструкций.

5. Шаг расстановки когтевых шайб в конструкциях из *LVL* рекомендуется принимать вдоль волокон $2 d_c$, поперек волокон $1,2 d_c$, до ненагруженного края $1 d_c$.

6. Соединения с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL* не рекомендуется использовать в химически агрессивной среде.

7. Из-за внутреннего расположения когтевых шайб в теле древесины к ним не могут применяться пожарные ограничения, накладываемые к открытым металлическим соединителям.

8. Соединения с когтевыми шайбами не рекомендуются к совместному использованию с глухарями, дюбелями с постановкой с двух сторон, ввиду необходимости закрепления узла цельным соединителем и недопущения раскрытия стыка соединяемых элементов.

9. Не рекомендуется использование нарезной шпильки по DIN 975 в качестве нагелей в соединениях *LVL* с когтевыми шайбами, ввиду возникновения большей податливости в соединениях по сравнению с гладкой шпилькой по ГОСТ 22042-76*.

10. В узлах нагельных соединений *LVL* с когтевыми шайбами рекомендуется использование принципа дробности для уменьшения опасности возникновения скалывающих напряжений путем рассредоточения большего числа соединителей меньшей несущей способности.

11. Для ферм из *LVL* с когтевыми шайбами обосновано использование строительного подъема $l/200$.

12. Для повышения экономического эффекта от использования когтевых шайб в конструкциях из *LVL* обосновано использование максимального количества когтевых шайб на 1 соединительный нагель.

13. Наиболее рациональным соотношением толщин элементов и высоты когтей шайбы является использование соотношения $t = 5,25h_e$, при котором наиболее просто осуществляется равнопрочность сечений элементов конструкций и узла соединения.

14. Когтевые шайбы рекомендуются к использованию при усилении и реконструкции деревянных конструкций, когда есть доступ к рабочей поверхности сверху или снизу реконструируемого элемента.

15. При выполнении работ по устройству когтевых шайб в проектное положение рекомендуется оформлять акт скрытых работ.

Заключение **(Выводы и Практические рекомендации)**

Повышения прочности деревянных балок можно добиться за счет использования напряженно деформированного состояния стволов деревьев, сформировавшегося в процессе их роста.

В данной работе были изучены проблемы появления начальных напряжений в древесине, их влияние на качество и прочность строительных конструкций и их деталей; разработаны математические модели изгибающих моментов по пласти и по кромке от действия начальных напряжений при распределении их по объему ствола по закону параболоида 4-го порядка; исследованы суммарные напряжения в клееных деревянных балках, изготовленных из досок разной толщины, с учетом начальных напряжений; экспериментально определены пределы прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон на примере одной из пород древесины; изучено влияние положения годичных слоев склеиваемых деревянных балок на их грузоподъемность и качество.

По полученным математическим моделям при использовании тех же заготовок для строительных деревянных конструкций (т. е. без дополнительных капитальных затрат) можно составить компьютерные программы наиболее рациональных вариантов составления и склейки клееных балок, тем самым повышая грузоподъемность одной доски (при учете ориентации годовых колец) до 25%, а всей балки – до 2 раз; а при учете толщины склеиваемых заготовок – до 17% при использовании более тонких досок.

Разработана методика расчета деревянных конструкций с соединениями на когтевых шайбах по алгоритму, который учитывает действие кратковременных и длительных

нагрузок, а также описывает сложный характер работы соединений из *LVL* с когтевыми шайбами во времени за счет использования теории наследственности.

Разработана математическая модель, позволяющая вычислить НДС конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами с учетом возможных смещений в узлах конструкции. Модель позволяет реализовать расчет с помощью известных программных средств.

Установлены и уточнены необходимые прочностные и жесткостные параметры свойств материала соединителей и *LVL* при кратковременных и длительных статических нагрузках для использования в методике расчета соединений конструкций. Получены уравнения наследственности *LVL* при действии длительных нагрузок, определяющие развитие деформативности материала во времени с учетом его влажности, коэффициенты постели *LVL* от действия треугольным и цилиндрическим штампом, длительную прочность *LVL*.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования соединений *LVL* с когтевыми шайбами на действие продольного, поперечного усилия и изгибающего момента.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования фермы с параллельными поясами из *LVL* с когтевыми шайбами на действие статической нагрузки. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов составляет 9–12%.

Библиографический список

1. ГОСТ 16483.10-73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон.
2. ГОСТ 8486-86. Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия. – Введ. 1986-11-30. – М.: изд-во стандартов, 1986. – 10 с.
3. ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности. – М., 1971. 84 с.
4. СП 64-13330-2011: Свод правил. Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М.: Минрегион России, 2011.
5. Белов С. В. Ветер – главный фактор, определяющий форму стволов деревьев и их устойчивость / С. В. Белов // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Вып. III. – Л., 1974. – С. 3–24.
6. *Волынский В. Н.* Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины. Архангельск: АГТУ, 2006. – 196 с.
7. *Глухих В. Н., Акопян А. Л.* Начальные напряжения в древесине: моногр. – СПб.: СПбГАСУ, 2016. – 118 с.
8. *Глухих В. Н.* К вопросу о напряжениях роста в дереве / В. Н. Глухих, А. Л. Акопян // Современные проблемы переработки древесины: матер. Междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – 185 с.
9. *Glukhikh V. N.* Change in wood strength under static bending and compression along fibers in the process of tree growth // Architecture and Engineering. – 2017. – № 2 (1). – С. 24–31.
10. *Глухих В. Н., Черных А. Г.* Анизотропия древесины. Технологический аспект: моногр. / В. Н. Глухих, А. Г. Черных; СПбГАСУ. – СПб., 2013. – 240 с.
11. *Глухих В. Н., Кирютина С. Е., Богданова А. А.* Влияние начальных напряжений в древесине на прочность и формоустойчивость деревянных конструкций // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – № 4(49). – С. 600–606.
12. *Григорович В. К.* О наивыгоднейшем направлении волокон в изделиях из анизотропных материалов / В. К. Григорович // ДАН СССР. – Т. 86. – № 4. – 1952. – С. 152–160.
13. *Иванов Л. А.* О влиянии ветра на рост дерева // Ботанический журнал СССР. Т. 13. № 3.
14. *Кузнецов А. И.* Внутренние напряжения в древесине / А. И. Кузнецов. – М.: ГЛБИ, 1950. – 60 с.
15. *Раздорский В. Ф.* Принципы строения скелета растений // Природа, № 9. – 1934.
16. *Темнов В. Г.* Бионический принцип регулирования параметров напряженно-деформированного состояния конструктивных систем при их

проектировании и эксплуатации / В. Г. Темнов // Матер. 53-й науч. конф.; СПбГАСУ. – СПб., 1996.

17. Темнов В. Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике. СПб.: Компьютербург, 2001. – 61 с.

18. Jlinen A. Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume. Technische Hochschule in Finland. Wissenschaftliche Forschungen, vol. 6, 51 p.

19. Jlinen A. Über den Einfluss des Spatholzteilens und der Rohwichte auf die Elastizitätsmoduln die Poussonschen Konstanten und die Schubmoduln bei Holz mit ausgeprägten Jahrringbau / Technische Hochschule in Finland. Wissenschaftliche Forschungen, 1956. – № 9.

20. Kübler H. Die Ursache der Wachstumspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung. Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 17, Issue 1. Pp. 1–9.

21. Леннов В. Г. Индустриальные деревянные фермы на когтевых шайбах: дис. ... канд. техн. наук. – Горький, 1941. – 289 с.

22. H. J. Larsen. Industrial Processes. Building and civil engineering. Timber structures. Luxemburg. 1989, 350 p.

23. Стандарт Ассоциации деревянного домостроения СТАДД-3.2–2011 «Деревянные конструкции. Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. СПб., 2012. – 59 с.

24. EN 912, Timber fasteners - Specifications for connectors for timbers; German version EN 912:2011.

25. Янушкевич А. Н. Авторское свидетельство на изобретение № 30419. Заявка от 15.08.1932.

26. http://www.expamet.co.uk/webfm_send/189

27. Rimantas C. Slip of “Bulldog”-type toothed-plate connectors in steel-timber joints of open-web girders. Journal of civil engineering and management. Vilnius, 2004.

28. Серов Е. Н., Черных А. Г., Серов А. Е., Соломаха А. Ю., Храмов К. С. Строительные нормы проектирования деревянных конструкций. Состояние, проблемы и перспективы // Вестник гражданских инженеров. – № 2. – СПб., 2012. – с. 107–114.

29. Лабудин Б. В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой. – Архангельск, 2007. – 267 с.

30. Detail. Review of Architecture + Construction Details. Vol. 2, 1975, 57 p.

31. Detail. Review of Architecture + Construction Details. Vol. 5, 1977, 62 p.

32. Holzbau. Construction Details. Vol. 4, 1973, 84 p.

33. <http://www.wikipedia.com>

34. Allen, Edward and Joseph Iano. Fundamentals of Building Construction: Fourth Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. pg. 91.

35. Дмитриев П. А. Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях при кратковременном и длительном действии нагрузки / П. А. Дмитриев // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1965. – № 12. – С. 165–172.

36. Дмитриев П. А. Исследование работы и расчет сопряжений деревянных элементов под углом на нагелях из круглой стали / П. А. Дмитриев // Сб. тр. Моск. инж.-строит. института. – 1953. – № 13. – С. 47–51.

37. *Дмитриев П. А.* Пространственные промышленные конструкции для покрытий и зданий / П. А. Дмитриев, В. И. Жаданов, И. С. Инжутов, Ю. Д. Стрижаков // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1989. – № 2. – С. 23–27.
38. *Дмитриев П. А.* Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях поперек волокон при действии кратковременной и длительной нагрузок / П. А. Дмитриев, Ю. Д. Стрижаков // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1967. – № 7. – С. 28–35.
39. *Дмитриев П. А.* Исследование деревянных элементов на дюбелях при действии кратковременных нагрузок / П. А. Дмитриев, Ю. Д. Стрижаков // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1969. – № 8. – С. 41–49.
40. *Михайлов Б. К., Шешукова Н. В.* Длительная прочность и деформативность деревянных конструкций на нагельных соединениях. – СПб., 2006. – 159 с.
41. *Михайлов Б. К.* Метод определения упругих остаточных и полных деформаций элементов деревянных конструкций, проработавших длительное время в зданиях старой постройки, в связи с оценкой ресурса // 54-я науч. конф. – СПб., 1997.
42. *Шешукова Н. В.* Несущая способность и деформативность нагельных соединений деревянных конструкций при циклическом нагружении. – СПб., 2001. – 156 с.
43. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М., Наука, 1966. – 752 с.
44. *Kangas J.* Anchorage capacity of nail plate joints. “Stiffness of the nail plate trusses”, Sepa seminar, Tallinn, 1991, p. 27–35.
45. *Kangas, J.* Latest proposals and drafts for Eurocode 5 in designing and testing of nail plate joint, Conference on design and construction of timber structures assembled with metal connector plate and/or driven fasteners in Kirov. 1992. p. 11.
46. *Keskkula T.* Durability of nail plate trusses in agricultural buildings. “Stiffness of the nail plate trusses”, Sepa seminar, Tallinn, 1991, p. 58–64.
47. *Kevarimaki A.* Capacity of support areas reinforced with nail plates in trussed rafters. “Stiffness of the nail plate trusses”, Sepa seminar, Tallinn, 1991, p. 43–53.
48. *Leivo M.* On the stiffness changes in nail plate trusses. “Stiffness of the nail plate trusses”, Sepa seminar, Tallinn, 1991, p. 2–24.
49. ЦНИИСК Кучеренко В. А. Рекомендации по проектированию и изготовлению деревянных конструкций с соединениями на пластинах с цилиндрическими нагельями (система КирПИ-ЦНИИСК). – М., 1988.
50. ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП-Н-25-80). – М., Стройиздат, 1986.
51. ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. Руководство по проектированию клееных деревянных конструкций. – М., Стройиздат, 1977.
52. *Kuipers J. and Kurstjens P. B. J.* Creep and damage research on timber joints. Part one. Rapport 4-86-15-HD-23. Stevin-Laboratorium. Delft University of Technology, Netherlands, 1986.

53. *Kurstjens P. B. J.* Creep and damage research on timber joints. Part two. Rapport 25.4-89-15 C HD-24, Stevin-Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands.

54. *Kurstjens P. B. J.* Creep and damage research on timber joints. Part three. Rapport 25.4-90-12 C HD-26, Stevin-Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands.

55. *Kurstjens P. B. J.* and *Stolle P.* Creep and damage research on timber joints. Part four. Rapport 25.4-91-06/C HD-28, Stevin-Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands, 1991.

56. *Frech P.* and *Kolb H.* Test of Bulldog-type connectors. Test results H 30471 (Prufung von Bulldog-Holzverbindern PrUfzeugnis H 30471). Otto-Graf Institute of Stuttgart University, 1971 (in German).

57. *Blass J. H., Ehlbeck J.* and *Schlager M.* Characteristic strength of toothed-plate connector joints. Holz als Roh und Werkstoff, 51, 1993, p. 395–399.

58. *Blass H. J., Aune P., Choo B. S.; Grolacher R., Griffith, D. R., Hilson B. O., Racher P.* and *Steck G.* Timber Engineering. Netherlands: Centrum Hout, 1995.

59. Eurocode 5. Design of timber structures. Part: General rules and rules for buildings. ENV 1995-1-1. Brussels: CEN, 1993. 133 p.

60. *Hirashima, Y.* Lateral resistance of timber connector joints parallel to grain direction. In: Proceedings of the International Engineering Conference, Vol. 1: 254–261, Tokyo, 1990.

61. *C. J. Mettem, A. V. Page, G. Davis.* Validatory tests and proposed design formulae for the load-carrying capacity of toothed-plate connected joints. International council for building research studies and documentation working commission W18 - timber structures. TRADA Technology Limited United Kingdom 1993.

62. *Blass H. J.* and *Schlager M.* Trial calculations for determination of the load-carrying capacity of joints with Bulldog connectors. CEN/TC 124/WG4 N23, April 1993.

63. *Rimantas C.* Slip of “Bulldog”-type toothed-plate connectors in steel-timber joints of open-web girders. Journal of civil engineering and management. Vilnius, 2004.

64. *Дурновский А. М.* Разработка и исследование соединений деревянных конструкций металлическими зубчатыми пластинами. – М., 1982. – 22 с.

65. *Ценаев В. А.* Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах. – М., 1982. – 24 с.

66. *Ермолаев В. В.* Влияние влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах. – Казань, 2009. – 20 с.

67. *Крицин А. В.* Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дисс. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2004. – 180 с.

68. *Котлов В. Г.* Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями на МЗП. – Казань, 1992. – 16 с.

69. *Крицин А. В.* Расчет сквозных деревянных конструкций на МЗП с учетом упруго-вязких и пластических деформаций. – Н. Новгород, 2004. – 26 с.

70. *Лоскутова Д. В.* Прочность и деформативность узловых соединений на МЗП в сквозных деревянных конструкциях. – Томск, 2009. – 24 с.
71. СП 64.13330–2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – Стройиздат, 2011. – 89 с.
72. *Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Тарлаковский Д. В.* Теория упругости и пластичности. М., 2011. 416 с.
73. *Волков И. К., Канатников А. Н.* Интегральные преобразования и операционное исчисление: учеб. для вузов / 2-е изд. — М., МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 228 с.
74. *Никитин Г. Г.* Расчет нагельных соединений с учетом деформаций, развивающихся во времени: дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1964. –192 с.
75. *Перельмутер А. В., Сливкер В. И.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – 4-е изд., перераб. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
76. *Коченов В. М.* Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1953. – 319 с.
77. *Панферов К. В.* Смятие и сжатие деревянных элементов поперек волокон при длительной нагрузке / в кн.: Вопросы применения дерева и пластических масс в строительстве. – М., 1960. – 216 с.
78. *Наумов А. К.* Исследование соединений легких деревянных несущих конструкций на металлических зубчатых пластинах: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1978. – 143 с.
79. *Дмитриев П. А., Стрижаков Ю. Д.* Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях поперек волокон при действии кратковременных и длительных нагрузок // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1969. – № 7. – С. 22–28.
80. *Дмитриев П. А., Жилкин В. А., Стрижаков Ю. Д.* Исследование смятия древесины в отверстиях с помощью оптически чувствительных покрытий // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1971. – № 2. – С. 18–24.
81. *Дмитриев П. А.* Исследование длительной несущей способности соединений деревянных элементов на стальных цилиндрических нагелях // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1973. – № 5. – С. 28–35.
82. *Ценаев В. А.* Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах: дис. ... канд. тех. наук. – М., 1982. – 201 с.
83. *Ценаев В. А.* Расчет соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах по деформациям с учетом фактора времени // Инженерно-теоретические основы строительства. Экспресс-информ. – ВНИИИС Госстроя СССР, сер. 10, 1984. – Вып. 8. – С. 9-31.
84. *Ценаев В. А.* Контроль деформативности соединений на металлических зубчатых пластинах // Механическая обработка древесины. – 1985. – № 2. – С. 15–16.
85. *Ценаев В. А.* Контроль деформативности соединений на металлических зубчатых пластинах // Механическая обработка древесины: науч.-техн. реф. сб. –М.: ВНИПИЭИлеспром, 1985. – Вып. 2. – С. 15–16.

86. *Ценаев В. А.* Прогнозирование деформативности соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах для заданного срока службы конструкций // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1985. – № 6. – С. 18–21.
87. *Ценаев В. А.* Оценка несущей способности и деформативности соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах // Инженерно-теоретические основы строительства. Экспресс-информ. – ВНИИИС Госстроя СССР, сер. 10, 1987. – Вып. 3. – С. 6–9.
88. *Ценаев В. А.* Длительная прочность и деформативность конструкционных древесно-цементных материалов и несущих элементов на их основе: дис. ... д-р техн. наук. – Нижний Новгород, 2001. – 480 с.
89. *Ценаев В. А.* Оценка прочности древесины при реконструкции эксплуатируемых зданий // Жилищное строительство, 2001. – № 3. – С. 11–13.
90. *Ценаев В. А.* Учет температурно-влажностного состояния древесины в поверочных расчетах эксплуатируемых конструкций покрытия неотапливаемых чердачных помещений // Промышленное и гражданское строительство, 2001. – № 12. – С. 30–31.
91. *Ценаев В. А.* Оценка модуля упругости древесины конструкций // Жилищное строительство, 2003. – № 2. – С. 11–13.
92. *Авдеев А. В., Миронов В. Г.* Влияние влажности древесины на несущую способность соединений на металлических зубчатых пластинах // Сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых «Строительные конструкции-2000». Ч. 3. «Конструкции из дерева и пластмасс. Строительная механика». – М., МГСУ, 2000. – С. 17–23.
93. *Ашкенази Е. К.* Прочность анизотропных древесных и синтетических материалов. – М.: Лесная промышленность, 1966. – 166 с.
94. ГОСТ 16483.2–70*. Древесина. Метод определения условного предела прочности при местном смятии поперек волокон.
95. ГОСТ 16483.10–73*. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон.
96. ГОСТ 16483.9–73*. Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе.
97. ГОСТ 16483.7–71. Древесина. Методы определения влажности.
98. *Zhou H. Z., Zhu E. C., Wang S. W.* Creep of LVL and Its Effect on the Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, China.
99. *Matthew Davies, Massimo Fragiaco.* Long-term behaviour of laminated veneer lumber members prestressed with unbonded tendons, NZ Timber design journal, volume 16 issue, p. 13–19.
100. *Hugh Morris, Pierre Quenneville.* Moment deformation of multi-nailed joints in LVL - development of a long term test procedure, WCTE 2010.
101. *Myriam Chaplain, Gérard Valentin, Alaa Chateauneuf.* Modelling relative humidity effect on load duration of timber beams, University of Bordeaux Bordeaux, France.
102. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / ЦНИИСК. М.: Стройиздат, 1976. – 28 с.
103. *Пуртов В. В.* Монтаж деревянных конструкций. – Новосибирск, НГАСУ, Сибстрин, 2005. – 72 с.

104. Орлович Р. Б. О напряженно-деформированном состоянии увлажненных деревянных элементов при длительном нагружении // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1984. – № 2. – С. 15–19.
105. Орлович Р. Б. Длительная прочность и деформативность конструкций из современных древесных материалов при основных эксплуатационных воздействиях: 05.23.01: автореф. дис. д-р. техн. наук. – Л., ЛИСИ, 1991. – 50 с.
106. Стрижаков Ю. Д. Исследование работы и расчет соединений деревянных элементов под углом на нагелях из стеклопластика АГ-С при действии кратковременных и длительных нагрузок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1971. – 170 с.
107. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. – М.: Стройиздат, 1968. – 415 с.
108. Ржаницын А. Р. Строительная механика: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 400 с.
109. РСН 32–81. Временная инструкция расчета деревянных ферм с креплением узлов на металлических зубчатых пластинах. – Рига, 1981. – 66 с.
110. Самохина И. А. Исследование ползучести стеклопластиков и конструкций на их основе при некоторых условия загрузки. – М., 1971. – 18 с.
111. Смирнов А. Ф., Александров А. В., Шапошников Н. Н., Лащеников Б. Я. Расчет сооружений с применением вычислительных машин. – М., 1964.
112. СНиП И-25–80*. Деревянные конструкции. Нормы проектирования // Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1988. – 31 с.
113. Сопrotивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов: учебник / А. Е. Саргсян. – М.: изд-во АСВ, 1998. – 240 с.
114. EN 10139:1997 Cold rolled uncoated mild steel narrow strip for cold forming.
115. EN 10268:2006 Cold rolled steel flat products with high yield strength for cold forming.
116. ГОСТ 380–94. Сталь углеродистая обыкновенного качества.
117. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М., 1986. – 29 с.
118. ГОСТ 11701–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. М., 1984. – 15 с.
119. Иванов Ю. М. О предельных состояниях деревянных элементов соединений и конструкций. М., Стройиздат, 1947. – 99 с.
120. Иванов Ю. М. Предел пластического течения древесины. – М.-Л., Стройиздат, 1948.
121. Иванов Ю. М. Работа древесины под действием повторной статической нагрузки / в кн.: Исследования по деревянным конструкциям. – М., 1950. – с. 6–27.
122. Иванов Ю. М. Вопросы прочности и изготовления деревянных конструкций. – М., Госиздат по строительству и архитектуре, 1952. – 264 с.

123. *Иванов Ю. М.* Современное состояние исследований длительно-го сопротивления древесины / в кн.: Исследование прочности и деформативности древесины. – М., Стройиздат, 1956. – с. 42–55.
124. *Иванов Ю. М., Баженов В. А.* Исследование физических свойств древесины (эластичность, воздухопроницаемость, давление набухания). – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. – 75 с.
125. *Иванов Ю. М.* Исследовательские работы по древесине и деревянным конструкциям в Англии. – М.: ЦНИИИТЭИлеспрома, 1966. – 34 с.
126. *Иванов Ю. М.* Длительная прочность древесины // Изв. вузов. Лесной журнал, 1972. – № 4. – С. 76–82.
127. *Иванов Ю. М.* Длительная несущая способность деревянных конструкций // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1972. – № 11. – С. 6–12.
128. *Иванов Ю. М.* Основные принципы испытания клееных деревянных конструкций // Деревообрабатывающая промышленность, 1974. – № 2. – С. 10–12.
129. *Blaas H. J., Ehlbeck J., Schlager M.* Characteristic strength of tooth-plate connector joints Sweden, 1992, 11 p.
130. *Данилов Е. В., Гимельфарб И. А., Крупин Е. В., Черных А. Г.* Патент на полезную модель № 146232. Заявка № 2014123970/13 от 10.06.2014.
131. *Van de Kuilen, J-W.G.* Duration of load effects in timber joints, Dissertation Delft University of Technology, 1999. Van de Kuilen, J-W.G. Creep of timber joints Delft University of Technology, The Netherlands.
132. ГОСТ 16483.24–73*. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии вдоль волокон.
133. *Барков М. С.* Совершенствование узловых сопряжений деревянных элементов через упоры переменной жесткости для большепролетных ферм: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2013. – 182 с.
134. *Животов Д. А.* Применение бруса, клееного из однонаправленного шпона, в плоских балочных фермах: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2009. – 170 с.
135. *Данилов Е. В.* Исследование кратковременной прочности LVL при смятии треугольным штампом // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 1 (42). – С. 28–33.
136. *Данилов Е. В.* Исследование длительной прочности LVL при смятии цилиндрическим штампом // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 4 (45). – С. 38–42.
137. *Данилов Е. В., Черных А. Г.* Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2.
138. *Черных А. Г., Данилов Е. В., Григорьев К. С., Коваль П. С., Бакрышева В. В., Кашапов И. Т.* К вопросу определения несущей способности нагельных соединений в конструкциях из бруса, клееного из однонаправленного шпона (LVL) // Современные проблемы науки и образования, 2012. – № 4.
139. *Данилов Е. В.* Расчет зуба когтевой шпонки как балки на упругом основании // Сб. науч. тр. XVII Междунар. симпозиума «Современные строительные конструкции из металла и древесины». – Одесса, 2013.

140. Данилов Е. В. Определение сопротивления давлению на внутреннюю поверхность отверстия и коэффициента балластной постели для цельной древесины и клееного бруса «Ultralam» // Тезисы I-ой международной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Инновационные технологии строительства». СФУ, Красноярск, 2011.
141. Данилов Е. В. Определение прочности и базовых величин для соединений на металлических пластинах типа «Bulldog» для цельной древесины и клееного бруса «Ultralam» // Сб. докладов «Актуальные проблемы современного строительства». – СПб., СПбГАСУ, 2012.
142. Данилов Е. В. к вопросу об НДС нагельных соединений из LVL // Сб. науч. тр., посв. 180-летию СПбГАСУ. – СПб., СПбГАСУ, 2012.
143. Данилов Е. В. Расчет зуба когтевой шпонки как балки на упругом основании // Сб. докладов «Актуальные проблемы современного строительства». – СПб., СПбГАСУ, 2013.
144. Данилов Е. В., Пониткова Д. И., Подболоцкая А. С. Исследование крутильной жесткости соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из клееного бруса // Сб. докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПб., СПбГАСУ, 2014.
145. Данилов Е. В. К расчету прочности соединений на когтевых пластинах. Сайт Ассоциации деревянного домостроения. <http://www.npadd.ru/page/3010-k-raschetu-prochnosti-soedineniy-na>.
146. Данилов Е. В. Определение линейной жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в бруссе LVL // Вестник гражданских инженеров, 2017. – № 2 (61). – С. 81–85.
147. Ковальчук Л. М., Турковский С. Б., Пискунов Ю. В. Деревянные конструкции в строительстве. – М., Госиздат по строительству и архитектуре, 1995. – 247 с.
148. Инструкция по проектированию и изготовлению ферм малых пролетов системы инженера В. С. Деревягина. – М., Стройиздат наркомстроя, 1940. – 16 с.
149. Складывающиеся индустриальные деревянные конструкции. – Новосибирск, Строительный институт им. В. В. Куйбышева, 1982. – 64 с.
150. Лабудин Б. В., Гурьев А. Ю., Каратеев Л. П., Мамедов Ш. М. Металлодеревянные фермы: учеб. пособие // САФУ-СПбГАСУ. – СПб.: Свое издательство, 2015. – 206 с.
151. СТО 36554501-021-2010. Деревянные конструкции. Многослойный клееный из шпона материал Ultralam (Ультралам). Общие технические требования.

Приложение А. Таблицы расчетов

По формулам изгибающих моментов на концах доски по пласти и по кромке, выведенных в главе 2, а также согласно расчету, позволяющему провести сравнение повышения грузоподъемности балки при изменении ориентации годовых слоев досок в пакете клееной балки, были проведены расчеты для нескольких досок, выпиленных из бревен, отличающимися друг от друга следующими характеристиками:

- сортность древесины (были учтены бревна I, II, III сортов);
- величина сбега бревна (разница между верхним и нижним диаметром бревна составляла 100 и 50 мм);
- значения верхнего и нижнего радиусов бревна $R_{\text{верх}}$ и $R_{\text{ниж}}$ (использовались следующие соотношения: 150 и 250 мм; 150 и 200 мм; 200 и 250 мм).

Длина всех бревен составляет 6 м.

Выпиливаемые доски, участвующие в расчете, дифференцируются по следующим характеристикам:

- толщина досок колеблется от 10 до 50 мм;
- ширина досок была принята единой (100 мм);
- координаты расположения доски по пласти доски: от 0 до 60 мм с шагом 30 мм от центра бревна;
- координаты расположения доски по кромке доски: 0, 20 и 50 мм от центра бревна.

Значение σ_0 (напряжение в центре бревна) было принято равным 11,613 МПа, в соответствии с данными [9] и рис. 2.14:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{\text{вс}}}{1,826} = \frac{21,2}{1,826} = 11,613 \text{ МПа.}$$

Результаты расчетов сведены в таблицы, приведенные далее, исходные данные к каждой приведены в заголовках таблиц, где n – относительное повышение грузоподъемности одной доски; S – ширина доски.

Приложение А

Таблица А1

$R^{\text{верх}} = 150 \text{ мм}; R^{\text{низ}} = 250 \text{ мм}; \text{ сорт древесины} - \text{I} ([\sigma] = 14 \text{ МПа});$

$$k_4 = \frac{\sigma_R + \sigma_0}{R^4}; k_4^{\text{верх}} = 0,0688 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{низ}} = 0,0089 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

$R_1,$ мм	$R_2,$ мм	$a_1,$ мм	$a_2,$ мм	M_1 ($M_{z_0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{z_0}^{\text{низ}}$)	M_1 ($M_{y_0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{y_0}^{\text{низ}}$)	$S,$ мм	$n=$ q'/q	$\sigma_{\text{ср}},$ МПа	$\sigma_{\text{сж}},$ МПа	$\sigma_{\text{р}},$ МПа	
0	10	0	100	46,261	5,995	0,039	0,005	1,000	1,000	0,013	13,987	14,013	
		20	120	103,303	13,388	0,066	0,009	1,000	1,000	0,022	13,978	14,022	
		50	150	264,566	34,288	0,125	0,016	1,001	1,001	0,042	13,958	14,042	
		0	100	94,816	12,288	0,641	0,083	1,001	1,001	0,054	13,946	14,054	
		20	120	209,818	27,192	1,082	0,140	1,001	1,001	0,092	13,908	14,092	
		50	150	533,720	69,170	2,017	0,261	1,003	1,003	0,171	13,829	14,171	
	20	0	100	147,958	19,175	3,431	0,445	1,002	1,002	0,129	13,871	14,129	
		20	120	322,755	41,829	5,661	0,734	1,003	1,003	0,213	13,787	14,213	
		50	150	812,050	105,242	10,399	1,348	1,006	1,006	0,392	13,608	14,392	
		0	100	207,983	26,955	11,667	1,512	1,004	1,004	0,247	13,753	14,247	
		20	120	445,327	57,714	18,714	2,425	1,006	1,006	0,396	13,604	14,396	
		50	150	1104,143	143,097	33,688	4,366	1,011	1,011	0,714	13,286	14,714	
	30	0	100	277,183	35,923	31,064	4,026	1,007	1,007	0,421	13,579	14,421	
		20	120	580,746	75,265	48,268	6,256	1,010	1,010	0,654	13,346	14,654	
		50	150	1414,588	183,331	84,827	10,994	1,018	1,018	1,150	12,850	15,150	
		40	0	100	60,024	7,779	0,367	0,048	1,002	1,002	0,124	13,876	14,124
			20	120	122,572	15,885	0,560	0,073	1,003	1,003	0,190	13,810	14,190
			50	150	292,093	37,855	0,969	0,126	1,005	1,005	0,328	13,672	14,328
	0		100	129,224	16,747	3,665	0,475	1,005	1,005	0,311	13,689	14,311	
	20		120	257,990	33,436	5,427	0,703	1,007	1,007	0,460	13,540	14,460	
	50		150	602,538	78,089	9,171	1,189	1,012	1,012	0,777	13,223	14,777	
	50	0	100	209,894	27,202	15,311	1,984	1,009	1,009	0,576	13,424	14,576	
		20	120	409,466	53,067	22,000	2,851	1,013	1,013	0,828	13,172	14,828	
		50	150	935,922	121,295	36,214	4,693	1,021	1,021	1,364	12,636	15,364	
0		100	304,328	39,441	44,582	5,778	1,015	1,015	0,944	13,056	14,944		
20		120	580,210	75,195	62,199	8,061	1,020	1,020	1,317	12,683	15,317		
50		150	1296,833	168,070	99,636	12,913	1,031	1,031	2,110	11,890	16,110		
60	0	100	414,818	53,760	106,190	13,762	1,022	1,022	1,439	12,561	15,439		
	20	120	773,435	100,237	144,039	18,668	1,029	1,029	1,952	12,048	15,952		
	50	150	1689,859	219,006	224,470	29,091	1,043	1,043	3,043	10,957	17,043		
	70	0	100	94,433	12,239	1,129	0,146	1,006	1,006	0,383	13,617	14,383	
		20	120	170,745	22,128	1,487	0,193	1,008	1,008	0,504	13,496	14,504	
		50	150	360,911	46,774	2,248	0,291	1,012	1,012	0,762	13,238	14,762	
0		100	204,924	26,558	10,654	1,381	1,014	1,014	0,903	13,097	14,903		
20		120	363,970	47,170	13,737	1,780	1,018	1,018	1,164	12,836	15,164		
50		150	753,937	97,710	20,288	2,629	1,026	1,026	1,719	12,281	15,719		
80	0	100	333,766	43,256	42,240	5,474	1,024	1,024	1,590	12,410	15,590		
	20	120	582,887	75,542	53,389	6,919	1,030	1,030	2,010	11,990	16,010		
	50	150	1183,666	153,403	77,079	9,989	1,041	1,041	2,902	11,098	16,902		
	0	100	483,254	62,630	117,136	15,181	1,036	1,036	2,481	11,519	16,481		
	20	120	830,707	107,660	145,324	18,834	1,043	1,043	3,078	10,922	17,078		
	50	150	1654,685	214,447	205,223	26,597	1,057	1,057	4,347	9,653	18,347		
90	0	100	655,680	84,976	266,478	34,536	1,049	1,049	3,612	10,388	17,612		
	20	120	1110,642	143,939	324,973	42,116	1,058	1,058	4,405	9,595	18,405		
	50	150	2171,583	281,437	449,275	58,226	1,075	1,075	6,090	7,910	20,090		
	100	0	100	94,433	12,239	1,129	0,146	1,006	1,006	0,383	13,617	14,383	
		20	120	170,745	22,128	1,487	0,193	1,008	1,008	0,504	13,496	14,504	
		50	150	360,911	46,774	2,248	0,291	1,012	1,012	0,762	13,238	14,762	
0		100	204,924	26,558	10,654	1,381	1,014	1,014	0,903	13,097	14,903		
20		120	363,970	47,170	13,737	1,780	1,018	1,018	1,164	12,836	15,164		
50		150	753,937	97,710	20,288	2,629	1,026	1,026	1,719	12,281	15,719		
110	0	100	333,766	43,256	42,240	5,474	1,024	1,024	1,590	12,410	15,590		
	20	120	582,887	75,542	53,389	6,919	1,030	1,030	2,010	11,990	16,010		
	50	150	1183,666	153,403	77,079	9,989	1,041	1,041	2,902	11,098	16,902		
	0	100	483,254	62,630	117,136	15,181	1,036	1,036	2,481	11,519	16,481		
	20	120	830,707	107,660	145,324	18,834	1,043	1,043	3,078	10,922	17,078		
	50	150	1654,685	214,447	205,223	26,597	1,057	1,057	4,347	9,653	18,347		

Приложения

Таблица А2

$R_{\text{верх}} = 150 \text{ мм}; R_{\text{ниж}} = 250 \text{ мм}; \text{ сорт древесины} - \text{II} ([\sigma] = 13 \text{ МПа});$

$$k_4^{\text{верх}} = 0,0688 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{ниж}} = 0,0089 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

R_1 , мм	R_2 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	M_1 ($M_{z_0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{z_0}^{\text{ниж}}$)	M_1 ($M_{y_0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{y_0}^{\text{ниж}}$)	S , мм	$n =$ q'/q	$\sigma_{\text{ср1}}$, МПа	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	$\sigma_{\text{р1}}$, МПа	
0	10	0	100	46,261	5,995	0,039	0,005	10	1,000	0,013	12,987	13,013	
		20	120	103,303	13,388	0,066	0,009		1,000	0,022	12,978	13,022	
		50	150	264,566	34,288	0,125	0,016		1,001	0,042	12,958	13,042	
	20	0	100	94,816	12,288	0,641	0,083	20	1,001	0,054	12,946	13,054	
		20	120	209,818	27,192	1,082	0,140		1,002	0,092	12,908	13,092	
		50	150	533,720	69,170	2,017	0,261		1,003	0,171	12,829	13,171	
	30	0	100	147,958	19,175	3,431	0,445	30	1,002	0,129	12,871	13,129	
		20	120	322,755	41,829	5,661	0,734		1,004	0,213	12,787	13,213	
		50	150	812,050	105,242	10,399	1,348		1,007	0,392	12,608	13,392	
	40	0	100	207,983	26,955	11,667	1,512	40	1,004	0,247	12,753	13,247	
		20	120	445,327	57,714	18,714	2,425		1,007	0,396	12,604	13,396	
		50	150	1104,143	143,097	33,688	4,366		1,012	0,714	12,286	13,714	
	50	0	100	277,183	35,923	31,064	4,026	50	1,007	0,421	12,579	13,421	
		20	120	580,746	75,265	48,268	6,256		1,011	0,654	12,346	13,654	
		50	150	1414,588	183,331	84,827	10,994		1,019	1,150	11,850	14,150	
	30	40	0	100	60,024	7,779	0,367	0,048	10	1,002	0,124	12,876	13,124
			20	120	122,572	15,885	0,560	0,073		1,003	0,190	12,810	13,190
			50	150	292,093	37,855	0,969	0,126		1,006	0,328	12,672	13,328
		50	0	100	129,224	16,747	3,665	0,475	20	1,005	0,311	12,689	13,311
			20	120	257,990	33,436	5,427	0,703		1,008	0,460	12,540	13,460
			50	150	602,538	78,089	9,171	1,189		1,013	0,777	12,223	13,777
		60	0	100	209,894	27,202	15,311	1,984	30	1,010	0,576	12,424	13,576
			20	120	409,466	53,067	22,000	2,851		1,014	0,828	12,172	13,828
			50	150	935,922	121,295	36,214	4,693		1,022	1,364	11,636	14,364
70		0	100	304,328	39,441	44,582	5,778	40	1,016	0,944	12,056	13,944	
		20	120	580,210	75,195	62,199	8,061		1,022	1,317	11,683	14,317	
		50	150	1296,833	168,070	99,636	12,913		1,033	2,110	10,890	15,110	
80		0	100	414,818	53,760	106,190	13,762	50	1,023	1,439	11,561	14,439	
		20	120	773,435	100,237	144,039	18,668		1,031	1,952	11,048	14,952	
		50	150	1689,859	219,006	224,470	29,091		1,046	3,043	9,957	16,043	
60		70	0	100	94,433	12,239	1,129	0,146	10	1,007	0,383	12,617	13,383
			20	120	170,745	22,128	1,487	0,193		1,009	0,504	12,496	13,504
			50	150	360,911	46,774	2,248	0,291		1,013	0,762	12,238	13,762
		80	0	100	204,924	26,558	10,654	1,381	20	1,015	0,903	12,097	13,903
			20	120	363,970	47,170	13,737	1,780		1,019	1,164	11,836	14,164
			50	150	753,937	97,710	20,288	2,629		1,028	1,719	11,281	14,719
		90	0	100	333,766	43,256	42,240	5,474	30	1,026	1,590	11,410	14,590
			20	120	582,887	75,542	53,389	6,919		1,032	2,010	10,990	15,010
			50	150	1183,666	153,403	77,079	9,989		1,044	2,902	10,098	15,902
	100	0	100	483,254	62,630	117,136	15,181	40	1,038	2,481	10,519	15,481	
		20	120	830,707	107,660	145,324	18,834		1,046	3,078	9,922	16,078	
		50	150	1654,685	214,447	205,223	26,597		1,061	4,347	8,653	17,347	
	110	0	100	655,680	84,976	266,478	34,536	50	1,053	3,612	9,388	16,612	
		20	120	1110,642	143,939	324,973	42,116		1,062	4,405	8,595	17,405	
			50	150	2171,583	281,437	449,275	58,226	1,079	6,090	6,910	19,090	

Таблица А3

$R^{\text{верх}} = 150 \text{ мм}; R^{\text{ниж}} = 250 \text{ мм}; \text{ сорт древесины} - \text{III} ([\sigma] = 8,5 \text{ МПа});$

$$k_4^{\text{верх}} = 0,0688 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{ниж}} = 0,0089 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

R ₁ , мм	R ₂ , мм	a ₁ , мм	a ₂ , мм	M ₁ (M ₂₀ ^{верх})	M ₂ (M ₂₀ ^{ниж})	M ₁ (M ₅₀ ^{верх})	M ₂ (M ₅₀ ^{ниж})	S, мм	n= q'/q	σ _{ср} , МПа	σ _{сж} , МПа	σ _р , МПа	
0	10	0	100	46,261	5,995	0,039	0,005	10	1,000	0,013	8,487	8,513	
		20	120	103,303	13,388	0,066	0,009		1,001	0,022	8,478	8,522	
		50	150	264,566	34,288	0,125	0,016		1,001	0,042	8,458	8,542	
	20	0	100	94,816	12,288	0,641	0,083	20	1,001	0,054	8,446	8,554	
		20	120	209,818	27,192	1,082	0,140		1,002	0,092	8,408	8,592	
		50	150	593,720	69,170	2,017	0,261		1,005	0,171	8,329	8,671	
	30	0	100	147,958	19,175	3,431	0,445	30	1,003	0,129	8,371	8,629	
		20	120	322,755	41,829	5,661	0,734		1,006	0,213	8,287	8,713	
		50	150	812,050	105,242	10,399	1,348		1,010	0,392	8,108	8,892	
	40	0	100	207,983	26,955	11,667	1,512	40	1,007	0,247	8,253	8,747	
		20	120	445,327	57,714	18,714	2,425		1,010	0,396	8,104	8,896	
		50	150	1104,143	143,097	33,688	4,366		1,018	0,714	7,786	9,214	
	50	0	100	277,183	35,923	31,064	4,026	50	1,011	0,421	8,079	8,921	
		20	120	580,746	75,265	48,268	6,256		1,017	0,654	7,846	9,154	
		50	150	1414,588	183,331	84,827	10,994		1,028	1,150	7,350	9,650	
	30	40	0	100	60,024	7,779	0,367	0,048	10	1,003	0,124	8,376	8,624
			20	120	122,572	15,885	0,560	0,073		1,005	0,190	8,310	8,690
			50	150	292,093	37,855	0,969	0,126		1,009	0,328	8,172	8,828
		50	0	100	129,224	16,747	3,665	0,475	20	1,008	0,311	8,189	8,811
			20	120	257,990	33,436	5,427	0,703		1,012	0,460	8,040	8,960
			50	150	602,538	78,089	9,171	1,189		1,020	0,777	7,723	9,277
		60	0	100	209,894	27,202	15,311	1,984	30	1,015	0,576	7,924	9,076
			20	120	409,466	53,067	22,000	2,851		1,021	0,828	7,672	9,328
			50	150	935,922	121,295	36,214	4,693		1,033	1,364	7,136	9,864
70		0	100	304,328	39,441	44,582	5,778	40	1,023	0,944	7,556	9,444	
		20	120	580,210	75,195	62,199	8,061		1,032	1,317	7,183	9,817	
		50	150	1296,833	168,070	99,636	12,913		1,048	2,110	6,390	10,610	
80		0	100	414,818	53,760	106,190	13,762	50	1,034	1,439	7,061	9,939	
		20	120	773,435	100,237	144,039	18,668		1,045	1,952	6,548	10,452	
		50	150	1689,859	219,006	224,470	29,091		1,064	3,043	5,457	11,543	
60		70	0	100	94,433	12,239	1,129	0,146	10	1,010	0,383	8,117	8,883
			20	120	170,745	22,128	1,487	0,193		1,013	0,504	7,996	9,004
			50	150	360,911	46,774	2,248	0,291		1,019	0,762	7,738	9,262
		80	0	100	204,924	26,558	10,654	1,381	20	1,023	0,903	7,597	9,403
			20	120	363,970	47,170	13,737	1,780		1,028	1,184	7,396	9,664
			50	150	753,937	97,710	20,288	2,629		1,040	1,719	6,781	10,219
		90	0	100	333,766	43,256	42,240	5,474	30	1,038	1,590	6,910	10,090
			20	120	582,887	75,542	53,389	6,919		1,046	2,010	6,490	10,510
			50	150	1183,666	153,403	77,079	9,989		1,062	2,902	5,598	11,402
	100	0	100	483,254	62,630	117,136	15,181	40	1,055	2,481	6,019	10,981	
		20	120	830,707	107,660	145,324	18,834		1,065	3,078	5,422	11,578	
		50	150	1654,685	214,447	205,223	26,597		1,084	4,347	4,153	12,847	
	110	0	100	655,680	84,976	266,478	34,536	50	1,073	3,612	4,888	12,112	
		20	120	1110,642	143,939	324,973	42,116		1,085	4,405	4,095	12,905	
		50	150	2171,583	281,437	449,275	58,226	1,106	6,090	2,410	14,590		

Таблица А4

$R_{\text{верх}} = 150 \text{ мм}; R_{\text{ниж}} = 200 \text{ мм}; \text{ сорт древесины} - \text{I} ([\sigma] = 14 \text{ МПа});$

$$k_4^{\text{верх}} = 0,0688 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{ниж}} = 0,0218 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

R_1 , мм	R_2 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	M_1 (M_{z0} верх)	M_2 (M_{z0} ниж)	M_1 (M_{y0} верх)	M_2 (M_{y0} ниж)	S , мм	$\eta =$ q'/q	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	σ_p , МПа	
0	10	0	100	46,261	14,637	0,039	0,012	10	1,001	0,015	13,985	14,015	
		20	120	103,303	32,686	0,066	0,021		1,001	0,026	13,974	14,026	
		50	150	264,566	83,710	0,125	0,039		1,002	0,049	13,951	14,049	
	20	0	100	94,816	30,000	0,641	0,203	20	1,002	0,063	13,937	14,063	
		20	120	209,818	66,388	1,082	0,342		1,004	0,107	13,893	14,107	
		50	150	533,720	168,872	2,017	0,638		1,007	0,199	13,801	14,199	
	30	0	100	147,958	46,815	3,431	1,086	30	1,005	0,151	13,849	14,151	
		20	120	322,755	102,122	5,661	1,791		1,008	0,248	13,752	14,248	
		50	150	812,050	256,938	10,399	3,290		1,015	0,456	13,544	14,456	
	40	0	100	207,983	65,807	11,667	3,691	40	1,010	0,288	13,712	14,288	
		20	120	445,327	140,904	18,714	5,921		1,016	0,462	13,538	14,462	
		50	150	1104,143	349,358	33,688	10,659		1,028	0,832	13,168	14,832	
	50	0	100	277,183	87,702	31,064	9,829	50	1,017	0,491	13,509	14,491	
		20	120	580,746	183,752	48,268	15,272		1,025	0,762	13,238	14,762	
		50	150	1414,588	447,584	84,827	26,840		1,044	1,340	12,660	15,340	
	30	40	0	100	60,024	18,992	0,367	0,116	10	1,005	0,145	13,855	14,145
			20	120	122,572	38,783	0,560	0,177		1,008	0,221	13,779	14,221
			50	150	292,093	92,420	0,969	0,307		1,013	0,383	13,617	14,383
		50	0	100	129,224	40,887	3,665	1,160	20	1,012	0,362	13,638	14,362
			20	120	257,990	81,630	5,427	1,717		1,018	0,536	13,464	14,536
			50	150	602,538	190,647	9,171	2,902		1,030	0,905	13,095	14,905
		60	0	100	209,894	66,412	15,311	4,844	30	1,023	0,672	13,328	14,672
			20	120	409,466	129,558	22,000	6,961		1,032	0,965	13,035	14,965
			50	150	935,922	296,132	36,214	11,458		1,052	1,589	12,411	15,589
70		0	100	304,328	96,291	44,582	14,106	40	1,036	1,100	12,900	15,100	
		20	120	580,210	183,582	62,199	19,680		1,050	1,535	12,465	15,535	
		50	150	1296,833	410,326	99,636	31,525		1,077	2,459	11,541	16,459	
80		0	100	414,818	131,251	106,190	33,599	50	1,054	1,677	12,323	15,677	
		20	120	773,435	244,720	144,039	45,575		1,072	2,275	11,725	16,275	
		50	150	1689,859	534,682	224,470	71,024		1,108	3,546	10,454	17,546	
60		70	0	100	94,433	29,879	1,129	0,357	10	1,015	0,446	13,554	14,446
			20	120	170,745	54,025	1,487	0,471		1,020	0,587	13,413	14,587
			50	150	360,911	114,195	2,248	0,711		1,030	0,888	13,112	14,888
		80	0	100	204,924	64,839	10,654	3,371	20	1,035	1,052	12,948	15,052
			20	120	363,970	115,162	13,737	4,346		1,044	1,356	12,644	15,356
			50	150	753,937	238,550	20,288	6,419		1,064	2,003	11,997	16,003
		90	0	100	333,766	105,606	42,240	13,365	30	1,060	1,854	12,146	15,854
			20	120	582,887	184,429	53,389	16,893		1,074	2,343	11,657	16,343
			50	150	1183,666	374,519	77,079	24,388		1,103	3,382	10,618	17,382
	100	0	100	483,254	152,905	117,136	37,063	40	1,090	2,891	11,109	16,891	
		20	120	830,707	262,841	145,324	45,981		1,109	3,587	10,413	17,587	
		50	150	1654,685	523,553	205,223	64,934		1,146	5,065	8,935	19,065	
110	0	100	655,680	207,461	266,478	84,315	50	1,125	4,210	9,790	18,210		
	20	120	1110,642	351,414	324,973	102,823		1,148	5,134	8,866	19,134		
		50	150	2171,583	687,103	449,275	142,153	1,193	7,097	6,903	21,097		

Таблица А5

$R_{\text{верх}} = 150 \text{ мм}; R_{\text{ниж}} = 200 \text{ мм}; \text{ сорт древесины} - \text{II} ([\sigma] = 13 \text{ МПа});$

$$k_4^{\text{верх}} = 0,0688 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{ниж}} = 0,0218 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

R_1 , мм	R_2 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	M_1 ($M_{z0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{z0}^{\text{ниж}}$)	M_1 ($M_{y0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{y0}^{\text{ниж}}$)	S , мм	$n =$ q/q	$\sigma_{\text{ср.}}$, МПа	$\sigma_{\text{сж.}}$, МПа	σ_p , МПа
0	10	0	100	46,261	14,637	0,039	0,012	10	1,001	0,015	12,985	13,015
		20	120	103,303	32,686	0,066	0,021		1,001	0,026	12,974	13,026
		50	150	264,566	83,710	0,125	0,039		1,002	0,049	12,951	13,049
		0	100	94,816	30,000	0,641	0,203		1,002	0,063	12,937	13,063
		20	120	209,818	66,388	1,082	0,342		2,004	0,107	12,893	13,107
		50	150	533,720	168,872	2,017	0,638		1,007	0,199	12,801	13,199
	20	0	100	147,958	46,815	3,431	1,086	1,006	0,151	12,849	13,151	
		20	120	322,755	102,122	5,661	1,791	3,009	0,248	12,752	13,248	
		50	150	812,050	256,938	10,399	3,290	1,017	0,456	12,544	13,456	
		0	100	207,983	65,807	11,667	3,691	1,011	0,288	12,712	13,288	
		20	120	445,327	140,904	18,714	5,921	4,017	0,462	12,538	13,462	
		50	150	1104,143	349,358	33,688	10,659	1,030	0,832	12,168	13,832	
	30	0	100	277,183	87,702	31,064	9,829	1,018	0,491	12,509	13,491	
		20	120	580,746	183,752	48,268	15,272	1,027	0,762	12,238	13,762	
		50	150	1414,588	447,584	84,827	26,840	1,047	1,340	11,660	14,340	
		0	100	60,024	18,992	0,367	0,116	1,005	0,145	12,855	13,145	
		20	120	122,572	38,783	0,560	0,177	1,008	0,221	12,779	13,221	
		50	150	292,093	92,420	0,969	0,307	1,014	0,383	12,617	13,383	
	40	0	100	129,224	40,887	3,665	1,160	1,013	0,362	12,638	13,362	
		20	120	257,990	81,630	5,427	1,717	2,019	0,536	12,464	13,536	
		50	150	602,538	190,647	9,171	2,902	1,032	0,905	12,095	13,905	
		0	100	209,894	66,412	15,311	4,844	1,024	0,672	12,328	13,672	
		20	120	409,466	129,558	22,000	6,961	1,034	0,965	12,035	13,965	
		50	150	935,922	296,132	36,214	11,458	1,055	1,589	11,411	14,589	
50	0	100	304,328	96,291	44,582	14,106	1,039	1,100	11,900	14,100		
	20	120	580,210	183,582	62,199	19,680	1,053	1,535	11,465	14,535		
	50	150	1296,833	410,326	99,636	31,525	1,083	2,459	10,541	15,459		
	0	100	414,818	131,251	106,190	33,599	1,058	1,677	11,323	14,677		
	20	120	773,435	244,720	144,039	45,575	1,077	2,275	10,725	15,275		
	50	150	1689,859	534,682	224,470	71,024	1,115	3,546	9,454	16,546		
60	70	0	100	94,433	29,879	1,129	0,357	10	1,016	0,446	12,554	13,446
		20	120	170,745	54,025	1,487	0,471		1,021	0,587	12,413	13,587
		50	150	360,911	114,195	2,248	0,711		1,032	0,888	12,112	13,888
	80	0	100	204,924	64,839	10,654	3,371	20	1,037	1,052	11,948	14,052
		20	120	363,970	115,162	13,737	4,346		1,048	1,356	11,644	14,356
		50	150	753,937	238,550	20,288	6,419		1,069	2,003	10,997	15,003
	90	0	100	333,766	105,606	42,240	13,365	30	1,064	1,854	11,146	14,854
		20	120	582,867	184,429	53,389	16,893		1,079	2,343	10,657	15,343
		50	150	1183,666	374,519	77,079	24,388		1,110	3,382	9,618	16,382
	100	0	100	483,254	152,905	117,136	37,063	40	1,096	2,891	10,109	15,891
		20	120	830,707	262,841	145,324	45,981		1,116	3,587	9,413	16,587
		50	150	1654,685	523,553	205,223	64,934		1,156	5,065	7,935	18,065
110	0	100	655,680	207,461	266,478	84,315	50	1,133	4,210	8,790	17,210	
	20	120	1110,642	351,414	324,973	102,823		1,158	5,134	7,866	18,134	
	50	150	2171,583	687,103	449,275	142,153		1,204	7,097	5,903	20,097	

Таблица А6

$R^{\text{верх}} = 150 \text{ мм}; R^{\text{ниж}} = 200 \text{ мм}; \text{ сорт древесины} - \text{III} ([\sigma] = 8,5 \text{ МПа});$

$$k_4^{\text{верх}} = 0,0688 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{ниж}} = 0,0218 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

R ₁ , мм	R ₂ , мм	a ₁ , мм	a ₂ , мм	M ₁ (M ₂₀ ^{верх})	M ₂ (M ₂₀ ^{ниж})	M ₁ (M ₁₀ ^{верх})	M ₂ (M ₁₀ ^{ниж})	S, мм	η = q/q	σ _{ср} , МПа	σ _{сж} , МПа	σ _р , МПа	
0	10	0	100	46,261	14,637	0,039	0,012	10	1,001	0,015	8,485	8,515	
		20	120	103,303	32,686	0,066	0,021		1,001	0,026	8,474	8,526	
		50	150	264,566	83,710	0,125	0,039		1,003	0,049	8,451	8,549	
		0	100	94,816	30,000	0,641	0,203	20	1,004	0,063	8,437	8,563	
		20	120	209,818	66,388	1,082	0,342		1,006	0,107	8,393	8,607	
		50	150	533,720	168,872	2,017	0,638		1,011	0,199	8,301	8,699	
	0	100	147,958	46,815	3,431	1,086	30	1,008	0,151	8,349	8,651		
	20	120	322,755	102,122	5,661	1,791		1,014	0,248	8,252	8,748		
	50	150	812,050	256,938	10,399	3,290		1,025	0,456	8,044	8,956		
	0	100	207,983	65,807	11,667	3,691	40	1,016	0,288	8,212	8,788		
	20	120	445,327	140,904	18,714	5,921		1,025	0,462	8,038	8,962		
	50	150	1104,143	349,358	33,688	10,659		1,045	0,832	7,668	9,332		
	0	100	277,183	87,702	31,064	9,829	50	1,027	0,491	8,009	8,991		
	20	120	580,746	183,752	48,268	15,272		1,041	0,762	7,738	9,262		
	50	150	1414,588	447,584	84,827	26,840		1,070	1,340	7,160	9,840		
	30	40	0	100	60,024	18,992	0,367	0,116	10	1,008	0,145	8,355	8,645
			20	120	122,572	38,783	0,560	0,177		1,012	0,221	8,279	8,721
			50	150	292,093	92,420	0,969	0,307		1,021	0,383	8,117	8,883
			0	100	129,224	40,887	3,665	1,160	20	1,020	0,362	8,138	8,862
			20	120	257,990	81,630	5,427	1,717		1,029	0,536	7,964	9,036
			50	150	602,538	190,647	9,171	2,902		1,049	0,905	7,595	9,405
		0	100	209,894	66,412	15,311	4,844	30	1,036	0,672	7,828	9,172	
		20	120	409,466	129,558	22,000	6,961		1,052	0,965	7,535	9,465	
		50	150	935,922	296,132	36,214	11,458		1,082	1,589	6,911	10,089	
0		100	304,328	96,291	44,582	14,106	40	1,058	1,100	7,400	9,600		
20		120	580,210	183,582	62,199	19,680		1,079	1,535	6,965	10,035		
50		150	1296,833	410,326	99,636	31,525		1,121	2,459	6,041	10,959		
0		100	414,818	131,251	106,190	33,599	50	1,086	1,677	6,823	10,177		
20		120	773,435	244,720	144,039	45,575		1,113	2,275	6,225	10,775		
50		150	1689,859	534,682	224,470	71,024		1,165	3,546	4,954	12,046		
60		70	0	100	94,433	29,879	1,129	0,357	10	1,025	0,446	8,054	8,946
			20	120	170,745	54,025	1,487	0,471		1,032	0,587	7,913	9,087
			50	150	360,911	114,195	2,248	0,711		1,048	0,888	7,612	9,388
			0	100	204,924	64,839	10,654	3,371	20	1,056	1,052	7,448	9,552
			20	120	363,970	115,162	13,737	4,346		1,071	1,356	7,144	9,856
			50	150	753,937	238,550	20,288	6,419		1,101	2,003	6,497	10,503
		0	100	333,766	105,606	42,240	13,365	30	1,094	1,854	6,646	10,354	
		20	120	582,887	184,429	53,389	16,893		1,116	2,343	6,157	10,843	
		50	150	1183,666	374,519	77,079	24,388		1,159	3,382	5,118	11,882	
	0	100	483,254	152,905	117,136	37,063	40	1,139	2,891	5,609	11,391		
	20	120	830,707	262,841	145,324	45,981		1,166	3,587	4,913	12,087		
	50	150	1654,685	523,553	205,223	64,934		1,219	5,065	3,435	13,565		
	0	100	655,680	207,461	266,478	84,315	50	1,189	4,210	4,290	12,710		
	20	120	1110,642	351,414	324,973	102,823		1,221	5,134	3,366	13,634		
	50	150	2171,583	687,103	449,275	142,153		1,280	7,097	1,403	15,597		

Таблица А7

$R_{\text{верх}} = 200 \text{ мм}; R_{\text{ниж}} = 250 \text{ мм}; \text{ сорт древесины} - \text{I} ([\sigma] = 14 \text{ МПа});$

$$k_4^{\text{верх}} = 0,0218 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{ниж}} = 0,0089 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

R_1 , мм	R_2 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	M_1 ($M_{z0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{z0}^{\text{ниж}}$)	M_1 ($M_{y0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{y0}^{\text{ниж}}$)	S , мм	$n =$ q'/q	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	$\sigma_{\text{р}}$, МПа	
0	10	0	100	14,637	5,995	0,012	0,005	10	1,000	0,005	13,995	14,005	
		20	120	32,686	13,388	0,021	0,009		1,000	0,009	13,991	14,009	
		50	150	83,710	34,288	0,039	0,016		1,001	0,017	13,983	14,017	
		0	100	30,000	12,288	0,203	0,083		1,001	0,021	13,979	14,021	
		20	120	66,388	27,192	0,342	0,140		1,002	0,036	13,964	14,036	
		50	150	168,872	69,170	0,638	0,261		1,003	0,067	13,933	14,067	
	20	0	100	46,815	19,175	1,086	0,445	20	1,002	0,051	13,949	14,051	
		20	120	102,122	41,829	1,791	0,734		1,003	0,084	13,916	14,084	
		50	150	256,938	105,242	3,290	1,348		1,006	0,155	13,845	14,155	
		0	100	65,807	26,955	3,691	1,512		1,004	0,098	13,902	14,098	
		20	120	140,904	57,714	5,921	2,425		1,006	0,156	13,844	14,156	
		50	150	349,358	143,097	10,659	4,366		1,012	0,282	13,718	14,282	
	30	0	100	87,702	35,923	9,829	4,026	30	1,007	0,166	13,834	14,166	
		20	120	183,752	75,265	15,272	6,256		1,011	0,258	13,742	14,258	
		50	150	447,584	183,331	26,840	10,994		1,019	0,454	13,546	14,454	
		0	100	18,992	7,779	0,116	0,048		10	1,002	0,049	13,951	14,049
		20	120	38,783	15,885	0,177	0,073			1,003	0,075	13,925	14,075
		50	150	92,420	37,855	0,307	0,126			1,005	0,130	13,870	14,130
	0	100	40,887	16,747	1,160	0,475	1,005	0,123		13,877	14,123		
	20	120	81,630	33,436	1,717	0,703	1,007	0,182		13,818	14,182		
	50	150	190,647	78,089	2,902	1,189	1,013	0,307		13,693	14,307		
	30	40	0	100	66,412	27,202	4,844	1,984	40	1,009	0,228	13,772	14,228
			20	120	129,558	53,067	6,961	2,851		1,013	0,327	13,673	14,327
			50	150	296,132	121,295	11,458	4,693		1,022	0,538	13,462	14,538
0			100	96,291	39,441	14,106	5,778	20		1,015	0,373	13,627	14,373
20			120	183,582	75,195	19,680	8,061			1,021	0,520	13,480	14,520
50			150	410,326	168,070	31,525	12,913			1,034	0,833	13,167	14,833
0		100	131,251	53,760	33,599	13,762	1,023		0,568	13,432	14,568		
20		120	244,720	100,237	45,575	18,668	1,031		0,771	13,229	14,771		
50		150	534,682	219,006	71,024	29,091	1,048		1,201	12,799	15,201		
60		70	0	100	29,879	12,239	0,357	0,146	10	1,006	0,151	13,849	14,151
			20	120	54,025	22,128	0,471	0,193		1,008	0,199	13,801	14,199
			50	150	114,195	46,774	0,711	0,291		1,012	0,301	13,899	14,301
	0		100	64,839	26,558	3,371	1,381	20		1,015	0,356	13,644	14,356
	20		120	115,162	47,170	4,346	1,780			1,019	0,459	13,541	14,459
	50		150	238,550	97,710	6,419	2,629			1,028	0,679	13,321	14,679
	0	100	105,606	43,256	13,365	5,474	1,026		0,628	13,372	14,628		
	20	120	184,429	75,542	16,893	6,919	1,032		0,794	13,206	14,794		
	50	150	374,519	153,403	24,388	9,989	1,046		1,146	12,854	15,146		
	90	0	100	152,905	62,630	37,063	15,181	30	1,040	0,980	13,020	14,980	
		20	120	262,841	107,660	45,981	18,834		1,049	1,215	12,785	15,215	
		50	150	523,553	214,447	64,934	26,597		1,068	1,716	12,284	15,716	
0		100	207,461	84,976	84,315	34,536	40		1,057	1,426	12,574	15,426	
20		120	351,414	143,939	102,823	42,116			1,069	1,739	12,261	15,739	
50		150	687,103	281,437	142,153	58,226			1,093	2,405	11,595	16,405	

Таблица А8

$R^{\text{верх}} = 200 \text{ мм}; R^{\text{ниж}} = 250 \text{ мм};$ сорт древесины – II ($[\sigma] = 13 \text{ МПа}$);

$$k_4^{\text{верх}} = 0,0218 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{ниж}} = 0,0089 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

R_1 , мм	R_2 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	M_1 ($M_{z0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{z0}^{\text{ниж}}$)	M_1 ($M_{y0}^{\text{верх}}$)	M_2 ($M_{y0}^{\text{ниж}}$)	S , мм	$\eta =$ q'/q	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	σ_p , МПа	
0	10	0	100	14,637	5,995	0,012	0,005	10	1,000	0,005	12,995	13,005	
		20	120	32,686	13,388	0,021	0,009		1,000	0,009	12,991	13,009	
		50	150	83,710	34,288	0,039	0,016		1,001	0,017	12,983	13,017	
	20	0	100	30,000	12,288	0,203	0,083	20	1,001	0,021	12,979	13,021	
		20	120	66,388	27,192	0,342	0,140		1,002	0,036	12,964	13,036	
		50	150	168,872	69,170	0,638	0,261		1,003	0,067	12,933	13,067	
	30	0	100	46,815	19,175	1,086	0,445	30	1,002	0,051	12,949	13,051	
		20	120	102,122	41,829	1,791	0,734		1,004	0,084	12,916	13,084	
		50	150	256,938	105,242	3,290	1,348		1,007	0,155	12,845	13,155	
	40	0	100	65,807	26,955	3,691	1,512	40	1,004	0,098	12,902	13,098	
		20	120	140,904	57,714	5,921	2,425		1,007	0,156	12,844	13,156	
		50	150	349,358	143,097	10,659	4,366		1,012	0,282	12,718	13,282	
	50	0	100	87,702	35,923	9,829	4,026	50	1,007	0,166	12,834	13,166	
		20	120	183,752	75,265	15,272	6,256		1,011	0,258	12,742	13,258	
		50	150	447,584	183,331	26,840	10,994		1,020	0,454	12,546	13,454	
	30	40	0	100	18,992	7,779	0,116	0,048	10	1,002	0,049	12,951	13,049
			20	120	38,783	15,885	0,177	0,073		1,003	0,075	12,925	13,075
			50	150	92,420	37,855	0,307	0,126		1,006	0,130	12,870	13,130
50		0	100	40,887	16,747	1,160	0,475	20	1,005	0,123	12,877	13,123	
		20	120	81,630	33,436	1,717	0,703		1,008	0,182	12,818	13,182	
		50	150	190,647	78,089	2,902	1,189		1,014	0,307	12,693	13,307	
60		0	100	66,412	27,202	4,844	1,984	30	1,010	0,228	12,772	13,228	
		20	120	129,558	53,067	6,961	2,851		1,014	0,327	12,673	13,327	
		50	150	296,132	121,295	11,458	4,693		1,024	0,538	12,462	13,538	
70		0	100	96,291	39,441	14,106	5,778	40	1,016	0,373	12,627	13,373	
		20	120	183,582	75,195	19,680	8,061		1,023	0,520	12,480	13,520	
		50	150	410,326	168,070	31,525	12,913		1,036	0,833	12,167	13,833	
80		0	100	131,251	53,760	33,599	13,762	50	1,025	0,568	12,432	13,568	
		20	120	244,720	100,237	45,575	18,668		1,034	0,771	12,229	13,771	
		50	150	534,682	219,006	71,024	29,091		1,052	1,201	11,799	14,201	
60		70	0	100	29,879	12,239	0,357	0,146	10	1,007	0,151	12,849	13,151
			20	120	54,025	22,128	0,471	0,193		1,009	0,199	12,801	13,199
			50	150	114,195	46,774	0,711	0,291		1,013	0,301	12,699	13,301
	80	0	100	64,839	26,558	3,371	1,381	20	1,016	0,356	12,644	13,356	
		20	120	115,162	47,170	4,346	1,780		1,020	0,459	12,541	13,459	
		50	150	238,550	97,710	6,419	2,629		1,030	0,679	12,321	13,679	
	90	0	100	105,606	43,256	13,365	5,474	30	1,028	0,628	12,372	13,628	
		20	120	184,429	75,542	16,893	6,919		1,035	0,794	12,206	13,794	
		50	150	374,519	153,403	24,388	9,989		1,049	1,146	11,854	14,146	
	100	0	100	152,905	62,630	37,063	15,181	40	1,042	0,980	12,020	13,980	
		20	120	262,841	107,660	45,981	18,834		1,052	1,215	11,785	14,215	
		50	150	523,553	214,447	64,934	26,597		1,073	1,716	11,284	14,716	
	110	0	100	207,461	84,976	84,315	34,536	50	1,061	1,426	11,574	14,426	
		20	120	351,414	143,939	102,823	42,116		1,074	1,739	11,261	14,739	
		50	150	687,103	281,437	142,153	58,226		1,100	2,405	10,595	15,405	

Таблица А9

$R_{\text{верх}} = 200 \text{ мм}; R_{\text{ниж}} = 250 \text{ мм};$ сорт древесины - III ($[\sigma] = 8,5 \text{ МПа}$);

$$k_4^{\text{верх}} = 0,0218 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}; k_4^{\text{ниж}} = 0,0089 \frac{\text{Па}}{\text{мм}^4}.$$

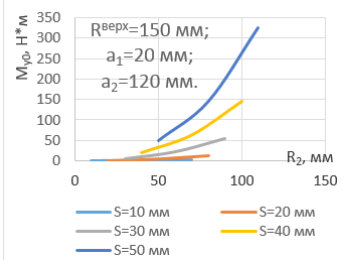
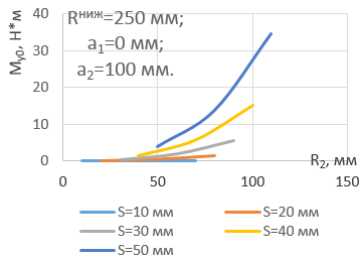
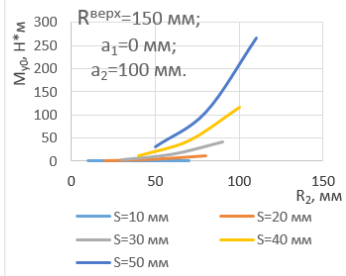
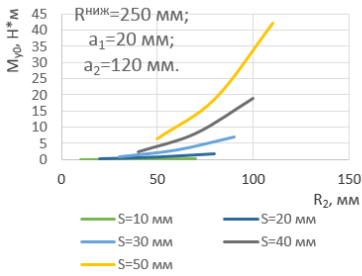
R ₁ , мм	R ₂ , мм	a ₁ , мм	a ₂ , мм	M ₁ (M ₂₀ ^{верх})	M ₂ (M ₂₀ ^{ниж})	M ₁ (M ₃₀ ^{верх})	M ₂ (M ₃₀ ^{ниж})	S, мм	n= q'/q	σ _{ср} , МПа	σ _{сж} , МПа	σ _р , МПа	
0	10	0	100	14,637	5,995	0,012	0,005	10	1,000	0,005	8,495	8,505	
		20	120	32,686	13,388	0,021	0,009		1,001	0,009	8,491	8,509	
		50	150	83,710	34,288	0,039	0,016		1,001	0,017	8,483	8,517	
	20	0	100	30,000	12,288	0,203	0,083	20	1,001	0,021	8,479	8,521	
		20	120	66,388	27,192	0,342	0,140		1,002	0,036	8,464	8,536	
		50	150	168,872	69,170	0,638	0,261		1,005	0,067	8,433	8,567	
	30	0	100	46,815	19,175	1,086	0,445	30	1,003	0,051	8,449	8,551	
		20	120	102,122	41,829	1,791	0,734		1,006	0,084	8,416	8,584	
		50	150	256,938	105,242	3,290	1,348		1,010	0,155	8,345	8,655	
	40	0	100	65,807	26,955	3,691	1,512	40	1,007	0,098	8,402	8,598	
		20	120	140,904	57,714	5,921	2,425		1,011	0,156	8,344	8,656	
		50	150	349,358	143,097	10,659	4,366		1,019	0,282	8,218	8,782	
	50	0	100	87,702	35,923	9,829	4,026	50	1,011	0,166	8,334	8,666	
		20	120	183,752	75,265	15,272	6,256		1,017	0,258	8,242	8,758	
		50	150	447,584	183,331	26,840	10,994		1,030	0,454	8,046	8,954	
	30	40	0	100	18,992	7,779	0,116	0,048	10	1,003	0,049	8,451	8,549
			20	120	38,783	15,885	0,177	0,073		1,005	0,075	8,425	8,575
			50	150	92,420	37,855	0,307	0,126		1,009	0,130	8,370	8,630
		50	0	100	40,887	16,747	1,160	0,475	20	1,008	0,123	8,377	8,623
			20	120	81,630	33,436	1,717	0,703		1,012	0,182	8,318	8,682
			50	150	190,647	78,089	2,902	1,189		1,021	0,307	8,193	8,807
		60	0	100	66,412	27,202	4,844	1,984	30	1,015	0,228	8,272	8,728
			20	120	129,558	53,067	6,961	2,851		1,022	0,327	8,173	8,827
			50	150	296,132	121,295	11,458	4,693		1,036	0,538	7,962	9,038
70		0	100	96,291	39,441	14,106	5,778	40	1,025	0,373	8,127	8,873	
		20	120	183,582	75,195	19,680	8,061		1,035	0,520	7,980	9,020	
		50	150	410,326	168,070	31,525	12,913		1,055	0,833	7,667	9,333	
80	0	100	131,251	53,760	33,599	13,762	50	1,038	0,568	7,932	9,068		
	20	120	244,720	100,237	45,575	18,668		1,051	0,771	7,729	9,271		
	50	150	534,682	219,006	71,024	29,091		1,078	1,201	7,299	9,701		
60	70	0	100	29,879	12,239	0,357	0,146	10	1,010	0,151	8,349	8,651	
		20	120	54,025	22,128	0,471	0,193		1,013	0,199	8,301	8,699	
		50	150	114,195	46,774	0,711	0,291		1,020	0,301	8,199	8,801	
	80	0	100	64,839	26,558	3,371	1,381	20	1,024	0,356	8,144	8,856	
		20	120	115,162	47,170	4,346	1,780		1,031	0,459	8,041	8,959	
		50	150	238,550	97,710	6,419	2,629		1,045	0,679	7,821	9,179	
	90	0	100	105,606	43,256	13,365	5,474	30	1,042	0,628	7,872	9,128	
		20	120	184,429	75,542	16,893	6,919		1,052	0,794	7,706	9,294	
		50	150	374,519	153,403	24,388	9,989		1,074	1,146	7,354	9,646	
	100	0	100	152,905	62,630	37,063	15,181	40	1,064	0,980	7,520	9,480	
		20	120	282,841	107,660	45,981	18,834		1,078	1,215	7,285	9,715	
		50	150	523,553	214,447	64,934	26,597		1,108	1,716	6,784	10,216	
110	0	100	207,461	84,976	84,315	34,536	50	1,091	1,426	7,074	9,926		
	20	120	351,414	143,939	102,823	42,116		1,110	1,739	6,761	10,239		
	50	150	687,103	281,437	142,153	58,226		1,147	2,405	6,095	10,905		

Приложение Б. Графики зависимостей

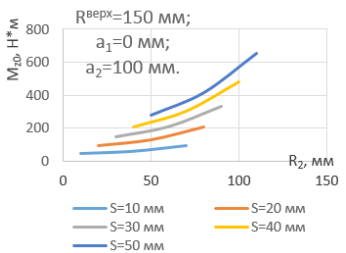
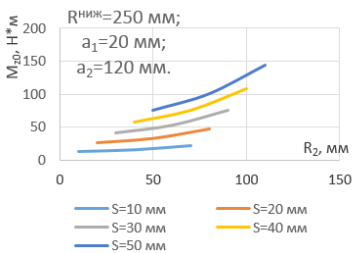
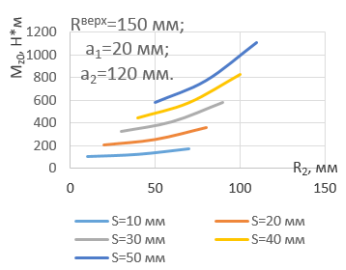
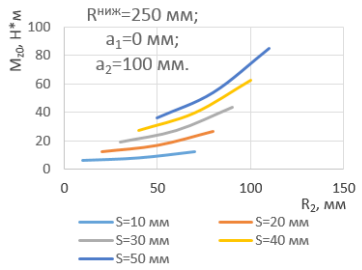
Для полученных в приложении А расчетов были созданы графики зависимостей значений изгибающих моментов по пласти и по кромке на концах досок разных толщин для двух разных координат выпиливаемой доски ($a_1 = 0$ мм и $a_1 = 20$ мм). Графики зависимостей приведены далее.

Для таблицы А1.

Для изгибающих моментов по кромке:

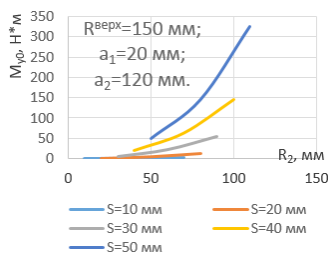
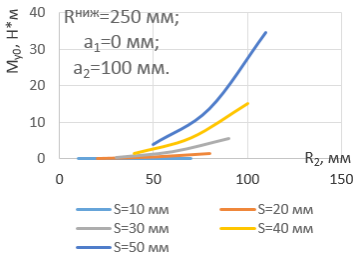
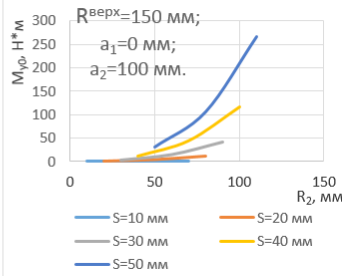
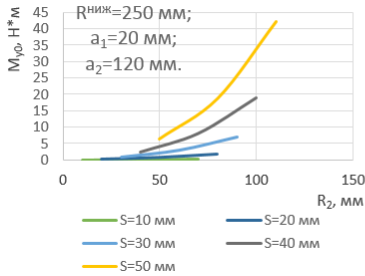


Для изгибающих моментов по пласти:

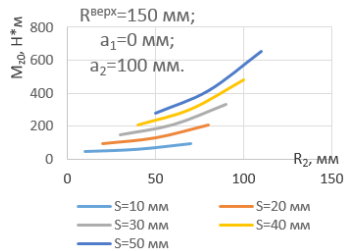
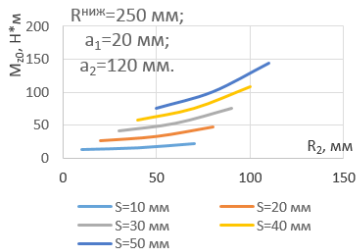
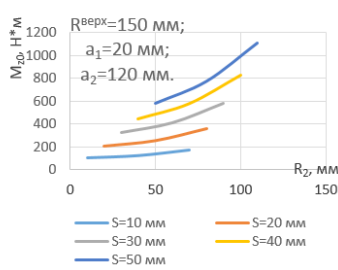
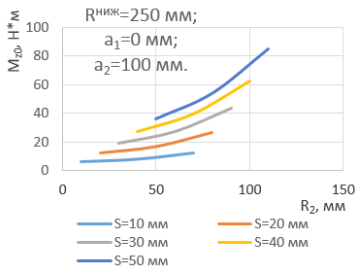


Для таблицы А2.

Для изгибающих моментов по кромке:

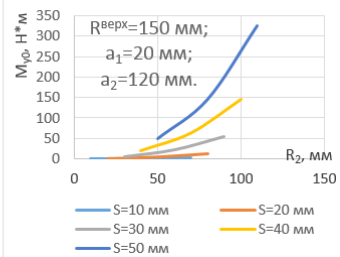
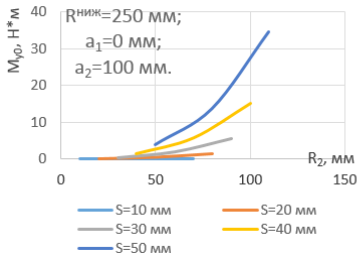
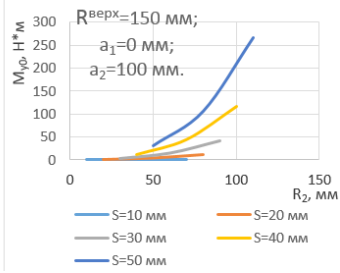
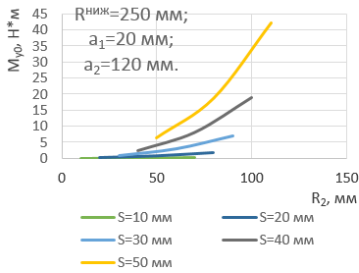


Для изгибающих моментов по пласти:

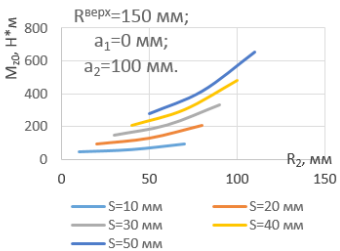
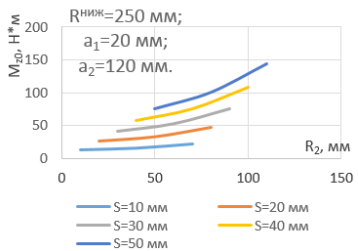
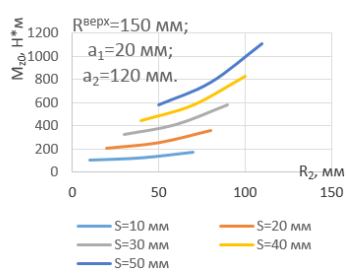
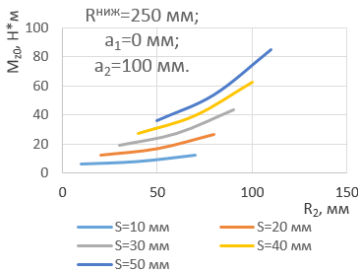


Для таблицы А3.

Для изгибающих моментов по кромке:

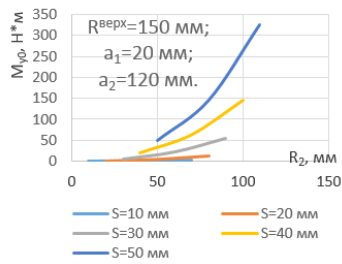
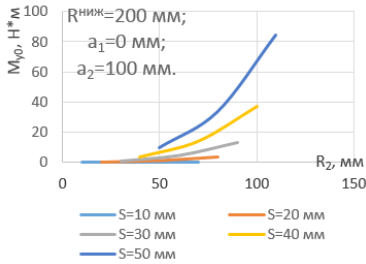
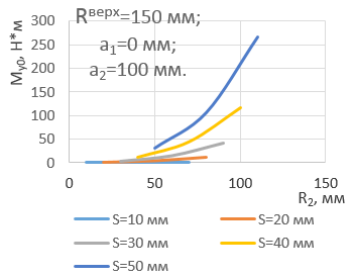
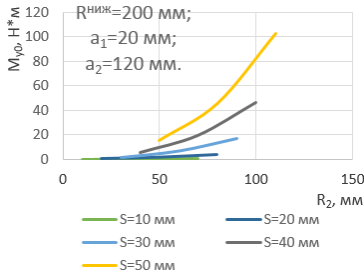


Для изгибающих моментов по пластине:

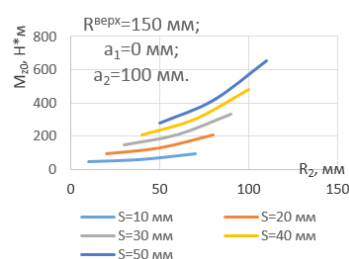
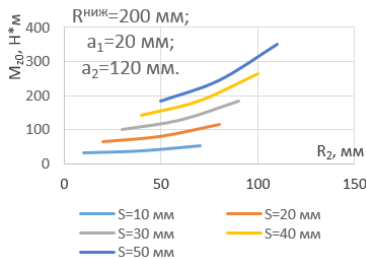
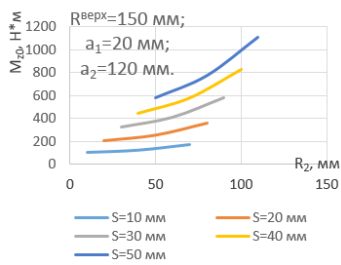
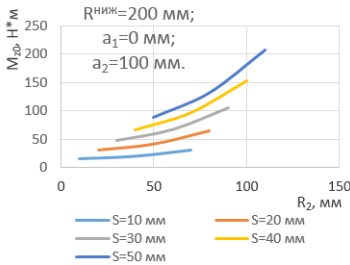


Для таблицы А4.

Для изгибающих моментов по кромке:

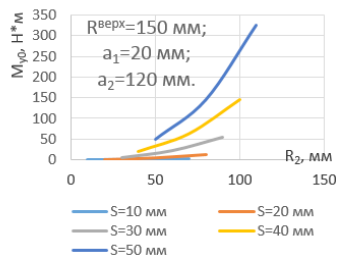
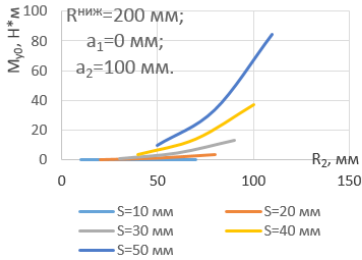
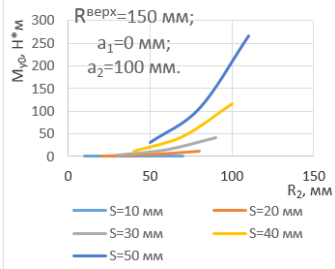
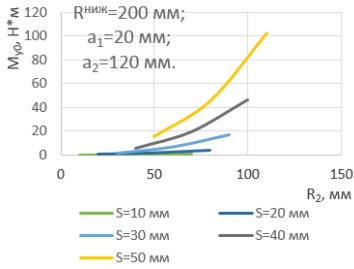


Для изгибающих моментов по пласти:

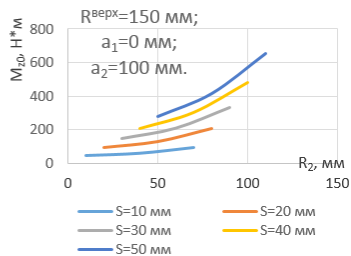
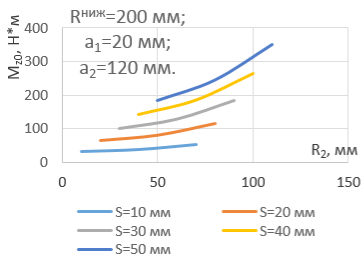
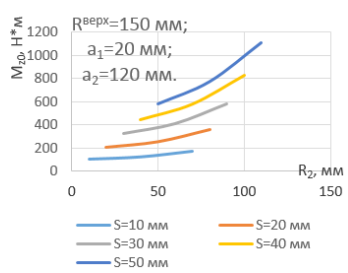
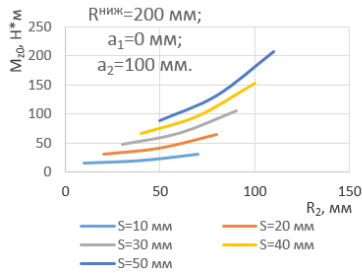


Для таблицы А5.

Для изгибающих моментов по кромке:

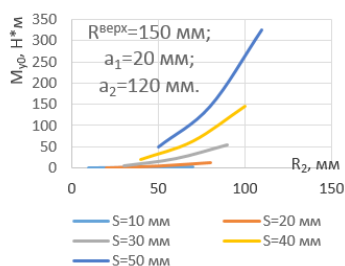
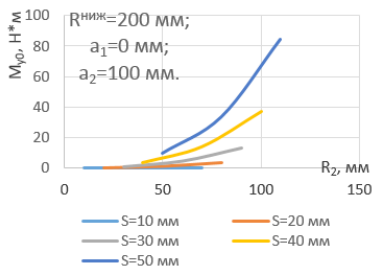
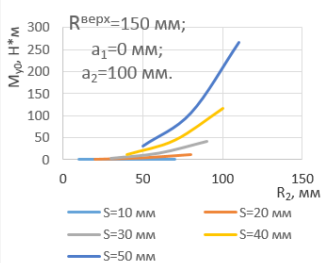
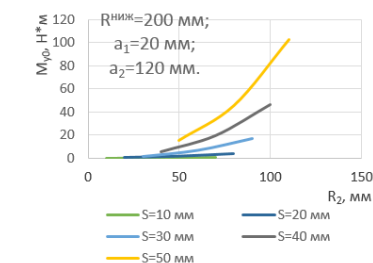


Для изгибающих моментов по пласти:

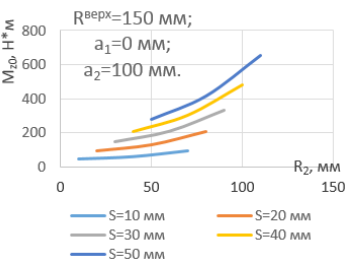
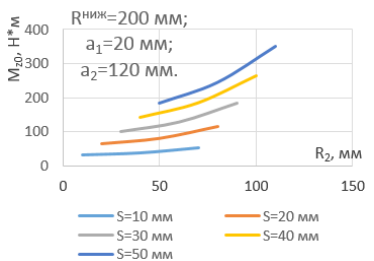
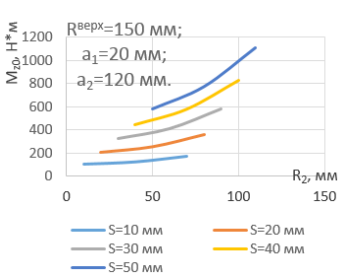
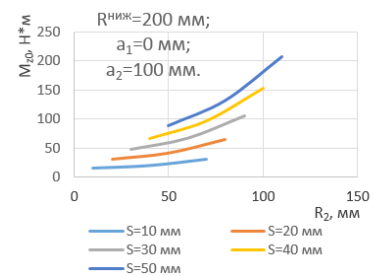


Для таблицы А6.

Для изгибающих моментов по кромке:

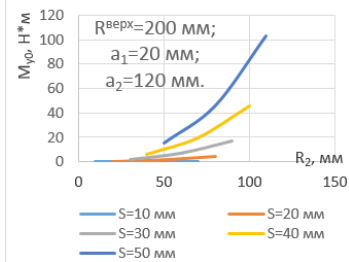
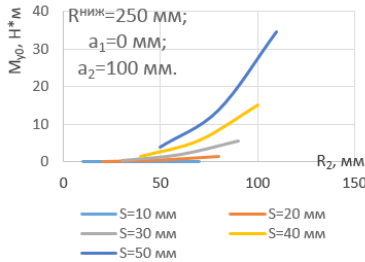
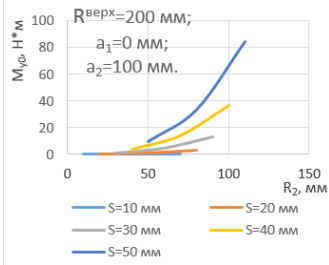
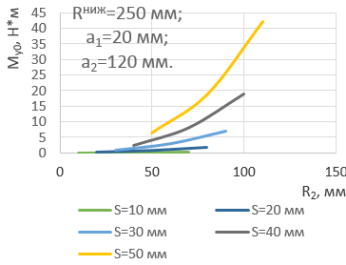


Для изгибающих моментов по пласти:

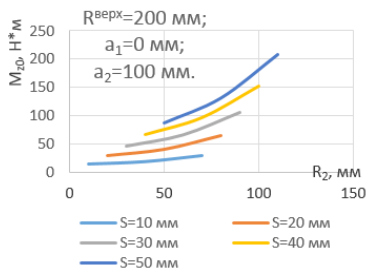
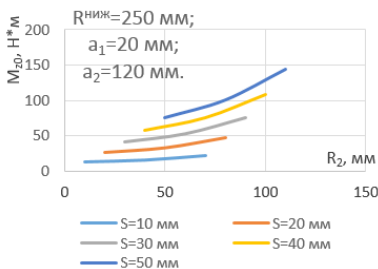
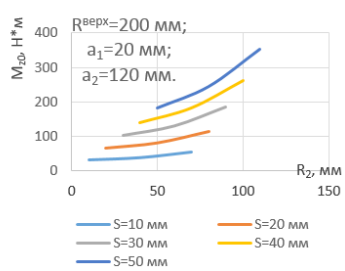
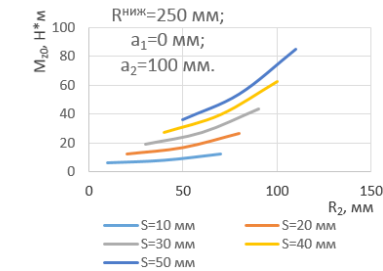


Для таблицы А7.

Для изгибающих моментов по кромке:

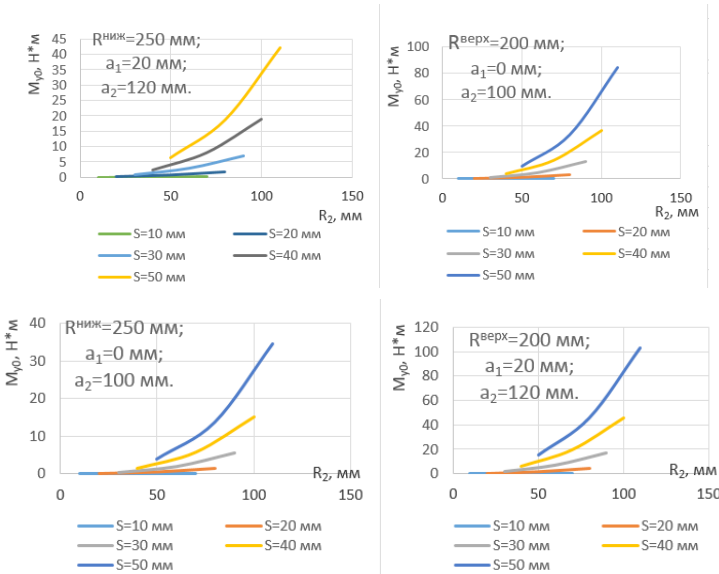


Для изгибающих моментов по пластине:

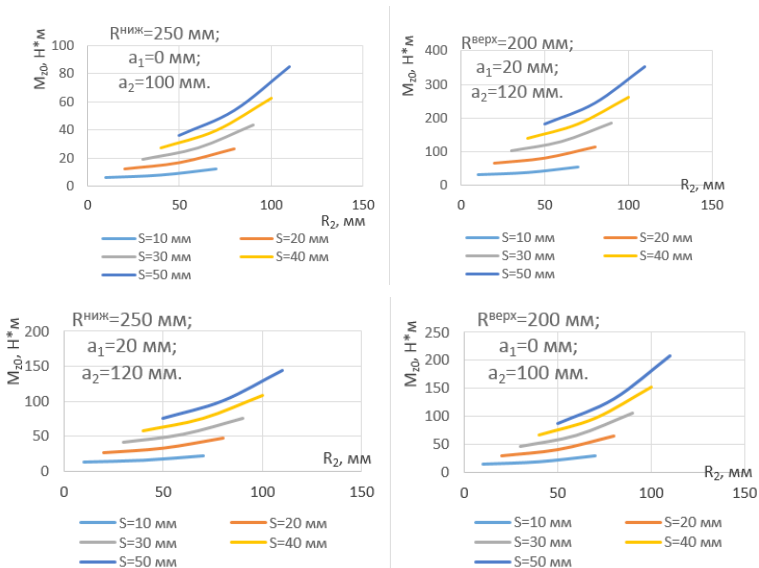


Для таблицы А8.

Для изгибающих моментов по кромке:

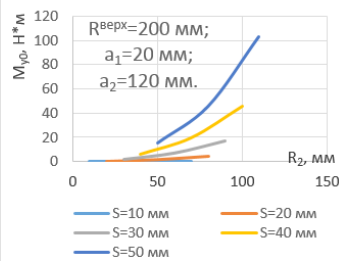
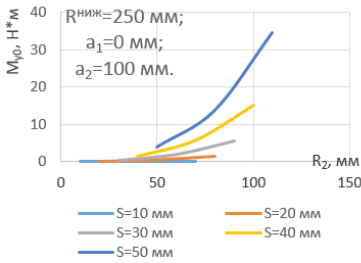
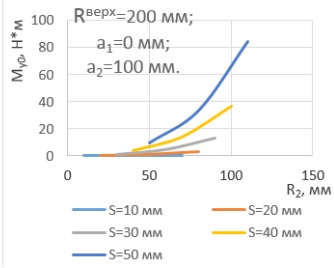
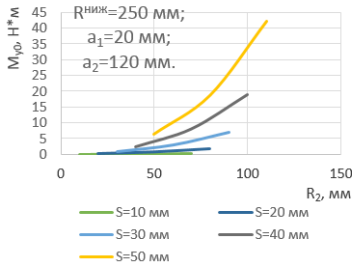


Для изгибающих моментов по пласти:

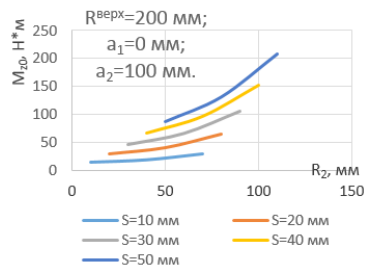
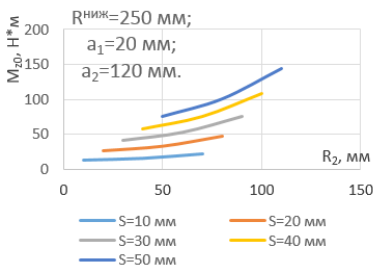
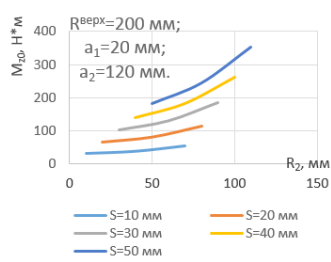
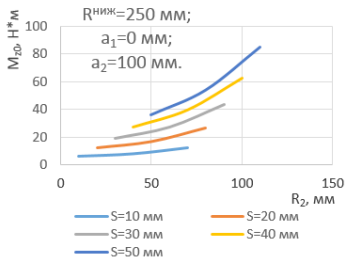


Для таблицы А9.

Для изгибающих моментов по кромке:



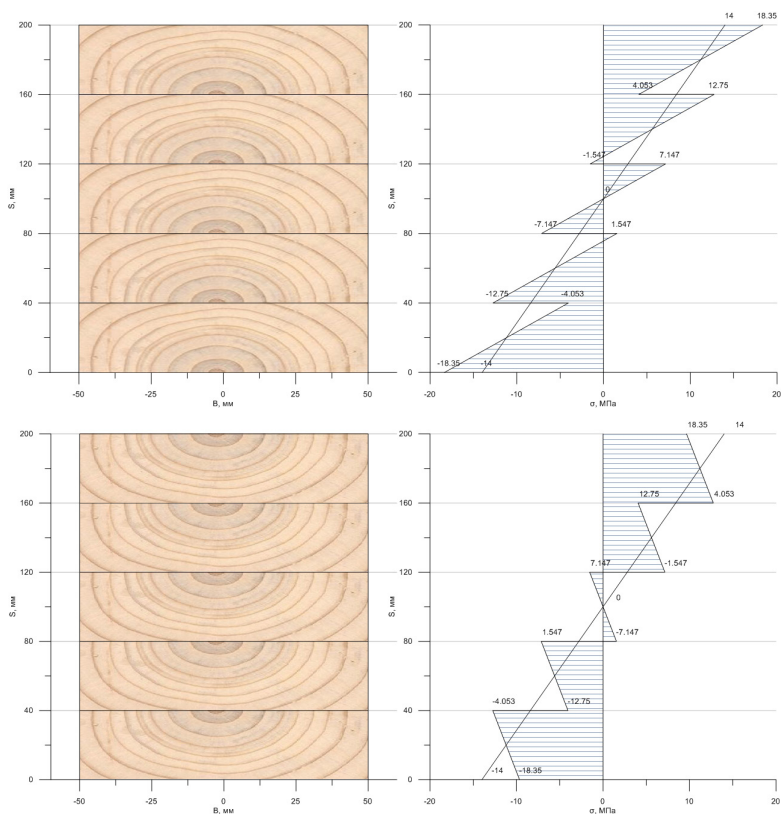
Для изгибающих моментов по пласти:



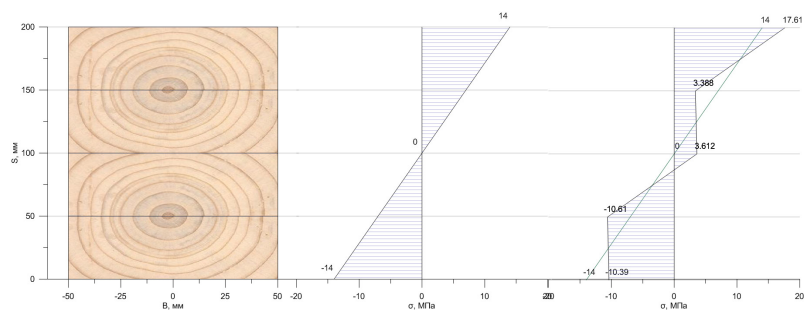
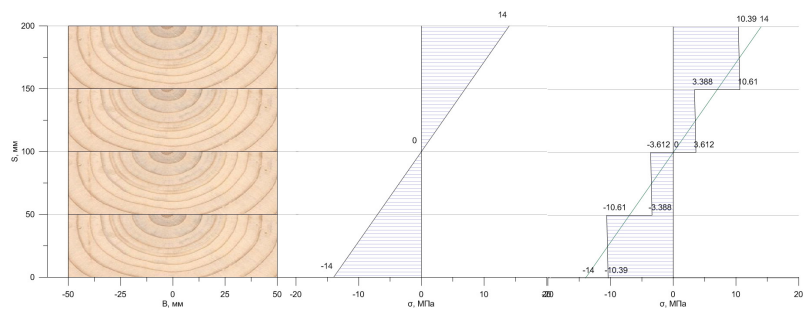
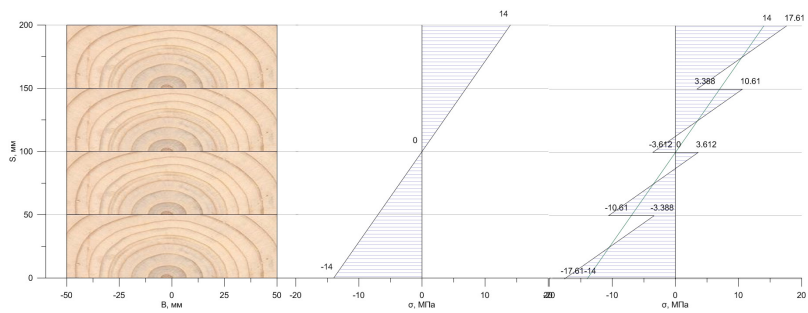
Приложение В. Эпюры напряжений в балках

Используя полученные данные из приложения А, можно построить эпюры напряжений в балках разных толщин и при разной ориентации досок (при допущении, что все доски идентичны друг другу).

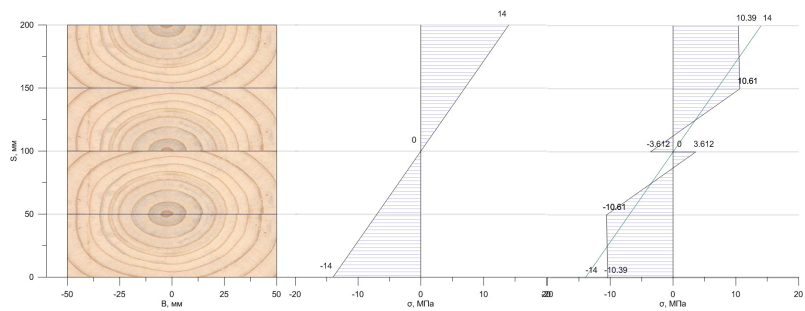
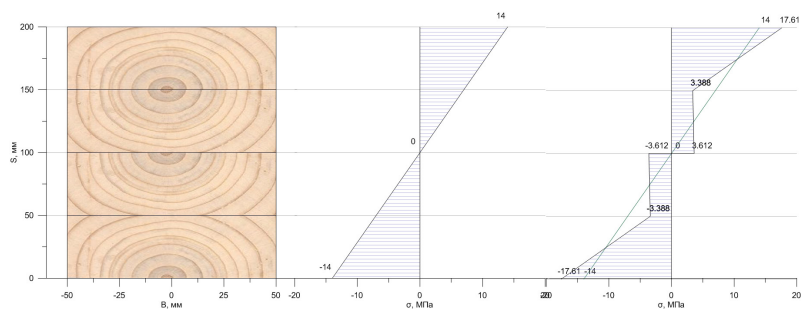
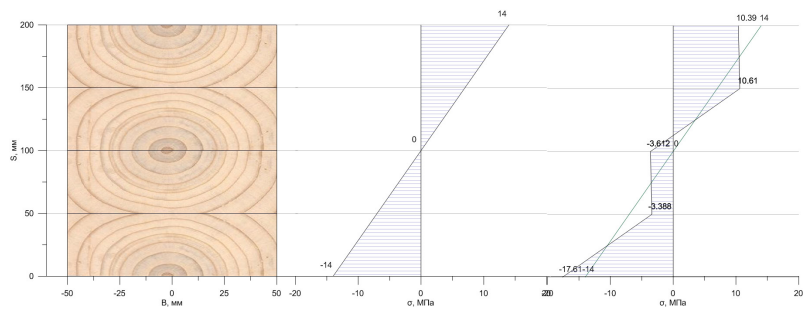
Для балки из 5-ти досок при разных ориентациях досок эпюры будут следующими (доски I сорта):



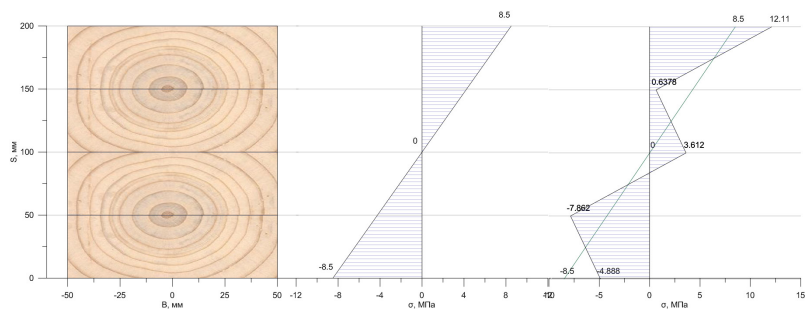
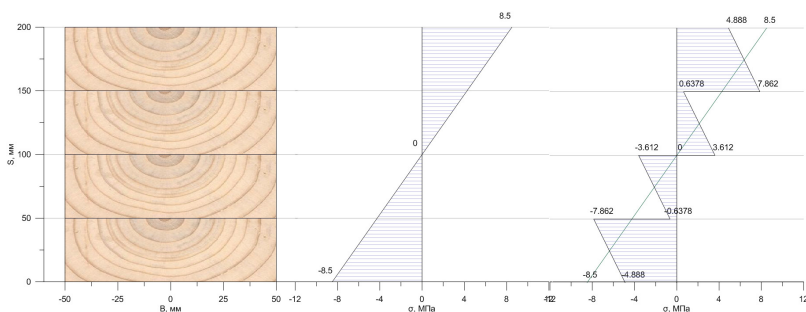
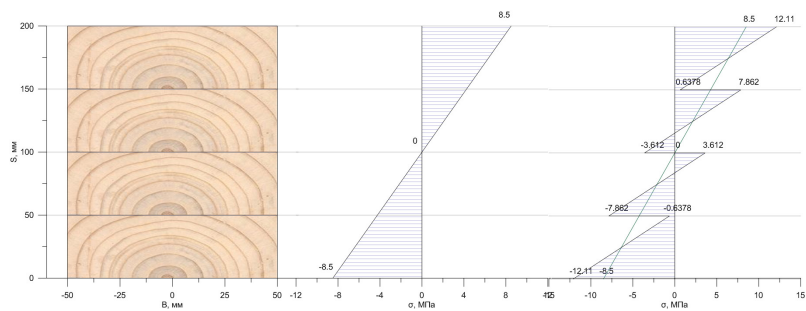
Для балки из 4-х досок (доски I сорта):



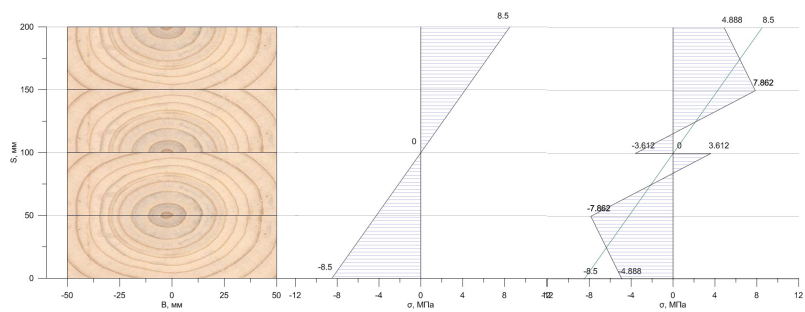
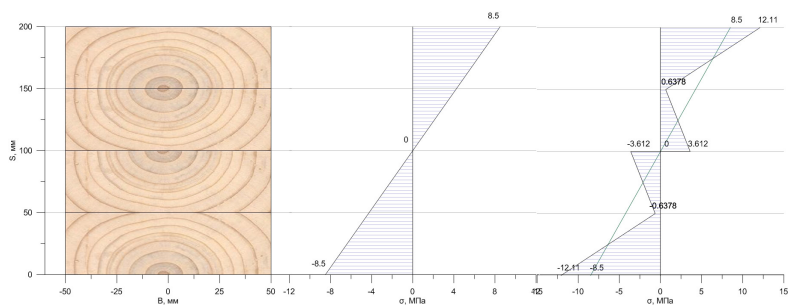
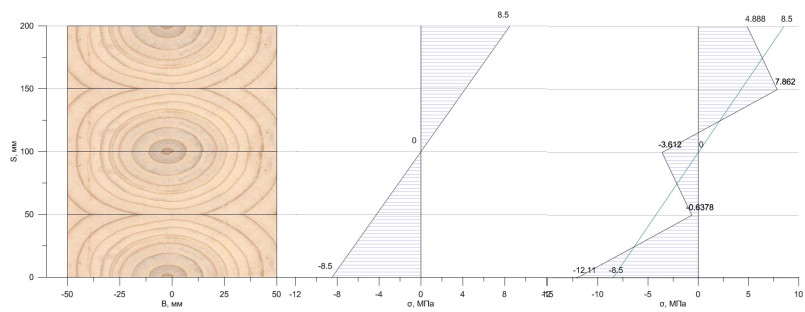
Приложения



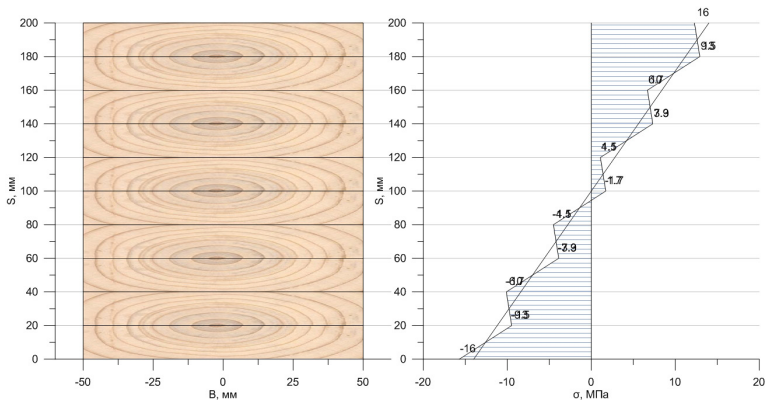
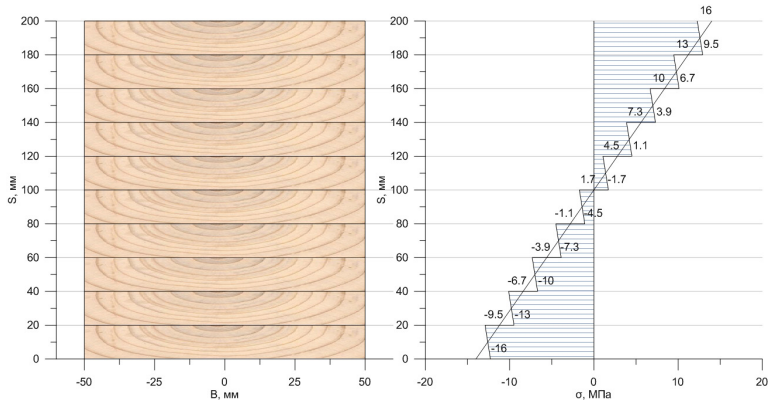
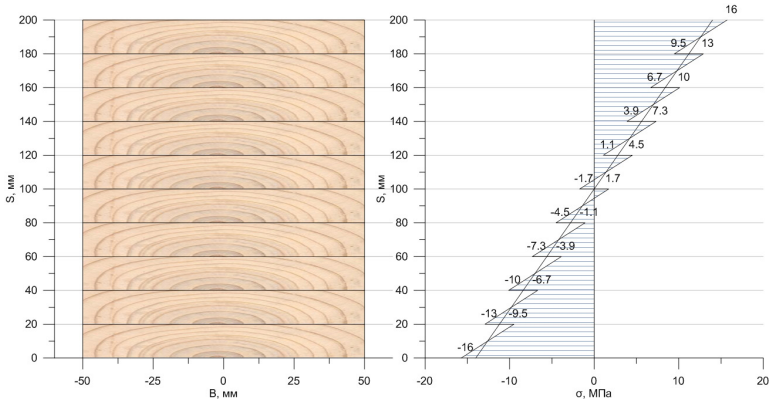
Для балки из 4-х досок (доски II сорта):



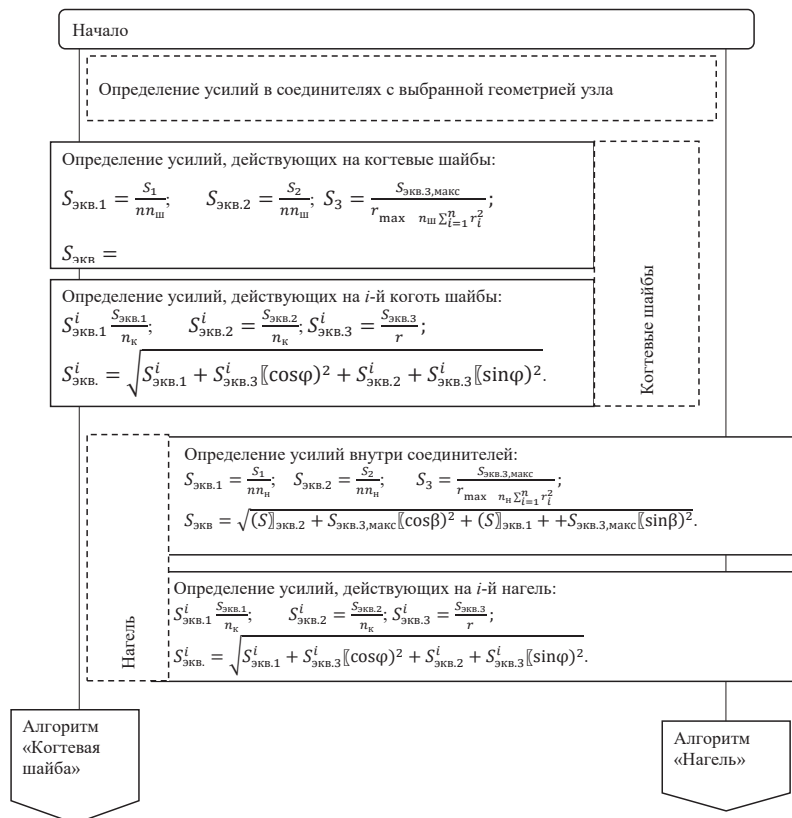
Приложения

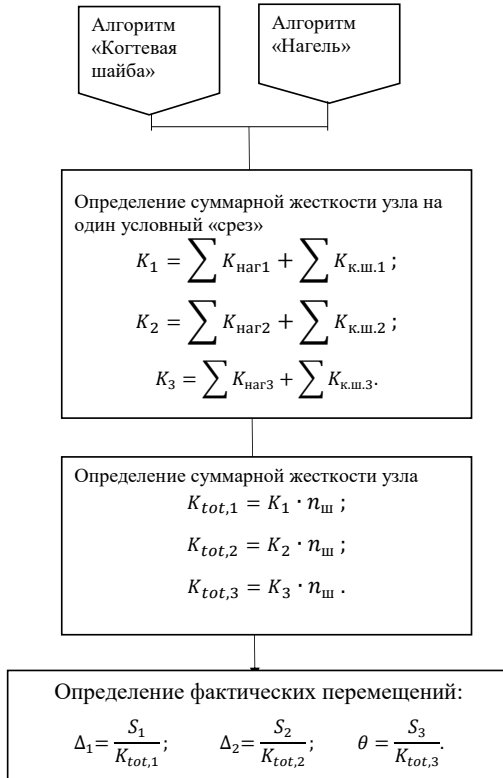


Для балки из 10-ти досок (доски I сорта):

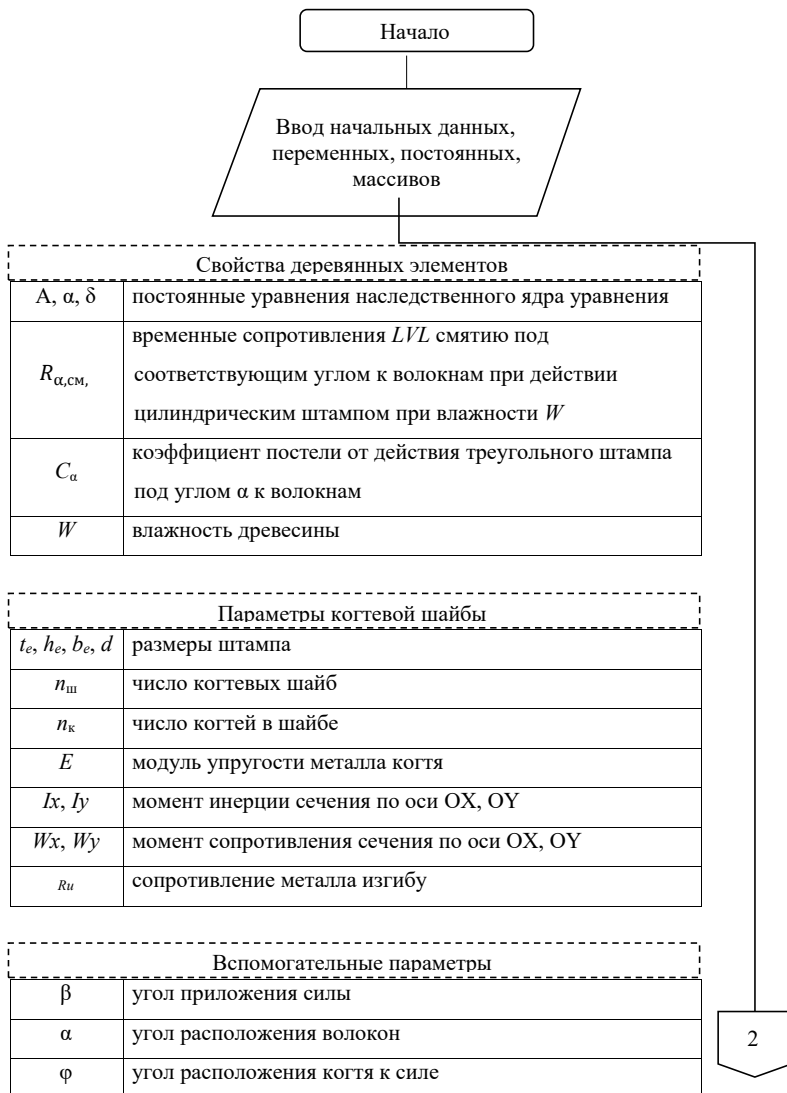


Приложение Г. Расчетный алгоритм «Узел» позволяет определить возникающие усилия и перемещения в узле





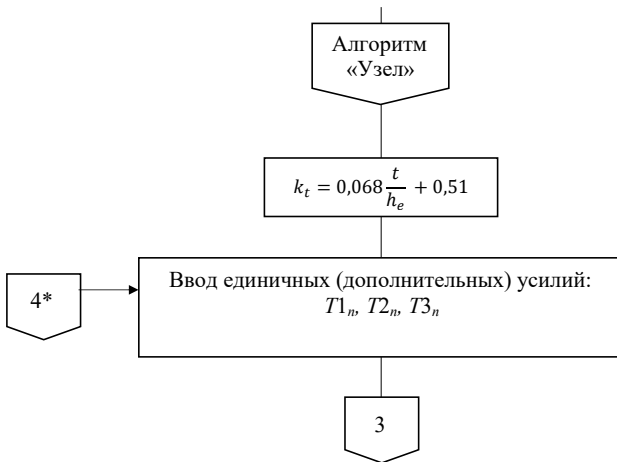
Приложение Д. Расчетный алгоритм «Когтевая шайба» позволяет определить максимальное значение нагрузки, воспринимаемое когтевой шайбой и её жесткости

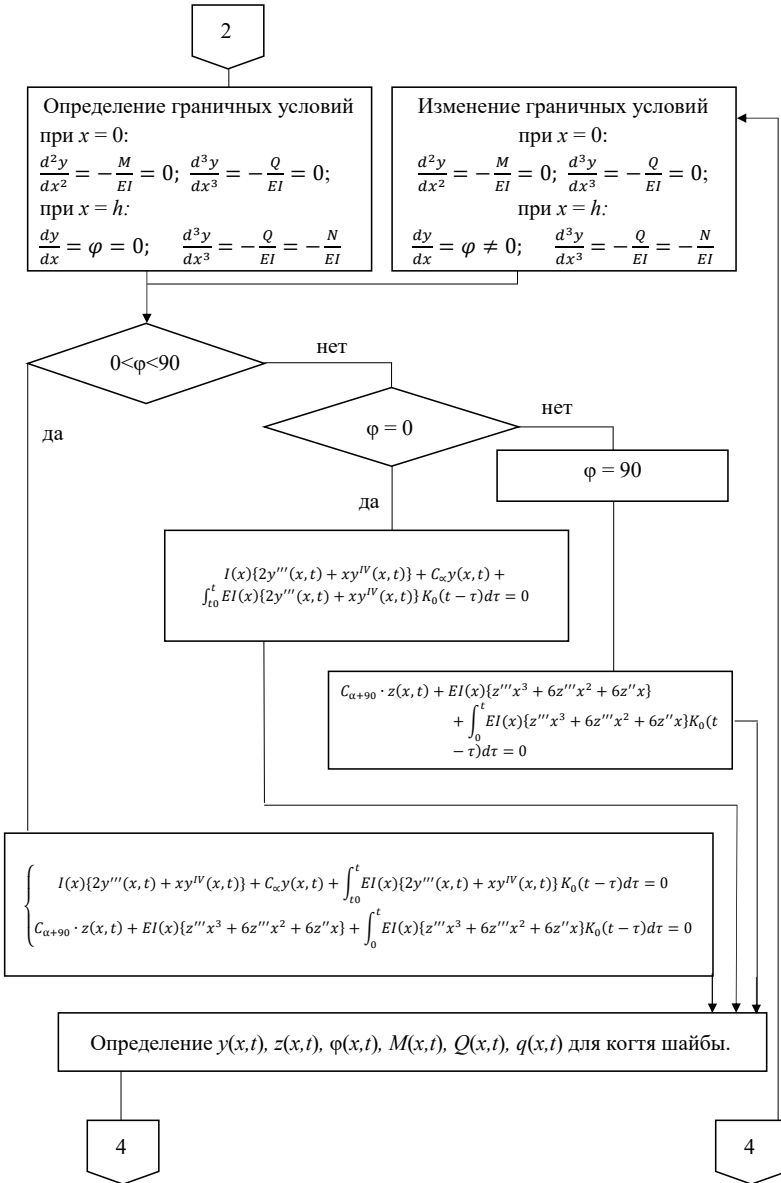


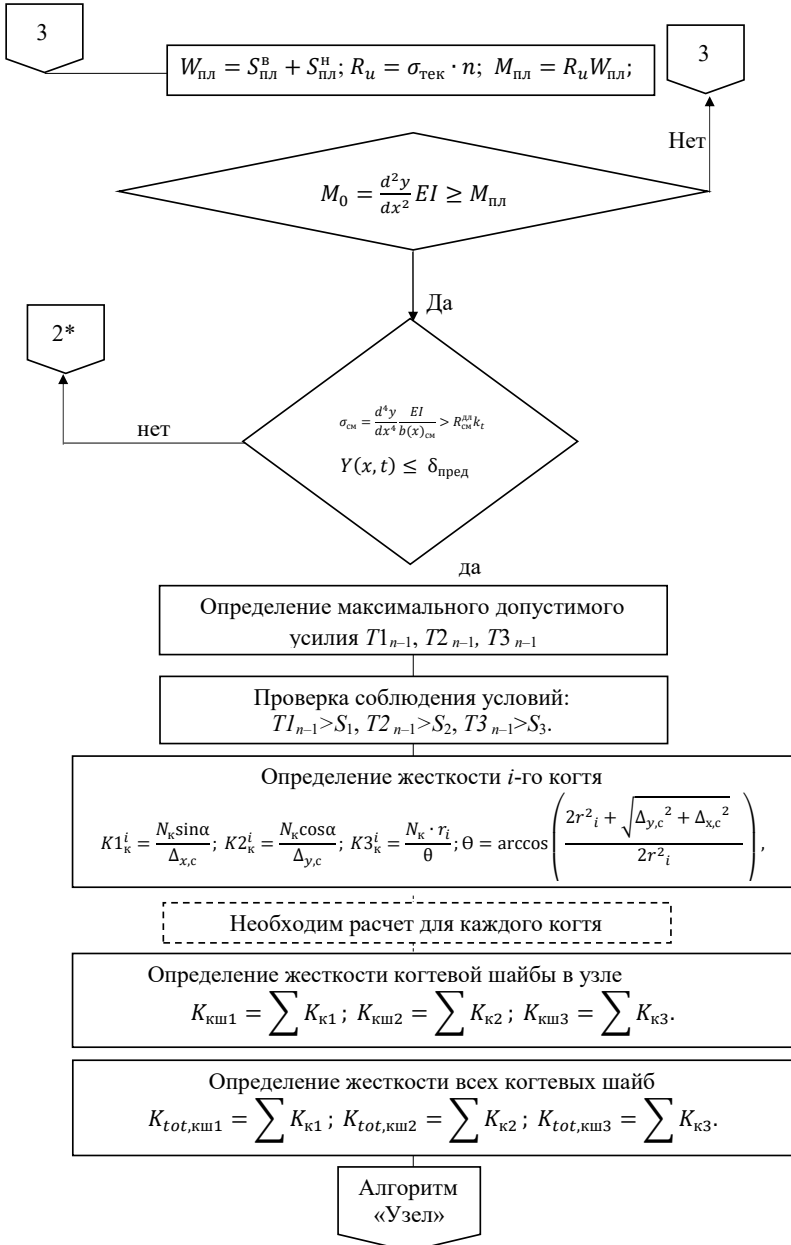
$\Delta x, \Delta y$	шаг участков по оси OX, OY
n	количество участков разбиения по оси OX, OY
t_n	количество участков оси времени
t	время нагружения
$\delta_{\text{пред}}$	предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм, нормируемое сводом правил
m, λ	коэффициенты определения балочной функции
φ_m	изменение угла поворота в основании когтя при образовании пластического шарнира

1

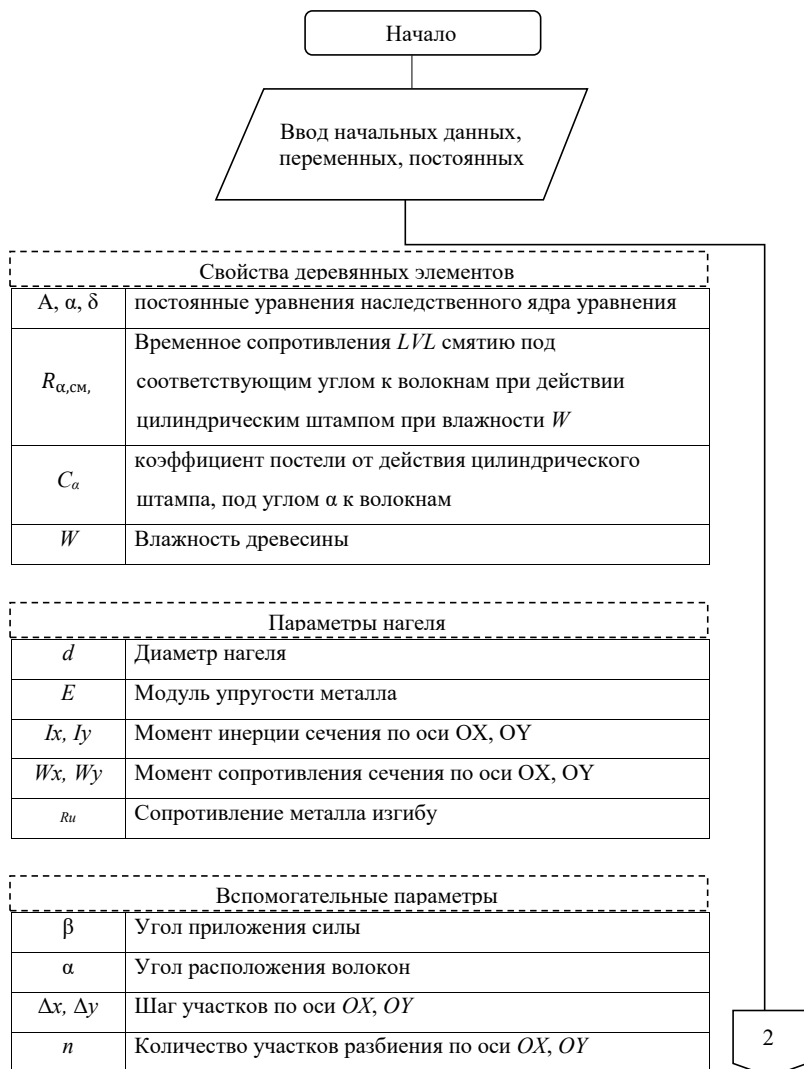
Определения расчетной схемы	
x_i, y_i	координаты расположения соединителей относительно центра вращения
l_1, l_2, l_3	толщины соединяемых элементов
$T1_n, T2_n, T3_n$	единичные усилия







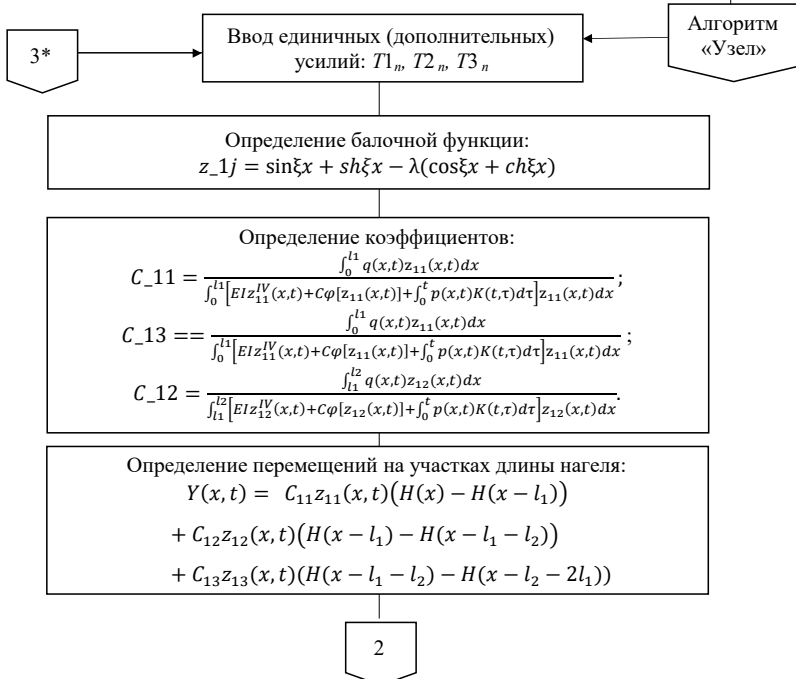
**Приложение Е. Расчетный алгоритм «Нагель»
 позволяет определить максимальное
 допустимое усилие, воспринимаемое
 нагелем, а также жесткость нагеля**

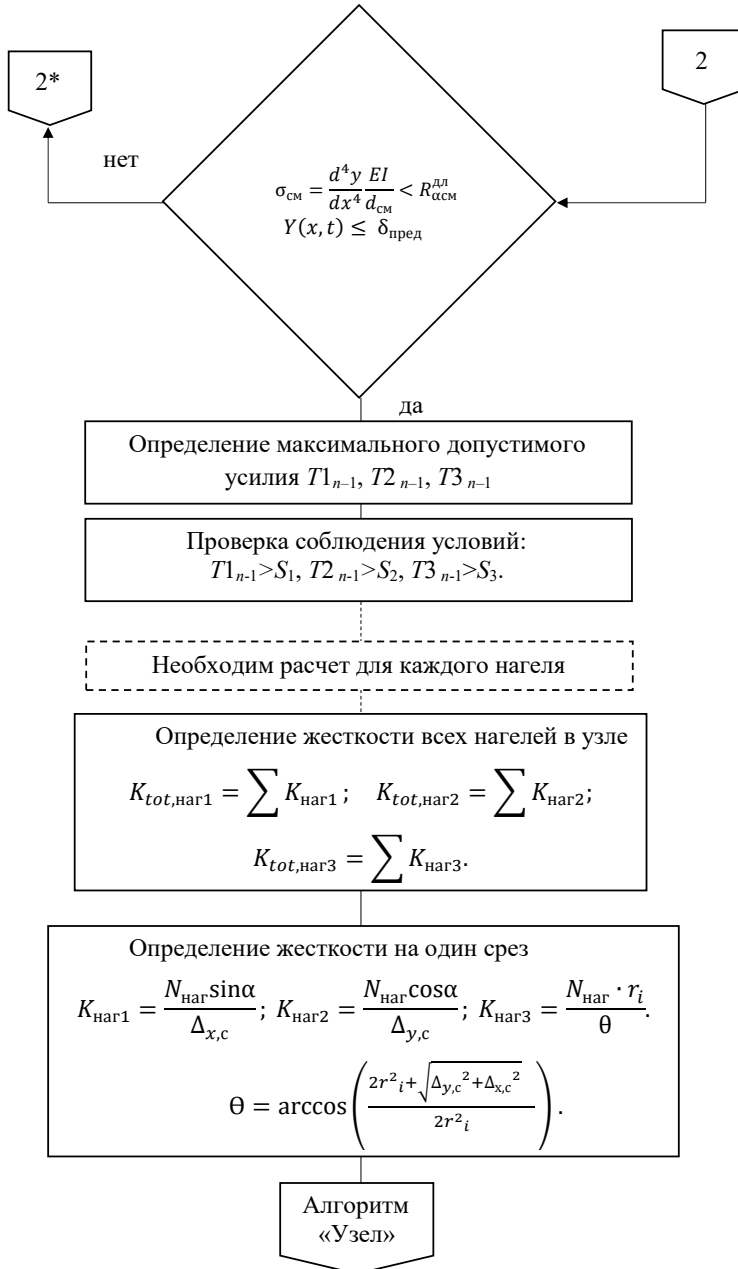


t_n	Количество участков оси времени
t	Время нагружения
$\delta_{пред}$	предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм, нормируемое сводом правил
m, λ	Коэффициенты определения балочной функции

1

Определения расчетной схемы	
x_i, y_i	Координаты расположения соединителей относительно центра вращения
l_1, l_2, l_3	Толщины соединяемых элементов
$T1, T2, T3$	Единичные усилия





Оглавление

Введение	3
Глава 1. АНИЗОТРОПИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ КАК ПРИРОДНОГО СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА	8
1.1. Строительные материалы на основе использования древесины. Достоинства и недостатки	11
1.2. Обоснование причин появления дефектов в конструкционных пиломатериалах и изделиях из них в технологическом процессе их производства.....	12
1.3. Повышение прочности деревянных клееных дощатых балок за счет использования некоторых природных особенностей древесины.....	14
1.4. Влияние начальных напряжений на прочность клееных деревянных балок	22
Выводы.....	28
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ РОСТА В СТВОЛАХ ДЕРЕВЬЕВ И ВЛИЯНИЯ ИХ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	30
2.1. Разработка математической модели начальных напряжений в стволе дерева наиболее распространенных и значимых для практики случаях.....	30
2.2. Обоснование появления продольной покоробленности пиломатериалов конструкционного назначения.....	37
2.2.1. Расчет изгибающего момента в пиломатериалах конструкционного назначения с учетом начальных напряжений	37
2.2.2. Математическая модель продольного коробления. Связь продольного коробления с напряженным состоянием элементов клееных деревянных конструкций	50
2.2.3. Способ определения величины начальных напряжений. Отбор заготовок для клееных деревянных конструкций.....	53
2.2.4. Влияние начальных напряжений на НДС клееных деревянных балок и их несущую способность	56
Выводы.....	62
Глава 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ И СЖАТИИ ВДОЛЬ ВОЛОКОН.....	64
3.1. Методика проведения лабораторных экспериментальных исследований.....	64
3.1.1. Определение предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон.....	64

3.1.2. Определение предела прочности древесины при статическом изгибе	66
3.2. Результаты экспериментального исследования прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон.....	69
3.2.1. Определение предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон.....	69
3.2.2. Определение предела прочности древесины при изгибе.....	77
3.3. Сопоставление теоретических результатов расчета соотношения пределов прочности при изгибе и сжатии с полученными экспериментальными данными.....	83
Глава 4. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С СОЕДИНЕНИЯМИ НА КОГТЕВЫХ ШАЙБАХ...	85
4.1. Общая характеристика и опыт применения когтевых шайб в деревянных конструкциях	85
4.2. Существующие теоретические основы расчета нагельных соединений с использованием когтевых шайб в деревянных конструкциях.....	91
4.3. Существующие экспериментально-теоретические методы исследования нагельных соединений с использованием когтевых шайб и определение научно-исследовательских и инженерно-прикладных задач	97
Глава 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ В LVL.....	118
5.1. Определение связи между усилием, воспринимаемым нагелем и его смещением	118
5.2. Определение связи между усилием, воспринимаемым когтем шайбы, и его смещением.....	123
5.3. Разработка методики расчета нагельных соединений на когтевых шайбах.....	128
5.4. Выводы по главе.....	138
Глава 6. ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ СОЕДИНЕНИЙ С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КЛЕЕНОГО БРУСА LVL.....	139
6.1. Исследование прочностных и жесткостных характеристик материала LVL.....	140
6.2. Определение расчетных характеристик древесины LVL при смятии штампом различной формы	143
6.2.1. Исследование влияния высоты треугольного штампа на прочность при смятии и коэффициент постели LVL при действии кратковременной нагрузки	144
6.2.2. Исследование влияния высоты треугольного штампа на прочность при смятии и коэффициент постели LVL при действии длительной нагрузки	151

6.2.3. Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и коэффициент постели <i>LVL</i> при действии кратковременной нагрузки	159
6.2.4. Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и коэффициент постели <i>LVL</i> при действии длительной нагрузки	168
6.3. Определение прочностных характеристик стали соединителей	173
6.4. Приведение параметров к расчетным значениям.....	181
6.5. Выводы по главе.....	182
Глава 7. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС СОЕДИНЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КЛЕЕНОГО БРУСА С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ	184
7.1. Действие на соединение осевого усилия	184
7.1.1. Исследование соединений фиксированной толщины элементов	184
7.1.2. Исследование зависимости НДС соединений от изменения толщин элементов <i>LVL</i>	195
7.2. Исследование влияния изгибающего момента на НДС соединения с когтевыми шайбами	199
7.3. Исследование НДС соединений с когтевыми шайбами при действии длительного усилия	205
7.4. Исследование НДС ферм из <i>LVL</i> с когтевыми шайбами при действии статической нагрузки.....	208
7.4.1. Конструирование и сборка образца конструкции для испытания	208
7.4.2. Методика и проведение испытаний сквозных ферм.....	211
7.4.3. Исследование НДС четырехугольной фермы с параллельными поясами из <i>LVL</i> с когтевыми шайбами.....	218
7.5. Расчет соединений ферм по предлагаемой методике	227
7.6. Выводы по главе	231
Глава 8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОГТЕВЫХ ШАЙБ.....	233
Заключение (Выводы и Практические рекомендации)	235
Библиографический список.....	237
Приложение А. Таблицы расчетов.....	246
Приложение Б. Графики зависимостей.....	256
Приложение В. Эпюры напряжений в балках.....	266
Приложение Г. Расчетный алгоритм «Узел» позволяет определить возникающие усилия и перемещения в узле.....	272
Приложение Д. Расчетный алгоритм «Когтевая шайба» позволяет определить максимальное значение нагрузки, воспринимаемое когтевой шайбой и ее жесткости.....	274
Приложение Е. Расчетный алгоритм «Нагель» позволяет определить максимальное допустимое усилие, воспринимаемое нагелем, а также жесткость нагеля.....	278

Научное издание

Глухих Владимир Николаевич,
Черных Александр Григорьевич,
Данилов Егор Владимирович

**ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОГТЕВЫХ
ШАЙБ И УЧЕТОМ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ**

Монография

Редактор О. Д. Камнева
Компьютерная верстка В. Е. Королевой

Подписано к печати 26.11.2018. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 16,5. Тираж 500 экз. Заказ 146. «С» 92.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.