

На правах рукописи



ЮЖИНА ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

**ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И
РАЗРУШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского»

Научный руководитель:

Константинов Александр Юрьевич,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Пушков Виктор Алексеевич,
доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной механики Саровского физико-технического института - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

Жихарев Михаил Владиленович,
доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение информационных технологий» Южно-Уральского государственного университета

Ведущая организация:

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук"

Защита состоится "16" сентября 2022 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, Н.Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6, ауд.119.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте diss.unn.ru/1277

Автореферат разослан "11" июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В последние годы возросло количество перевозок отходов ядерной энергетики, компонентов ядерных вооружений, широкого круга токсичных веществ и т.д. Возросли требования к их безопасности при транспортировке. Большое значение имеют расчеты напряженно-деформированного состояния и прочности контейнеров, в которых транспортируются вышеперечисленные материалы. Особую актуальность приобретают проблемы анализа возможных аварийных ситуаций. Подобные ситуации, сопровождающиеся интенсивными динамическими воздействиями, возможны при транспортировке, падении контейнеров, террористических актах, техногенных и природных катастрофах.

В связи с повышением требований обеспечения безопасности окружающей среды становится весьма актуальной и привлекает внимание исследователей проблема создания надежных авиационных контейнеров для воздушной транспортировки радиоактивных материалов. Ее сложность обусловлена высокими уровнями воздействий, характерными для авиационной аварии. Так, в соответствии с нормами МАГАТЭ авиаконтейнер должен выдерживать удар о жесткую преграду под любым углом со скоростью не менее 90 м/с и последующий авиационный пожар длительностью до 1 часа с температурой горения углеводородного топлива 1010 °С.

Древесина разных пород деревьев используется в качестве одного из демпфирующих материалов. Она способна смягчить результаты высокоскоростных ударных воздействий, например, на контейнеры и их содержимое при перевозке авиационным транспортом.

На сегодняшний день древесину принято считать материалом, свойства которого обладают ортогональной анизотропией. При расчете деревянных конструкций обычно используют приближение трансверсально-изотропного материала, свойства которого различаются вдоль и поперек волокон. Для достоверного расчета поведения контейнеров с подобными демпфирующими материалами при ударных воздействиях необходимы данные по динамическим свойствам древесины, в частности, для численных расчетов необходимы динамические диаграммы деформирования и характеристики прочности различных пород древесины, а также достоверные верифицированные математические модели, описывающие поведение древесины под воздействием ударных нагрузок.

Степень разработанности темы. Древесина, обладая относительно малой плотностью при достаточной прочности, применяется уже длительное время в качестве материала, демпфирующего импульсные нагрузки. В различных работах и систематических исследованиях динамических свойств древесины неоднократно отмечалось, что, несмотря на уникальные качества древесины, данные о ее динамических физико-механических свойствах скудны и противоречивы.

Поскольку механические свойства древесины сильно зависят от места произрастания, её возраста, от места вырезки образца, то получаемые разными авторами результаты могут достаточно сильно отличаться друг от друга. В связи с чем множество зарубежных и ряд отечественных ученых продолжают изучать динамические свойства различных пород древесины. Существенный вклад в развитии данного направления внесли: Большаков А.П., Брагов А.М., Ломунов А.К., Новиков С.А., Константинов А.Ю., Сергеичев И.В., Пушкин В.А., Ерофеев В.И., Герасимов С.И., Adalian C., Allazadeh M.R., Ashby M.F., Bjorkqvist T, Buchar J., Engberg B.A., Gilbertson C.G., Gray III G.T., Gutkowski R.M., Johnson

W., Kasal B., Kokta B.V., Morlier P., Norimoto M., Obataya E., Peng C., Polocoser T., Reddy T.Y., Reid S.R., Salmen L., Salminen L.I., Severa L., Stockel F., Uhmeier A., Wosu S.N. и многие другие.

Цель работы заключается в установлении основных закономерностей процессов высокоскоростного деформирования и разрушения некоторых пород древесины с учетом влияния на ее физико-механические характеристики скорости деформации, угла вырезки и вида напряженно-деформированного состояния (НДС).

Ключевые задачи:

- адаптация существующих экспериментальных комплексов для исследования динамического деформирования и разрушения образцов древесины;
- разработка новых схем испытаний для определения механических характеристик древесины в условиях ударного нагружения;
- проведение динамических испытаний различных пород древесины с целью получения динамических диаграмм деформирования, предельных прочностных и деформационных характеристик при различных типах испытаний (сжатие при разном виде НДС, изгиб);
- получение и анализ зависимостей прочностных и деформационных характеристик, а также энергоемкости некоторых пород древесины от скорости деформации и угла вырезки образцов;
- осуществление параметрической идентификации математической модели поведения сосны из ПК LS-DYNA;
- проведение верификации математической модели, описывающей поведение сосны под действием динамической нагрузки.

Научная новизна:

- реализована и апробирована новая схема определения предельной деформации при растяжении перпендикулярно волокнам древесины на базе техники мерных стержней, эксперимента на ударный трехточечный изгиб балки и метода корреляции цифровых изображений;
- предложена и реализована новая экспериментальная схема для определения коэффициента Пуассона древесины с использованием радиоинтерферометра;
- проведены обширные экспериментальные исследования динамического деформирования и разрушения нескольких пород древесины при разных видах напряженно-деформированного состояния (одноосное сжатие, сжатие при объемном напряженном состоянии, изгиб) и получены новые данные в виде диаграмм деформирования и характеристик прочности, энергоемкости, а также их зависимостей от скорости деформации и угла вырезки образцов при скоростях деформации $5 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$;
- на основании полученных экспериментальных данных для сосны выполнена идентификация параметров модели MAT_WOOD из ПК LS-DYNA, отвечающих за влияние скорости деформации на прочностные характеристики этого материала;
- проведена верификация модели динамического поведения сосны с использованием программного комплекса LS-DYNA¹.

¹ Лицензия Customer #244793

Теоретическая значимость заключается в наработке аналитических и экспериментальных данных поведения различных пород древесины при динамическом высокоскоростном нагружении.

Практическая значимость заключается в получении экспериментальных данных в виде динамических диаграмм деформирования, предельных прочностных и деформационных характеристик, показателей энергопоглощения некоторых пород древесины, а также верифицированной математической модели поведения сосны, которые востребованы при расчете напряженно-деформированного состояния и прочности надежных и безопасных контейнеров для транспортировки радиоактивных материалов автомобильным, железнодорожным и авиационным транспортом, а также других конструкций и изделий, в которых древесина может выполнять роль демпфирующего материала. Нарботанные данные могут быть рекомендованы к использованию ведущими конструкторами отечественных исследовательских центров, занимающимися разработкой методов безопасной транспортировки грузов повышенной ответственности атомных станций, опасных технологических производств химической промышленности, гражданских объектов, а также объектов оборонного комплекса (РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, ОКБМ Африкантов, ОАО «Атомэнергопроект»).

Методология и методы исследования основаны на использовании экспериментальных методов исследования динамических свойств древесины, методах математического моделирования и численного анализа.

Основу экспериментальных комплексов составили динамические установки, реализующие метод Кольского и его модификации на базе мерных стержней диаметром 20 и 57 мм. В качестве методов измерения использованы методы динамической тензометрии, радиоинтерферометрии и метод корреляции цифровых изображений по данным высокоскоростной видеорегистрации. Для автоматизированной обработки экспериментальных данных², получаемых при использовании метода Кольского, в коллективе соавторов разработан и зарегистрирован программный комплекс. Математическая модель поведения древесины основана на модели трансверсально-изотропного повреждаемого материала, реализованной в программном комплексе LS-DYNA. Численное моделирование выполнено с использованием метода конечного элемента и явной схемы интегрирования уравнений по времени, также реализованных в программном комплексе LS-DYNA.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика определения динамических характеристик прочности древесины при трехточечном изгибе с использованием метода корреляции цифровых изображений;
2. Методика определения коэффициента Пуассона на базе радиоинтерферометрического измерения смещений боковой поверхности образца при динамическом нагружении сжатием;
3. Результаты экспериментального исследования динамических свойств нескольких пород древесины в виде динамических диаграмм деформирования, предельных прочностных характеристик, показателей энергопоглощения в зависимости от скорости

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020666341

деформации, угла вырезки, типа испытаний (одноосное напряженное состояние и одноосная деформация, изгиб).

4. Идентифицированная на основе результатов экспериментального исследования динамических свойств сосны и верифицированная с использованием разработанных и реализованных верификационных экспериментов модель динамического поведения сосны из программного комплекса LS-DYNA.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается использованием экспериментального оборудования, основанного на современных и обоснованных методах динамического исследования механических свойств материалов. При проведении каждого испытания выполнялась тщательная подготовка образцов и калибровка измерительных систем, применялось параллельное измерение параметров процессов разными методами. Полученные в ходе исследования экспериментальные данные качественно и количественно хорошо согласуются с аналогичными результатами, полученными отечественными и зарубежными авторами. Для численного анализа процессов деформирования использовался известный общепризнанный программный продукт LS-DYNA.

Основные результаты исследования представлены в 15 публикациях, докладывались и обсуждались на: XIV Международной научно-технической конференции «Dynamic of Technical Systems» (Ростов-на-Дону, 2018 г.); Международной конференции «International Conference on Nonlinear Solid Mechanics (ICoNSoM2019)» (Рим, 2019 г.); «The sixteenth international conference on civil, structural & environmental engineering computing» (Riva del Garda, Италия, 2019); XXVI, XXVII Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова (Кременки, 2019, 2020гг.); Международной научной конференции «Проблемы прочности, динамики и ресурса» (Нижний Новгород, 2019, 2020 гг).

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 15 работах [1-15], из них 4 статьи [1-4] опубликованы в ведущих научных журналах (ВАК) и 5 статей [5-9] в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и/или Web of Science.

Личный вклад:

– обработка полученных данных и построение динамических диаграмм и основных зависимостей [1-9];

- численное моделирование динамического деформирования сосны [6];
- идентификация и верификация модели поведения сосны [6].

Основные результаты диссертационной работы (методические разработки, экспериментальные данные) были получены и опубликованы в соавторстве в статьях [1-9], в тезисах и докладах на конференциях [10-15]. Постановка задач и общее руководство исследованиями принадлежит Константинову А.Ю., Брагову А.М., Ломунову А.К. Помощь и содействие при подготовке и проведении экспериментов оказывали Гонов М.Е., Баландин Вл.Вас., Баландин Вл.Вл.

Диссертационная работа выполнена при поддержке различных фондов, ведомств и государственных программ:

- аналитический обзор, приведенный в главе 1, выполнен при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-19-00283;
- Разработка новых схем динамических испытаний древесины, описанных в главе 2, выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-19-00138;
- Экспериментальное исследование динамического поведения древесины нескольких пород дерева при высокоскоростном сжатии, результаты которого представлены в разделе 3.2, выполнено при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации в рамках Постановления №220 от 09.04.2010 (№14.Y26.31.0031 от 05.02.2018);
- Экспериментальное исследование динамического деформирования и разрушения сосны при разных видах напряженно-деформированного состояния (сжатие, изгиб, сжатие в обойме), результаты которого изложены в разделах 3.2.5, 3.3 и 3.4, выполнено за счет гранта РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90226;
- Численное моделирование, идентификация и верификация модели сосны, представленные в главе 4 выполнены при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (внутренний номер Н-496-99_2021-2023).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы из 159 наименований, 163 страниц текста, 137 рисунков и 27 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. А.Ю. Константинову, а также всем сотрудникам лаборатории динамических испытаний материалов НИИМ ННГУ за ценные советы и помощь в проведении экспериментов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, научной новизны и практической значимости, сформулирована цель исследования и основные задачи.

Первая глава представляет собой обзор теоретических и экспериментальных исследований ведущими отечественными и зарубежными авторами, среди которых Большаков А.П., Брагов А.М., Ломунов А.К., Новиков С.А., Константинов А.Ю., Сергеичев И.В., Пушков В.А., Ерофеев В.И., Герасимов С.И., Adalian C., Allazadeh M.R., Ashby M.F., Bjorkqvist T, Buchar J., Engberg B.A., Gilbertson C.G., Gray III G.T., Gutkowski R.M., Johnson W., Kasal B., Kokta B.V., Morlier P., Norimoto M., Obataya E., Peng C., Polocoser T., Reddy T.Y., Reid S.R., Salmen L., Salminen L.I., Severa L., Stockel F., Uhmeier A., Wosu S.N. и многие другие.

В данной главе рассмотрены ортогональные свойства древесины, особенности ранней и поздней древесины, влияние размера образца при динамических испытаниях, понятие усталости древесины. Проанализированы влияние скорости деформации при динамическом сжатии, методы определения коэффициента Пуассона, а также некоторые модели древесины.

Установлено, что причиной возникновения эффектов внутреннего трения в древесине являются области лигнина и целлюлозные микрофибриллы (рисунок 1), которые по своей структуре являются кристаллическими, что приводит к вязкоупругому поведению – внутреннему демпфированию. Для улучшения демпфирующих свойства рекомендовано выбирать древесину с низким углом микрофибрилл.

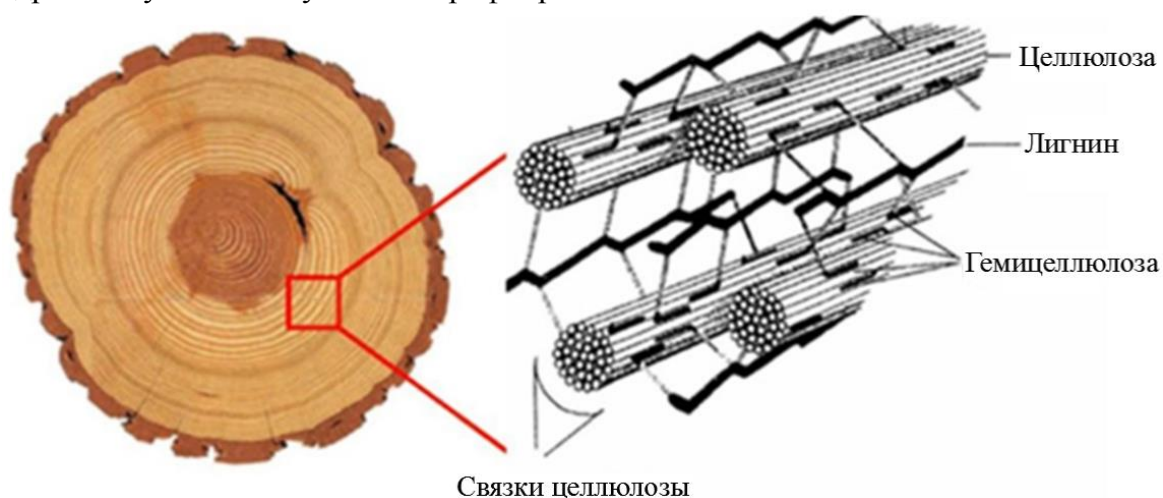


Рисунок 1. Области лигнина в древесине

Отмечено, что кривая напряжение-деформация при динамическом сжатии древесины состоит из трех отдельных частей: начальной упругой области, области текучести и области уплотнения. Основные характеристики сжатия, то есть составные части кривой напряжение-деформация и разрушение волокон, не зависят от температуры. Модуль Юнга значительно больше в продольном направлении, чем в радиальном и тангенциальном направлениях. Скорость деформации, температура и влажность оказывают большое влияние на прочностные свойства древесины.

В результате различия в механических свойствах древесных волокон во время сжатия волокна ранней древесины могут быть разрушены, в то время как волокна поздней древесины остаются неповрежденными.

Вторая глава посвящена методам экспериментального исследования поведения древесины при динамическом нагружении.

Для проведения экспериментального исследования древесины выбрано несколько экспериментальных схем, базирующихся на технике мерных стержней, поскольку метод Кольского является одним из наиболее распространенных методов динамических испытаний материалов различной физической природы. Напряженно-деформированное состояние образца в этом методе близко к однородному, а деформирование образца аналогично квазистатическому, но происходящему с высокими скоростями деформации. Описаны некоторые модификации Метода Кольского, например, испытание образца в жесткой обойме, позволяющее проводить динамические эксперименты в условиях пассивного ограничения радиальной деформации при объемно-напряженном состоянии и одномерной деформации.

При испытаниях древесины на сжатие имеет место большая разница в акустических импедансах ρC мерных стержней и образца. Используемая в работе модификация метода Кольского дает возможность испытывать образцы при многократном нагружении в одном эксперименте. При этом длина опорного стержня должна быть в несколько раз больше длины нагружающего стержня, чтобы обеспечить неискаженную регистрацию прошедшего

сигнала в нескольких циклах нагружения (рисунок 2). В результате образец во время испытания подвергается многократному нагружению, накапливая в каждом цикле определенную деформацию.

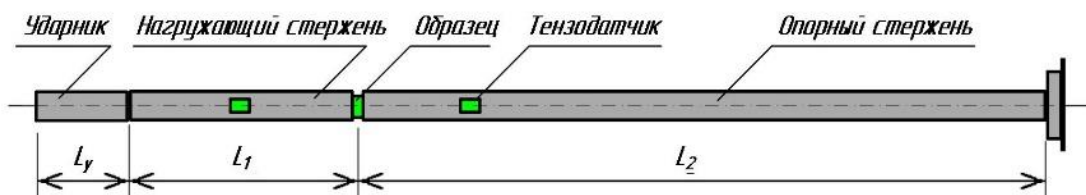


Рисунок 2. Схема установки на многократное нагружение и осциллограмма при испытаниях древесины

Рассмотрены современные средства регистрации быстропротекающих процессов, такие как метод корреляции цифровых изображений по данным высокоскоростной видеорегистрации. Данный метод позволяет определять параметры деформирования образцов при ударном нагружении. В работе на основе этого метода предложена и реализована схема определения предельной деформации разрушения при динамическом трехточечном изгибе балок (рисунок 3). Определение предельной деформации при этом проводится методом экстраполяции полей деформаций, определенных методом корреляции цифровых изображений (рисунок 4, 5). Условия нагружения (скорость деформации) оцениваются путем дифференцирования историй изменения деформаций в точке зарождения трещины.



Рисунок3. Видеорегистрация процесса динамического изгиба балки

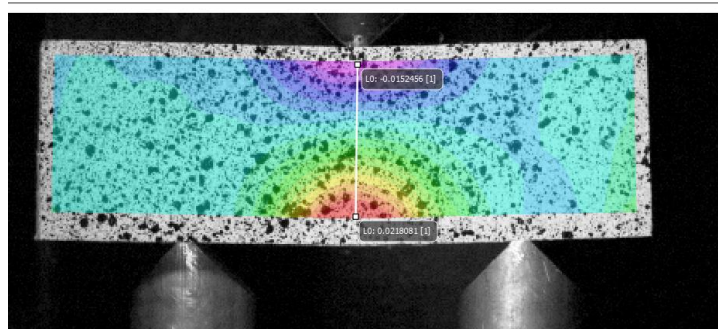


Рисунок4. Поля деформаций в нагруженной балке

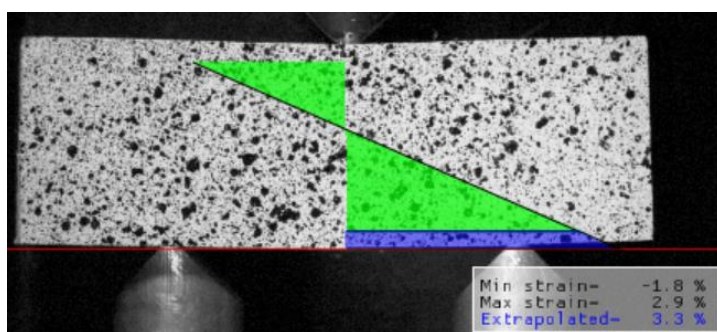
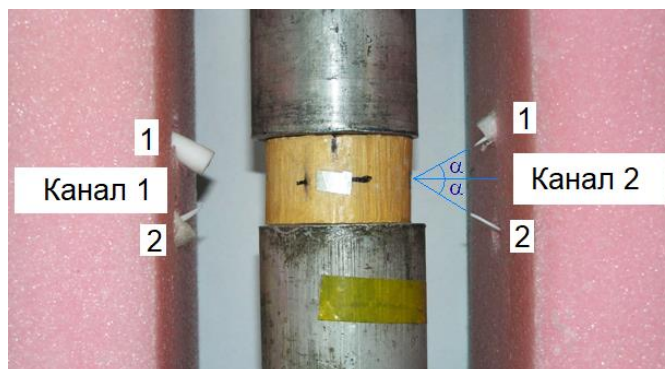


Рисунок5. Экстраполяция деформаций на границу образца

Для определения коэффициента Пуассона предложена и реализована новая схема, в которой нагружение образца и регистрация его осевой деформации производится с использованием схемы разрезного стержня Гопкинсона, а радиальная деформация образца определяется с использованием радиоинтерферометра (рисунок 6). Измерения проводятся с использованием двух независимых каналов, облучающих диаметрально противоположные зоны боковой поверхности образца для учета возможного смещения образца как целого при нагружении. Измерения проводятся раздельно для регистрации расширения образца в радиальном и тангенциальном направлениях. Указанная схема позволяет оценить разницу свойств древесины в радиальном и окружном направлениях.



Рисунок

6. Схема регистрации радиальной компоненты

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования динамических свойств различных пород древесины при высокоскоростном нагружении.

В разделе 3.1 представлены экспериментальные установки и исследуемые образцы.

В работе был проведен цикл экспериментальных исследований прочностных свойств древесины наиболее распространенных лиственных (береза, осина, липа), а также хвойных (сосна) пород деревьев. Испытания проводились при комнатной температуре.

В разделе 3.2 приведены результаты исследований хвойных и лиственных пород древесины при сжатии.

Механические свойства древесины даже для одной породы оказываются неодинаковыми, что является следствием различных условий произрастания деревьев. Кроме того, на механические характеристики, такие как упругие модули, пределы прочности при растяжении и сжатии, существенное влияние могут оказать непостоянство свойств в разных частях ствола, различная влажность, пористость, ширина годовичных колец и т.д. Для оценки степени анизотропии проведены исследования механических свойств древесины лиственных пород (береза, осина и липа) и хвойных пород (сосна) при сжатии на образцах, вырезанных из брусьев вдоль и поперек волокон.

Полученные в результате испытаний диаграммы представлены в работе в виде набора динамических кривых «напряжение-деформация» и соответствующих зависимостей изменения скорости деформации в процессе деформирования (рисунок 7). Сплошными линиями на рисунках разными цветами показаны диаграммы $\sigma_s \sim \varepsilon_s$, а пунктирными линиями соответствующих цветов в нижней части рисунков показаны зависимости $\dot{\varepsilon}_s \sim \varepsilon_s$. По итогу выполненных динамических испытаний различных пород древесины определены предельные прочностные и деформационные характеристики образцов, вырезанных вдоль и поперек волокон.

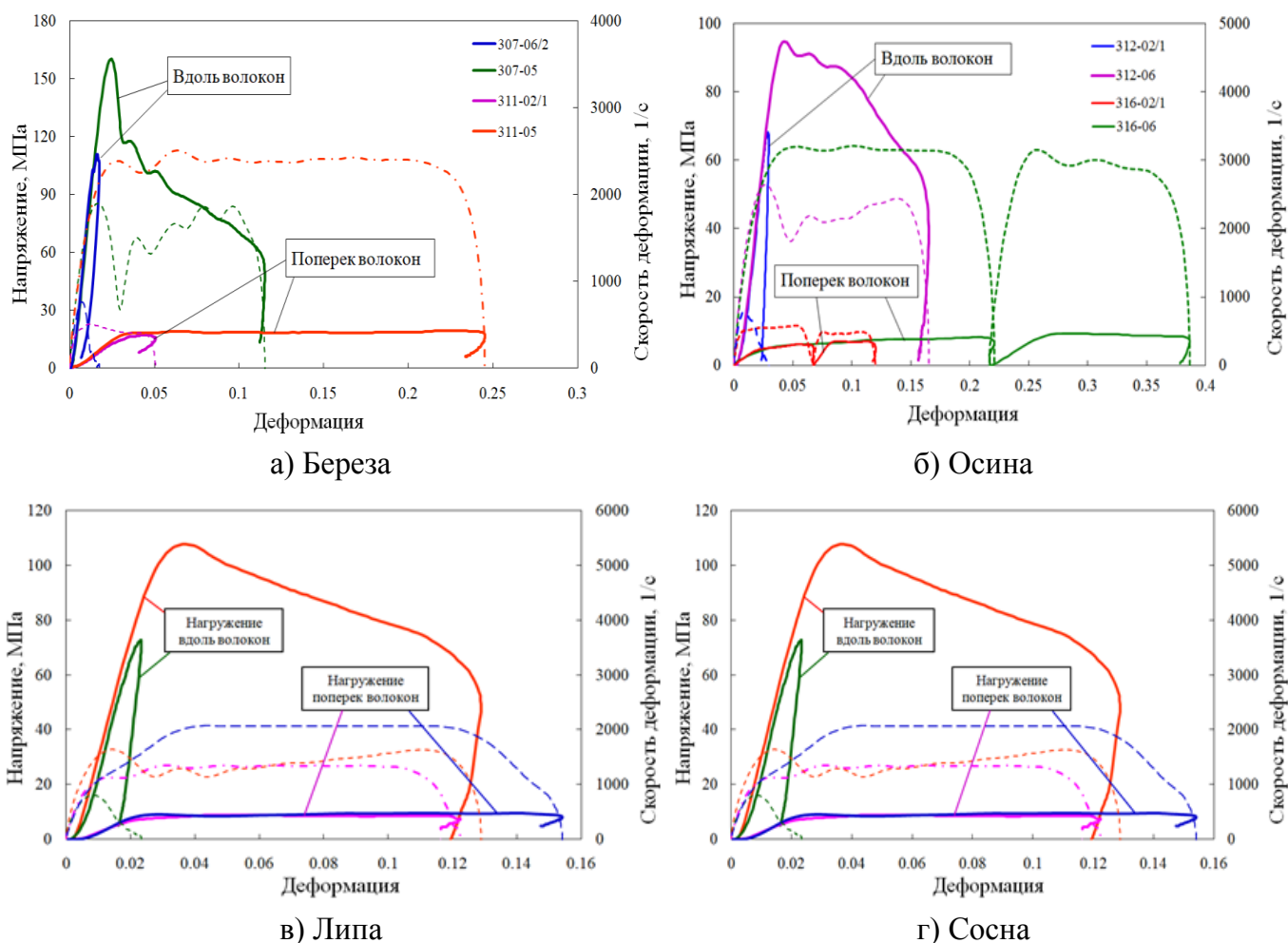


Рисунок 7. Диаграммы деформирования при нагружении вдоль и поперек волокон

Посредством вычисления площади под кривой $\sigma \sim \epsilon$ определена энергоемкость испытанных пород, как важная характеристика демпфирующей способности древесины (рисунок 8). Указанная характеристика показывает какое количество энергии сможет поглотить один из слоев, выполненных из древесины, в контейнере для перевозки взрывоопасного вещества. Показано, что наибольшее энергопоглощение имеют образцы березы, как вдоль, так и поперек волокон, а наименьшее – образцы сосны.

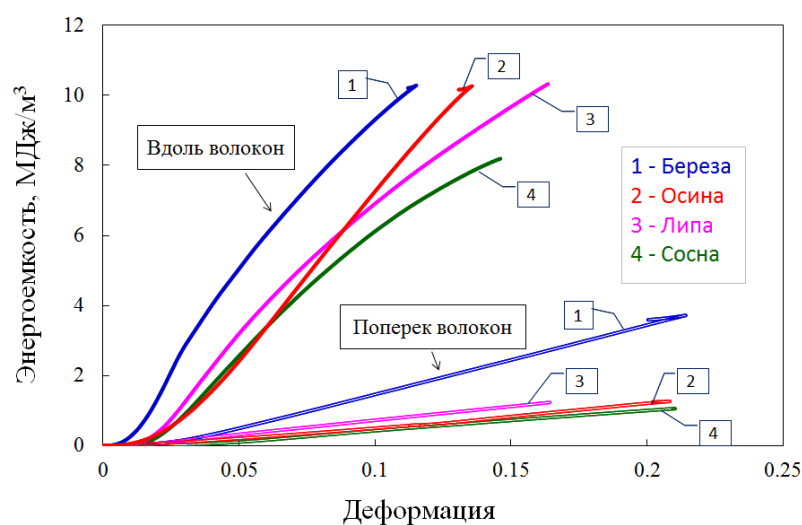


Рисунок 8. Сравнение энергопоглощения испытанных пород древесины

В условиях одноосной деформации проанализирована неравномерность радиального расширения образцов секвойи, образцы которой имели разный угол вырезки относительно волокон (рисунок 9). Выяснено сильное влияние бокового ограничения на напряженно-деформированное поведение секвойи (рисунок 10). Оно подавляет трещины вдоль волокон и этим замедляет разрушение. Такие данные используются в сложной модели древесины принимая во внимание различную природу поведения материала не только при сжатии и растяжении, но и касательно ориентации волокон относительно направления нагрузки.

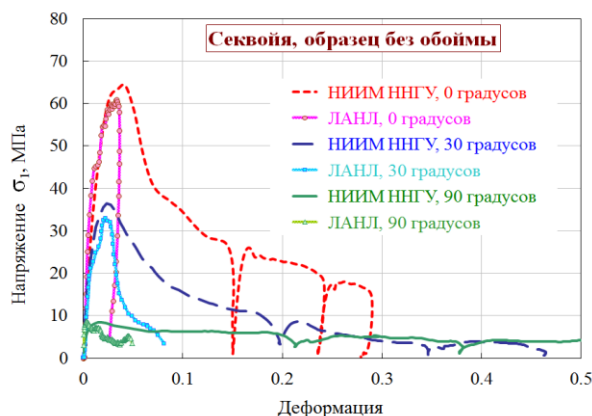


Рисунок 9. Свойства секвойи при различных углах вырезки образцов

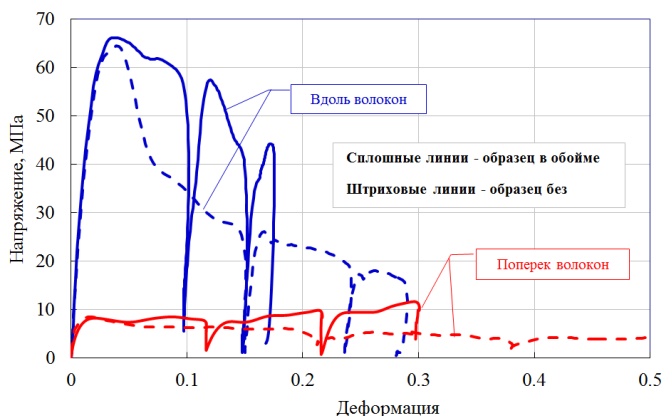


Рисунок 10. Поведение секвойи при одноосной и при одноосном напряженном состоянии

Для свойств всех испытанных пород древесины отмечена значительная анизотропия: максимальная прочность была у образцов с направлением приложения нагрузки вдоль волокон, минимальная прочность – поперек направления волокон. Модуль нагрузочной ветви диаграмм нелинеен и в большинстве случаев, меньше модуля разгрузочной ветви (если образец остается целым). Развитие деформирования и разрушения образцов сильно зависит от угла вырезки материалов. Также можно отметить, что влияние скорости деформации на диаграмму деформирования древесины в большей степени проявляется при нагружении вдоль волокна.

В разделе 3.3 рассмотрен динамический изгиб балок (рисунок 11). На рисунке 12 показаны зависимости сил от прогиба. Для сплошных линий прогиб определялся по данным с мерных стержней, для пунктирных – по DIC. Максимальное значение силы составило порядка 4.8 кН. Наклон нагрузочной ветви равен 14 и 22 кН/мм для метода Кольского и DIC соответственно.

Величина предельной деформации сосны при растяжении перпендикулярно волокну, определенная из экспериментов на трехточечный изгиб, составила порядка 3.5 %. При этом скорость деформации в момент разрушения составила порядка 650 1/с. В то же время деформация сжатия при нагружении поперек волокон достигала 20 % и более, что согласуется с общими представлениями о том, что при растяжении древесина ведет себя хрупко, а при сжатии - пластично.

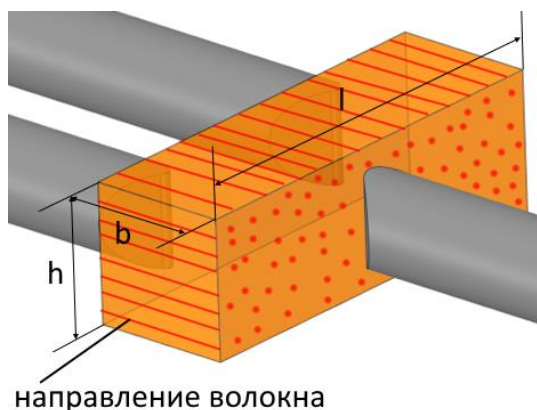


Рисунок 11. Схема испытания балок

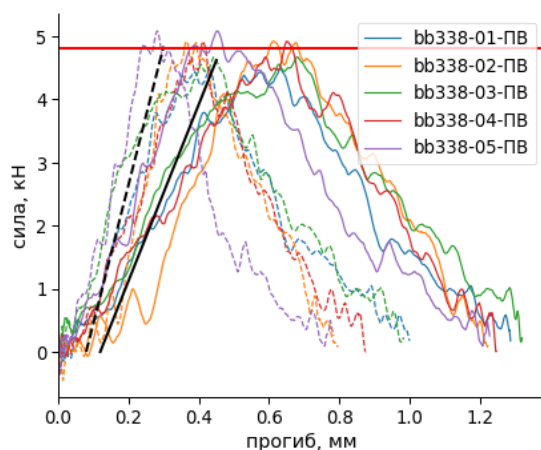


Рисунок 12. Зависимость силы от прогиба

В разделе 3.4 приведены результаты экспериментов по определению динамического коэффициента Пуассона сосны. С использованием новой методики раздельного измерения двух компонент поперечной раздачи анизотропного материала удалось определить величины компонент динамического коэффициента Пуассона в двух направлениях, которые могут быть использованы при идентификации модели древесины, необходимой для достоверных расчетов динамически нагруженных конструкций.

В четвертой главе представлено расчетное исследование процессов динамического деформирования и разрушения сосны с применением модели MAT_WOOD из библиотеки материалов ПП LS-DYNA. На примере моделирования экспериментов на ударное с разными скоростями деформирования одноосное сжатие образцов, вырезанных под углами 0° , 90° и 45° по отношению к волокну, показано, что параметры модели по умолчанию позволяют достаточно близко воспроизвести результаты натурных экспериментов для случая сжатия в направлении волокна, однако для 90° и 45° максимальные напряжения в численных экспериментах оказались сильно завышенными. Уточнение скоростных зависимостей характеристик прочности сосны в рамках модели на основании полученных в работе экспериментальных данных (рисунок 13) позволило значительно приблизить результаты моделирования к данным экспериментов для всех выполненных режимов нагружения (рисунки 14-16).

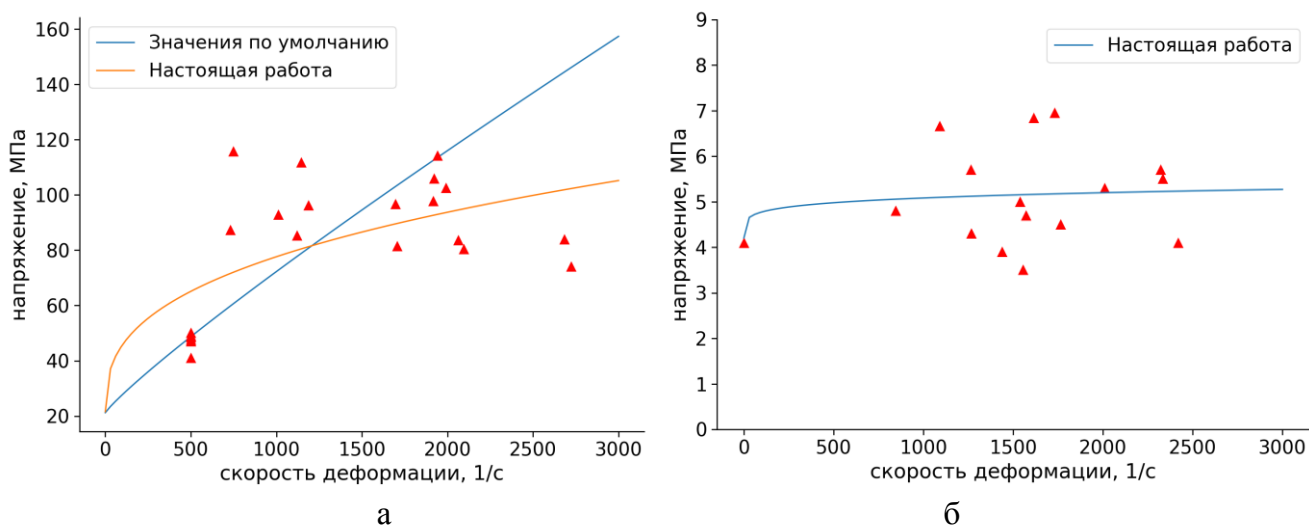


Рисунок 13. Аппроксимация скоростных зависимостей предельного напряжения сжатия:
а – образцы 0° , б – образцы 90°

Кривые деформирования в вычислительных экспериментах рассчитывались для каждой истории изменения скорости деформации в натурных испытаниях. На рисунках 14-16 модельные кривые показаны пунктирными линиями, соответствующие экспериментальные кривые – сплошными линиями.

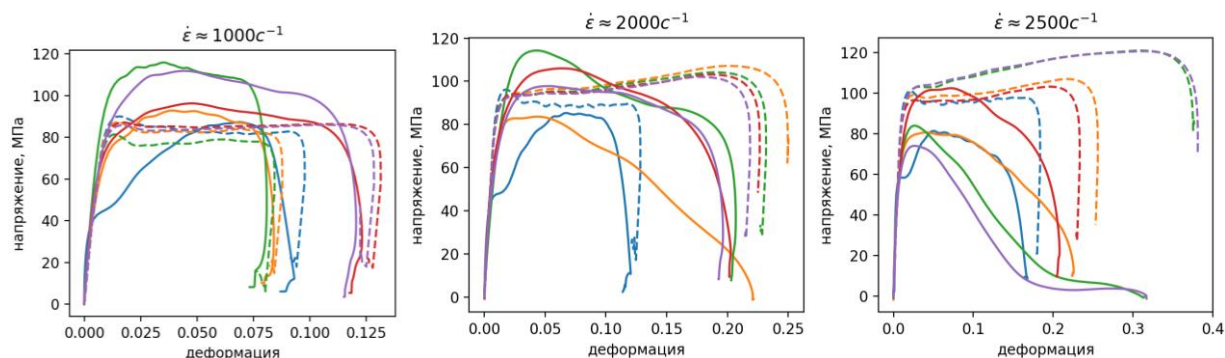


Рисунок 14. Динамическое сжатие сосны вдоль волокон

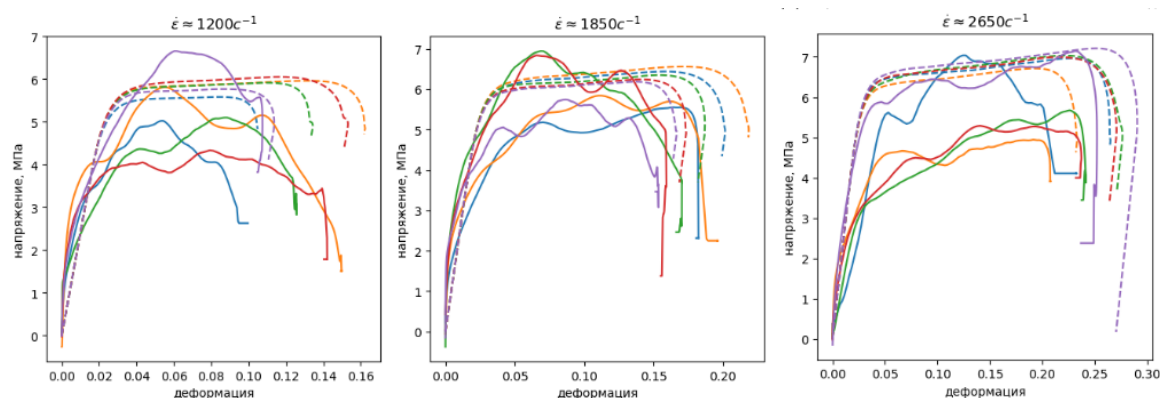


Рисунок 15. Динамическое сжатие сосны поперек волокон

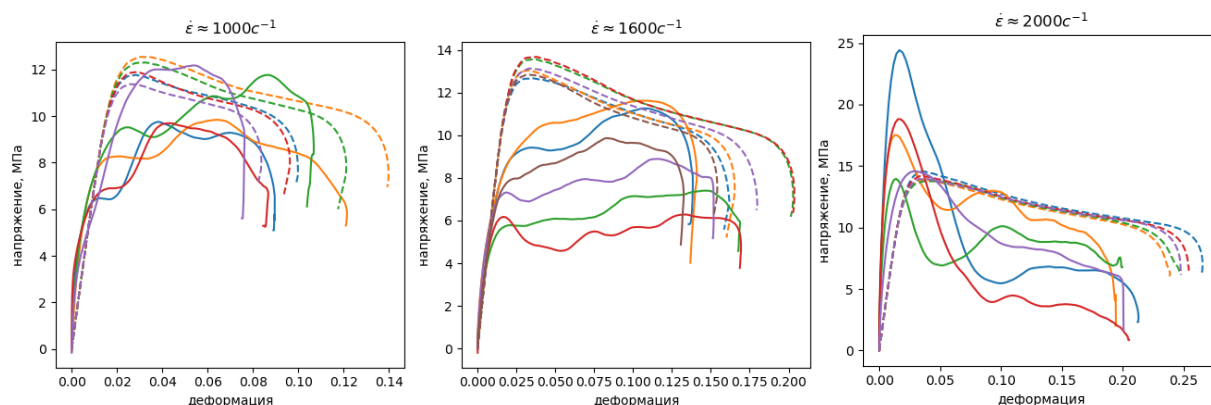


Рисунок 16. Динамическое сжатие сосны под углом 45^0 относительно волокна

Следует отметить, что эксперименты по сжатию образцов, вырезанных под углом 45^0 относительно волокна, не являются базовыми. Свойства материала из этого типа испытания не определяются. Этот вид нагружения моделировался для проверки работы модели при нагружении в направлении, отличном от параллельного и перпендикулярного.

Предельное напряжение разрушения в направлении перпендикулярном волокну было определено из эксперимента на ударный трехточечный изгиб балки и составило 8.6 МПа. В вычислительном эксперименте, воспроизводящем данную

экспериментальную схему, было получено близкое к натурному испытанию время зарождения трещины (рисунок 17).

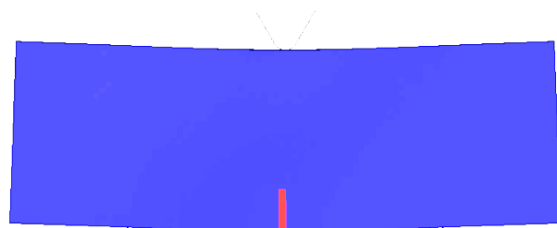
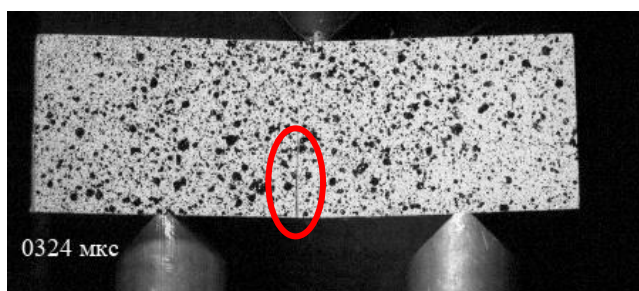


Рисунок 17. Моделирование эксперимента на ударный трехточечный изгиб балки

Верификация нелинейной части модели деформирования сосны проведена на базе экспериментов на ударное внедрение (рисунок 18) полусферического индентора (рисунок 20). Выполненные расчеты показали хорошую предсказательную способность математической модели (рисунки 19 и 21). На рисунке 19 цветными линиями показаны силы сопротивления внедрению, полученные в эксперименте, черными – в расчете.

Вдоль волокон

Поперек волокон

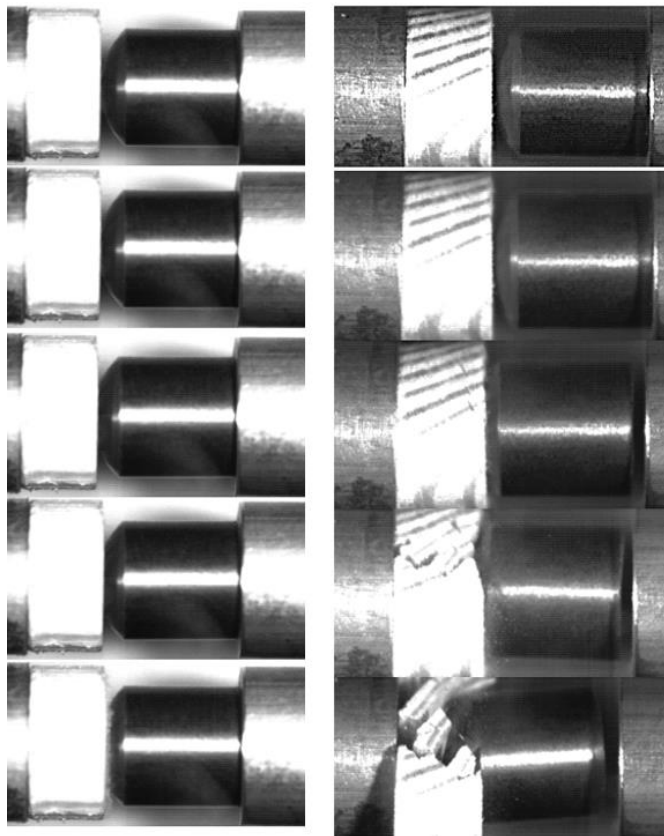


Рисунок18. Высокоскоростная съемка процесса индентирования

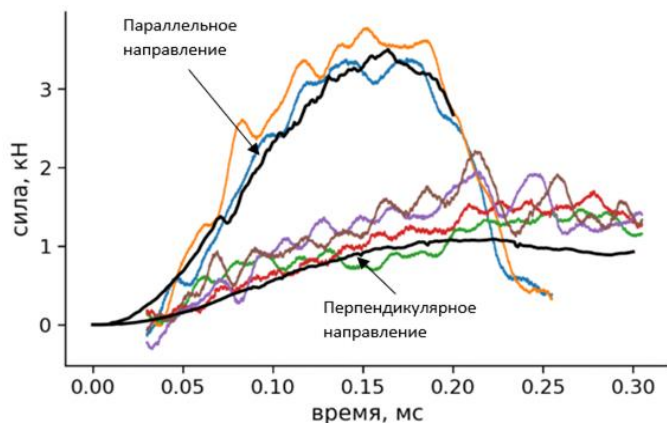


Рисунок19. Временные зависимости сил сопротивления внедрению (цветные линии – эксперимент, черные – численное моделирование)

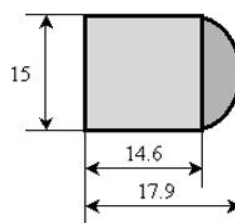


Рисунок20. Полусферический индентор

Моделирование Эксперимент



Рисунок 21. Визуальное сравнение образцов

По итогам проведенного теоретически-экспериментального исследования сделаны следующие **выводы и заключения**:

1. Проведенный аналитический обзор и анализ результатов динамических испытаний древесины при средней и высокой скорости деформации позволил выявить основные особенности поведения древесины: ортотропию свойств, зависимость характеристик прочности от скорости деформации, влажности, температуры.

2. Для исследования скоростных зависимостей характеристик прочности при сжатии для различных углов вырезки образцов относительно волокна в работе использовался метод Кольского и его модификация, в которой сжатие образца производится в обойме. Реализация многократного нагружения образца в одном эксперименте в данных типах испытаний позволила достичь больших степеней деформации образцов (до 50 %).

3. Для определения динамической величины предельной деформации растяжения в направлении перпендикулярном волокну на базе техники мерных стержней, эксперимента на трехточечный изгиб и метода корреляции цифровых изображений созданы экспериментальная установка, методика и программная реализация алгоритма обработки экспериментальных данных.

4. Для определения коэффициента Пуассона при динамическом нагружении предложена и реализована новая схема, в которой нагружение и регистрация продольной деформации осуществляется в системе разрезного стержня Гопкинсона, а регистрация изменения радиальных размеров образца производится с использованием радиоинтерферометрии.

5. Были проведены динамические испытания сосны, липы, осины, секвойи и березы нормальной влажности (7-10 %) при комнатной температуре, в результате которых были получены их диаграммы деформирования, предельные прочностные и деформационные характеристики образцов, вырезанных вдоль и поперек волокон. Результаты исследований показали, что наибольший модуль нагрузочной ветви диаграммы, предельные напряжения и энергоемкость имеют образцы, вырезанные вдоль волокон. Оценена энергоемкость испытанных пород при нагружении вдоль и поперек волокон. Показано, что наибольшую способность поглощать энергию имеют образцы березы, как вдоль, так и поперек волокон, а наименьшее – образцы сосны.

6. Испытаны образцы сосны нормальной влажности при комнатной температуре с варьированием скорости деформации на образцах, вырезанных под углами 0° , 90° и 45° относительно волокна. Показано, что скорость деформации оказывает существенное влияние на прочностные характеристики материала, при этом наиболее ярко скоростное упрочнение проявилось при нагружении в направлении волокон.

7. Предложенная схема определения величины предельной деформации древесины при растяжении перпендикулярно волокну, на базе экспериментов на трехточечный изгиб и

метода корреляции цифровых изображений, позволила получить предельную деформацию разрушения сосны, которая составила порядка 3.5 % при скорости деформации порядка 650 1/с.

8. Определенные с использованием интерферометрических измерений радиальной раздачи образцов величины динамических коэффициентов Пуассона сосны для радиального и касательного направлений оказались довольно близки и составили 0.24 и 0.2, соответственно.

9. На базе данных, полученных в ходе экспериментального исследования динамического поведения сосны, идентифицированы функции, характеризующие скоростные зависимости характеристик прочности в рамках модели MAT_WOOD из библиотеки ПК LS-DYNA вдоль и поперек волокон.

10. Проведена верификация модели сосны с использованием трех групп расчетов (моделирование сжатия при разных скоростях деформации и углах вырезки образцов, моделирование трехточечного изгиба балки и моделирование динамического внедрения полусферического индентора), которая показала хорошее соответствие результатов натуральных и вычислительных экспериментов.

Перспективы дальнейшей разработки темы могут быть связаны с исследованием влияния на динамические свойства древесины переменных внешних факторов, таких как, температура, влажность, возраст древесины, место произрастания и т.д.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ и в базы Web of Science и Scopus:

1. Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., **Iuzhina T.N.**, Gray III G.T. Investigation of wood anisotropy under dynamic loading // Проблемы прочности и пластичности, т. 80, №4, 2018, с.555-565. (ВАК)
2. Ломунов А.К., **Южина Т.Н.**, Крушка Л., Чен В. Деформирование и разрушение липы и сосны при интенсивных динамических воздействиях // Проблемы прочности и пластичности, т. 82, №1, 2020, с.43-51. (ВАК)
3. Брагов А.М., Ломунов А.К., **Южина Т.Н.** Влияние вида напряженно-деформированного состояния на динамическую сжимаемость березы // Проблемы прочности и пластичности, т.82, №3, 2020, с.269-282. (ВАК)
4. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., **Южина Т.Н.** Влияние повышенной температуры на динамические свойства осины // Проблемы прочности и пластичности, т.83, №1, 2021, с.5-21. (ВАК)
5. Bragov A.M., Gonov M.E., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., **Iuzhina T.N.** Deformation and destruction at deformation rate of order 10^3 s^{-1} wood of hardwood trees // Chapter 26 In: B.E. Abali and I.Giorgio (eds.), Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials, 2020, vol 130. p.443-451. (Scopus)
6. Bragov A., Igumnov L., dell'Isola F., Konstantinov A., Lomunov A., **Iuzhina T.** Dynamic testing of lime-tree (*Tilia Europaea*) and pine (*Pinaceae*) for wood model identification // Materials 2020, 13(22), 5261. (Scopus)

7. Bragov A.M., Lomunov A.K., **Yuzhina T.N.** Dynamic compressibility of birch under various types of stress-strain state // Chapter 7. In: Altenbach H., Eremeyev V.A., Igumnov L.A. (eds) Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials, vol 141. 2021 69-80. (Scopus)
8. Balandin V.V., Balandin V.I., Lomunov A.K., Parkhachev V.V., **Yuzhina T.N.** Using a radio interferometer for measurement of the dynamic Poisson's ratio of wood // Chapter 3. In: **Altenbach H., Eremeyev V.A., Galybin A., Vasiliev A.** (eds) Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications, vol 155. 2022 pp.37-50. (Scopus)
9. Bragov A.M., **Iuzhina T.N.**, Lomunov A.K., Igumnov L.A., Belov A.A., Eremeyev V.A. Investigation of wood properties at elevated temperature // Journal of Applied and Computational Mechanics, Vol. 8(1), (2022), 298-305. (Web of Sci–Scopus)

Материалы докладов на научных конференциях и другие научные публикации:

10. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., **Yuzhina T.N.**, Filippov A.R. Experimental complexes for investigation of behavior of materials at a strain rate of $5 \cdot 10^2 \div 10^5 \text{ s}^{-1}$ // XIV International Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems” (DTS-2018) Ростов-на Дону, 12-14 сентября 2018. MATEC Web of Conferences 226, 2018 Article 03024. (Scopus)
11. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Гонов М.Е., **Южина Т.Н.** Деформирование и разрушение березы и осины при скоростях деформации порядка 10^3 с^{-1} // В книге: Материалы XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.56-57 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 18-22 марта 2019.
12. Баландин Вл.Вл., Ломунов А.К., **Южина Т.Н.** Исследование ударно-волновой сжимаемости березы // В книге: Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.31-33 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 16-20 марта 2020.
13. Баландин Вл.Вл., Ломунов А.К., **Южина Т.Н.** Ударная сжимаемость секвойи и берёзы // В книге: Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.33-35 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 16-20 марта 2020.
14. Igumnov L., Litvinchuk S., Ipatov A., **Iuzhina T.** The Boundary-Element Approach to Modeling the Dynamics of Poroelastic Bodies // In: E. Gdoutos (Ed.): Proceedings of the Second International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. ICTAEM 2019, 8, pp. 311–315, 2019. Structural Integrity, vol 8. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2_57
15. Bragov A.M., Isola F., Litvinchuk S.Yu., Lomunov A.K., **Iuzhina T.N.** Deformation and destruction of lime-tree and pine under intense dynamic effects // The Sixteenth International Conference on Civil, Structural & Environmental Engineering Computing CIVIL-COMP 2019 16-19 September 2019, Riva del Garda, Italy. <https://app.oxfordabstracts.com/events/943/program-app/submission/127969>

Подписано в печать 30.06.2022 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1. Заказ № 811. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в отделе дизайна и цифровой печати

РИУ ННГУ им. Н.И.Лобачевского

603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37