

На правах рукописи

Дмитриева Ксения Олеговна

**УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ
ПРИ СИЛОВОМ И СРЕДОВОМ НАГРУЖЕНИИ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск - 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

Научный руководитель

Доктор технических наук, профессор;
Академик РААСН

Травуш Владимир Ильич

Официальные оппоненты:

Лабудин Борис Васильевич

доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический)
федеральный университет имени М. В.
Ломоносова» (г. Архангельск), кафедра
инженерных конструкций, архитектуры и
графики, профессор

Парфенов Сергей Григорьевич

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
инженерно-технологический университет»
(г. Брянск), кафедра «Строительные
конструкции», заведующий кафедрой

Ведущая организация

АО "ЦНИИЭП жилища - институт
комплексного проектирования жилых и
общественных зданий", (г. Москва)

Защита состоится «24» декабря 2016 г. в 13:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.094.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» <http://www.swsu.ru>.

Отзывы на автореферат направлять в диссертационный совет по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Бакаева
Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Наша страна богата громадными запасами возобновляемого конструкционного материала – древесины, обладающей рядом полезных специфических свойств таких, как легкость материала, высокая коррозионная стойкость, низкая теплопроводность, легкость обработки и др. Однако, использование древесины в конструкциях происходит пока в недостаточно больших объемах. Одной из причин незначительного использования деревянных конструкций является недостаточный уровень развития современных исследований (особенно экспериментальных) конструктивных систем из древесины. Физические и механические характеристики древесины подвержены изменению во времени и при воздействии переменной влажности.

Однако еще недостаточно изучена устойчивость стержней из древесины в условиях длительного силового и средового сопротивления, что значительно влияет на определение конструктивной безопасности деревянных конструкций. В этой связи актуальным является изучение вопросов общей и местной устойчивости стержневых конструкций из древесины, подверженных как силовым, так и средовым воздействиям.

Известно, что часто причиной потери устойчивости всей конструктивной системы является один элемент или их небольшая группа. Следовательно, важным вопросом в решении задач устойчивости конструктивных систем является выявление наиболее опасных элементов или частей конструкции с низкой сопротивляемостью потере устойчивости. И если особенности деформирования стержней и конструктивных систем при кратковременном силовом нагружении достаточно изучены, то особенности бифуркации деревянных конструкций при длительном силовом нагружении и одновременном средовом воздействии остаются малоизученными. Между тем, такие исследования необходимы не только для изучения особенностей деформирования нагруженных элементов деревянных конструкций, решения традиционных задач безопасности конструктивных систем, но и для оценки остаточного ресурса и защиты эксплуатируемых конструктивных систем от прогрессирующего обрушения, вызванного потерей устойчивости стержневых конструкций. В связи с этим изучение деформирования элементов в нагруженных и находящихся в условиях переменной влажности стержневых конструктивных системах из древесины представляет научный интерес и практически важную задачу исследования.

Степень научной разработанности проблемы. Теоретическую базу исследования составляют труды ученых, рассматривающих вопросы исследований в области устойчивости конструктивных систем, которые рассмотрены в работах В.И. Колчунова, К.П. Пятикрестовского, А.В. Перельмутера, Н.В. Ключевой, А.В. Туркова, А.В. Александрова, Р.С. Санжаровского, Б.В. Лабудина, А.М. Ибрагимова, А.С. Бухтияровой, М. Зицковски, М.М. Фридмана, Elishakoff, D.Stojić.

Вопросами устойчивости стержней и стержневых систем занимались и занимаются большое количество исследователей. В этой связи нельзя не упомянуть таких известных ученых как Т. Карман, Ф. Энгессер, Ф.С. Ясинский, И.Г. Бубнов, СП. Тимошенко, П.Ф. Папкович, Н.С. Стрелецкий, А.Р. Ржаницын, Ф.Р. Шенли, А.С. Вольмир, Н.В. Карнаухов, А.Ф. Смирнов, В.В. Болотин, Б.Я. Лащенко, Н.Н. Шапошников, В.Д. Потапов и др.

Установлению критерия определения вида бифуркации стержня (стесненной или принужденной) или какой-либо части конструкции посвящены работы А.В. Александрова, Л.С. Ляховича, А.В. Перельмутера, В.И. Сливкера, В.И. Травуша.

Разработка физических методов для расчета прочности и устойчивости деревянных конструкций при кратковременном и длительном нагружении отражена в работах К.П. Пятикрестовского, Г.Г. Кашеваровой, Б.В. Лабудина, Р.С. Санжаровского.

Целью диссертационной работы является исследование длительного деформирования и устойчивости деревянных стержней, стержневых конструкций и конструктивных систем при их силовом нагружении и переменной влажности.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- построение уравнений для определения длительной прочности и предельного значения критической силы сжатого стержня на основе реологической модели режимного нагружения древесины;
- разработка критерия длительной устойчивости сжатого стержня из древесины при совместном проявлении силового воздействия, влажности и времени нагружения;
- экспериментальное определение параметров длительной прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности;
- разработка методики и алгоритма расчетного анализа устойчивости нагруженных стержневых элементов конструктивных систем, выполненных из древесины, в условиях стесненной бифуркации с учетом реологических свойств древесины, переменной влажности и влияния примыкающих несущих элементов конструктивной системы.

Научную новизну работы составляют:

- уравнения для определения длительной прочности и предельного значения критической силы сжатого стержня на основе реологической модели режимного нагружения древесины;
- разработанный критерий длительной устойчивости сжатого стержня из древесины при совместном проявлении режимного силового нагружения, переменной влажности и времени нагружения;
- методика и результаты экспериментальных исследований параметров длительной прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности;
- методика и алгоритм расчетного анализа исследования устойчивости нагруженных стержневых конструктивных систем, выполненных из древесины, в условиях стесненной бифуркации с учетом реологических свойств древесины, переменной влажности и влияния соседних элементов всей конструктивной системы.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработанные методика, алгоритм расчета позволяют оценивать ресурс сопротивления стержневых элементов и конструктивных систем из них при силовом нагружении и переменной влажности. Реализация предложенной методики при решении проектных задач реконструируемых деревянных перекрытий, ферм и стропильных систем позволяет обоснованно принимать решения по их восстановлению и предотвращению прогрессирующего обрушения.

Методы исследования.

При проведении исследований использованы методы планирования эксперимента и математической статистики, методы тензометрирования, программные комплексы и современное инструментальное сопровождение.

Положения, выносимые на защиту:

- расчетные зависимости для определения длительной прочности и предельного значения критической силы сжатого стержня при оценке ресурса сопротивления таких элементов при различных силовых и средовых воздействиях;
- методика экспериментальных исследований параметров прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности;
- алгоритм расчета и результаты численных исследований устойчивости нагруженных стержневых конструктивных систем, выполненных из древесины, в условиях стесненной бифуркации.

Степень достоверности и апробация результатов основывается на использовании базовых положений и гипотез строительной механики и известных реологических моделей древесины, результатами проведенных автором экспериментальных исследований стержневых элементов из древесины при различных силовых и средовых воздействиях, а также подтверждается результатами численных исследований, в том числе расчетами реальных конструкций при проектировании.

Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и семинарах различных уровней: Региональный круглый стол «Теория расчета сооружений и конструкций: современное состояние и перспективы развития научных школ ЮЗГУ» (Курск, 2013); Вторая Крымская международная конференция «Методология энерго- ресурсосбережения и экологической безопасности» (Симферополь, 2015); Третья Крымская международная конференция «Безопасность среды жизнедеятельности» (Симферополь, 2016).

Реализация результатов работы.

Материалы исследований использовались при выполнении НИОКР в рамках государственного задания Минстроя России по развитию нормативной технической базы, направленной на обеспечение безопасности зданий и сооружений и применение передовых инновационных технологий проектирования и строительства:

- «Разработка методов расчетного анализа живучести зданий и рекомендации по их защите от прогрессирующего обрушения» (2015 г);
- «Определение нормируемых параметров, обеспечивающих защиту зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения» (2016 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 6 в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, получен 1 патент, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения с основными выводами, списка литературы и приложений. Работа изложена на 161 страницах, включающих 109 страниц основного текста, 46 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 194 наименований и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований по рассматриваемой теме, приведены общая характеристика диссертационной работы и основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния вопроса исследований в области устойчивости конструктивных систем и приведена степень научной разработанности проблемы.

Вторая глава диссертации посвящена построению расчетных зависимостей для определения длительной прочности и предельного значения критической силы сжатого стержня для оценки ресурса сопротивления таких элементов при силовых и средовых воздействиях.

При построении расчетных уравнений сформулированы и использованы следующие основные гипотезы:

- относительный дефицит текущего значения исследуемого фактора неравновесного силового сопротивления дерева описывается некоторой функцией, которая инвариантна по отношению ко всем физико-механическим характеристикам этого материала: прочности R , модулю деформации (E), ползучести $1/c$ и др.;
- при мгновенном изменении степени статической неопределимости, полная удельная энергия конструктивной системы не изменяется;

- под воздействием силовых и средовых факторов отдельные стержни могут перейти из пассивной потери устойчивости в активную и наоборот;
- изменение прочностных и деформационных характеристик в расчетных сечениях конструктивной системы определяется на основе деформационной модели однородного сложного напряженно-деформированного состояния Г.А. Гениева.

Для построения критерия прочности древесины использована реологическая модель деформирования материала, предложенная Г.А. Гениевым, состоящая из двух последовательно соединенных моделей Кельвина-Фойгта (рис. 1, а), и ее модификация (рис. 1, б). В соответствии с этой моделью предельное значение главной линейной деформации древесины (или интенсивность деформации сдвига Γ) ε_{ult} :

$$\varepsilon_{ult} = \varepsilon_0 + \varepsilon_1, \quad (1)$$

где ε_0 – деформации соответствующие элементу 0 используемой физической модели деформирования, характеризующие процесс кратковременного («мгновенного») нагружения, ε_1 – деформации, соответствующие модели Кельвина-Фойгта, последовательно соединяемой с элементом 0 (см. рис. 1, б).

При использовании представленного критерия прочности древесины определяющее уравнение ее длительной прочности при $\sigma = \text{const}$ записано в виде:

$$\varepsilon \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma}{R}} \right) + \frac{\sigma}{E} \cdot (1 - \exp(-\omega \cdot t)) = \varepsilon_{ult}, \quad (2)$$

где первое слагаемое соответствует аппроксимации диаграммы работы древесины при кратковременном нагружении квадратной параболой, а второе слагаемое - деформации, соответствующие модели Кельвина-Фойгта при постоянном значении напряжения $\sigma = \text{const}$.

В том случае, если при активном нагружении, напряжение возрастает по произвольному закону во времени $\sigma = \sigma(t)$ значение ε_1 в зависимости (1) определяется выражением:

$$\varepsilon_1 = K^{-1} \cdot e^{-\omega \cdot t} \int_0^t \sigma \cdot e^{\omega t} dt. \quad (3)$$

В (2) и (3) E и K – соответственно линейный модуль деформаций и модуль вязкого сопротивления модели Кельвина-Фойгта; $\omega = \frac{E}{K}$.

Используя приведенные аналитические зависимости, можно определить длительную прочность сжатого стержня из древесины. Для этого при $\sigma = \text{const}$ из уравнения (3) найдем значение ε_1 :

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E} \cdot (1 - e^{-\omega t}). \quad (4)$$

Поскольку в рассматриваемой задаче речь идет о длительной прочности древесины, то вместо напряжений σ принимается σ_{ult} , где σ_{ult} – длительная предельная прочность древесины.

При аппроксимации нелинейной зависимости мгновенной (кратковременной) деформации квадратной параболой напряжение σ_{ult} определяется из выражения:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{ult} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma_{ult}}{R}} \right), \quad (5)$$

где предельное значение деформации $\varepsilon_{ult} = \frac{2 \cdot R}{E_0}$, E_0 – начальный модуль упругости древесины, соответствующий точке $\sigma = 0$ (рис. 1, в).

Значение ω найдено из анализа экспериментальных данных:

$$\omega = \frac{E_0}{K} = \frac{n^*}{n} \cdot \left(\frac{t}{n}\right)^{n^*-1}, \quad (6)$$

где n – время релаксации; n^* – коэффициент, характеризующий нелинейность вязкого сопротивления. Подставив (4) и (5) в (1), приняв значение $n=20$ и $n^* = 0,38$ по экспериментальным данным и решив квадратное уравнение относительно σ_{ult} , определим:

$$\sigma_{ult} = \frac{R \cdot [-1 \mp \sqrt{1 + 1,7(7) \cdot (1 - 0,913t^{0,38})^2}]}{0,89 \cdot (1 - 0,913t^{0,38})^2}, \quad (7)$$

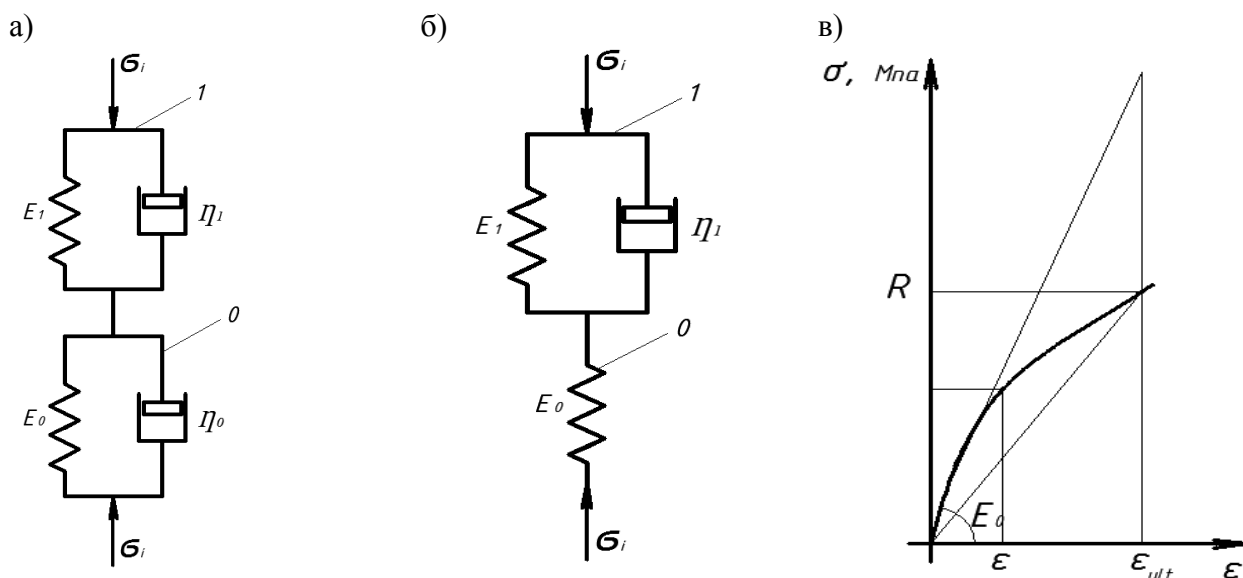


Рисунок 1 – Схема реологической модели анизотропного материала Г.А. Гениева (а), ее модификация (б) и общая физическая модель деформирования древесины (в)

Предлагаемая методика расчета длительной прочности стержня из древесины позволяет определить предельное значение нагрузки, при которой прочность конструкции будет обеспечена в течение неограниченного промежутка времени ($t=\infty$), а также время до разрушения конструкции при любой заданной величине нагрузки.

Для иллюстрации полученных результатов построен график зависимости предельного напряжения от времени (рис. 2, а) по зависимости (7). Оценка длительной устойчивости для центрально сжатого прямолинейного стержня из древесины выполнена с использованием формулы Эйлера:

$$P_{кр.} = \frac{v^2 \cdot B}{l^2}, \quad (8)$$

где $v = \frac{\pi}{\mu}$ – коэффициент, учитывающий влияние продольной силы на изгиб, $B = E \cdot I$ и l – соответственно изгибная жесткость и длина стержня.

Предельное значение модуля E_0 древесины, при котором сжатый элемент не теряет устойчивость:

$$E_0 = \frac{2 \cdot \sigma_{ult}}{\varphi_{ult} \cdot \epsilon_{ult}}. \quad (9)$$

После подстановки выражение (9) в (8) получено выражение для предельного значения критической силы:

$$P_{кр.} = \frac{v^2 \cdot 2 \cdot I}{l^2 \cdot \sigma_{ult} \cdot \varepsilon_{ult}} \cdot \frac{[-1 \mp \sqrt{1 + 1,7(7) \cdot (1 - 0,913t^{0,38})^2}]}{0,8(8) \cdot (1 - 0,913t^{0,38})^2}. \quad (10)$$

По полученным результатам построен график зависимости значения критической силы от времени (рис. 2, б). Относительная деформация зависит от режима, длительности, уровня нагружения элемента, свойств старения и наследственности материалов. Непосредственное использование нелинейного уравнения состояния материала в решениях задач строительной механики, как правило, не реализуется в практике проектирования ввиду его громоздкости.

В связи с этим введен длительный модуль деформации, предложенный С.Е. Фрайфельдом при исследовании одноосного напряженного состояния для линейной постановки задачи:

$$E_{дл.}(t_0, t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t_0, t)}, \quad (11)$$

где $\sigma(t)$ – напряжения, действующие в момент времени t ; $\varepsilon(t_0, t)$ – относительная деформация к моменту наблюдения t , устанавливаемая с учетом влияния возраста материала, его свойств старения, режима и длительности нагружения.

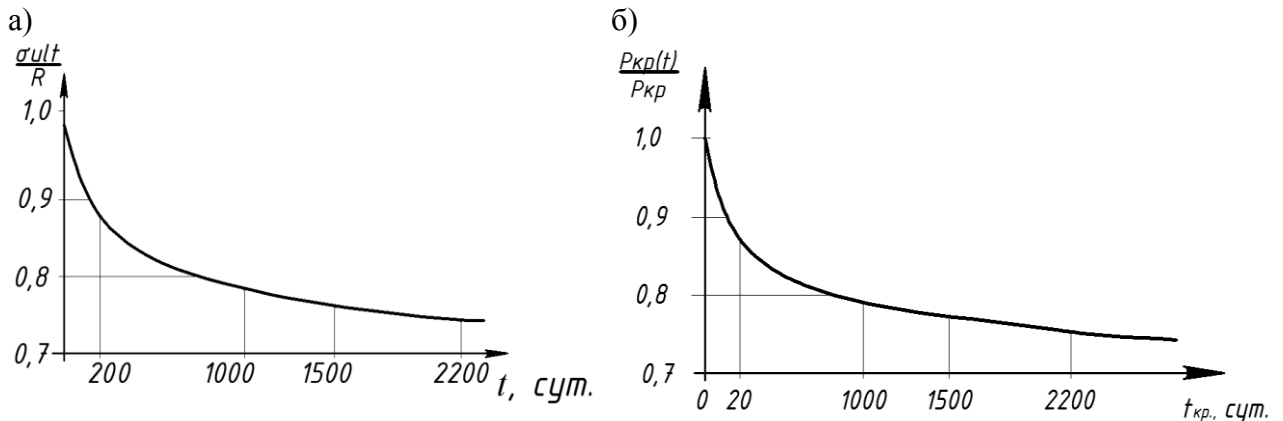


Рисунок 2 - Зависимость предельного напряжения от времени (а) и изменение критической силы деревянного центрально-сжатого стержня во времени (б)

Значение деформаций в области линейной ползучести древесины при постоянном напряжении ($\sigma = const$) определены в соответствии с предложением Ю.М. Иванова из выражения:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_0) \cdot (1 + b \cdot t^{0,21}), \quad (12)$$

где параметр b зависит от влажности древесины (w) и определяется как:

$$b = \frac{10^{-2}}{0,735 - 0,02086 \cdot W}. \quad (13)$$

Подставив полученное значение деформаций древесины (12) и напряжений, действующих в момент времени t (7) в (11), для длительного модуля деформаций получим следующее выражение:

$$E_{дл.}(t_0, t) = \frac{2 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 - 0,913 \cdot t^{0,38})^2 + 2,25} - 1,5}{(1 - 0,913 \cdot t^{0,38})^2 \cdot \varepsilon(t_0) \cdot (1 + b \cdot t^{0,21})}. \quad (14)$$

Определив на основе приведенной реологической модели модуль деформации древесины в рассматриваемый момент времени t при заданной влажности древесины w , используя формулу Эйлера в виде (8) можно записать выражение для определения предельного значения критической силы:

$$P_{кр.}(w, t) = \frac{v^2 \cdot I}{l^2} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 + 2.25} - 1.5}{(1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 \cdot \varepsilon(t_0) \cdot (1 + b \cdot t^{0.21})} \quad (15)$$

С использованием полученной зависимости для стержня из сосны проведен численный анализ изменения параметра $\xi = P_{кр.}(w, t)/P_{кр.}$, выражающего отношение значения критической силы с учетом длительности приложения нагрузки и влажности $P_{кр.}(w, t)$ к критической силе, определяемой при начальном модуле деформации древесины без учета влияния влажности $P_{кр.}$. Результаты этого анализа представлены на рисунке 4, где изменение критической силы для центрально сжатого стержня приведены в координатах « $\xi - t$ » (рис. 3, а), а также критерия устойчивости сжатых стержней из древесины при влиянии двух факторов в виде поверхности в координатах « $\xi - t - w$ » (рис. 3, б).

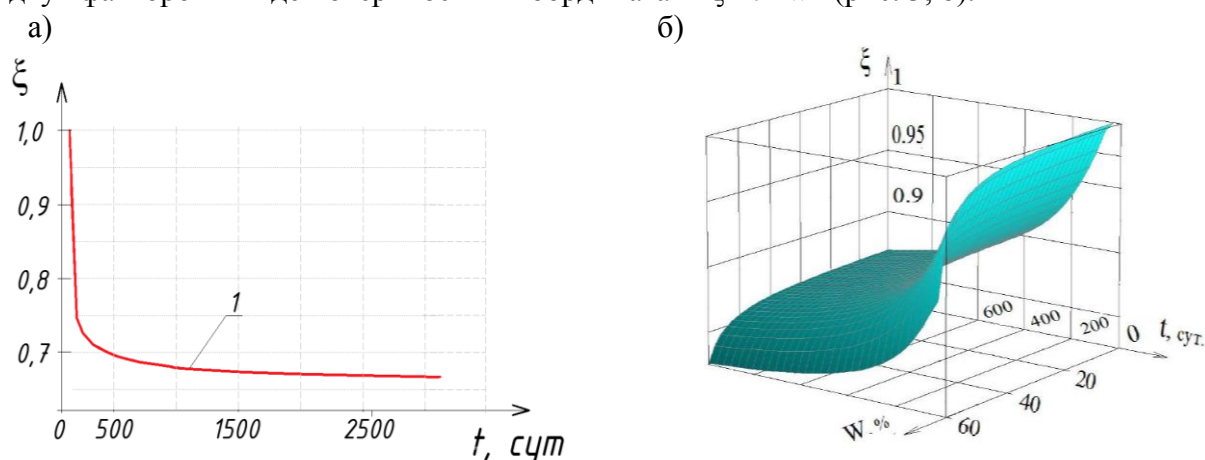


Рисунок 3 - График изменения критической силы центрально-сжатого стержня из древесины во времени (а) и критерий устойчивости сжатых стержней из древесины при влиянии двух факторов в виде поверхности в координатах « $\xi - t - w$ » (б)

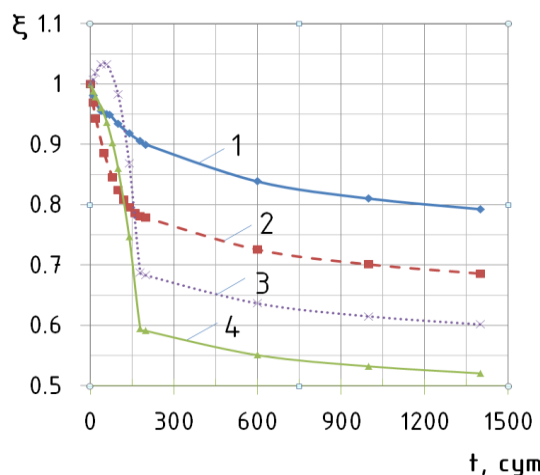


Рисунок 4 - График изменения критической силы центрально-сжатого стержня из древесины во времени в условиях повышенной влажности для различных пород древесины: 1 – сосна, 2 – береза, 3 – дуб, 4 – ясень

С использованием полученной зависимости проведен численный анализ изменения параметра ξ для различных пород дерева. Результаты этого анализа представлены на рисунке 4, где изменение критической силы для центрально сжатого стержня приведены в координатах « $\xi - t$ ».

Как видно из рисунка 4 у центрально сжатых элементов из сосны, березы и ясеня наблюдается снижение значения критической силы $P_{кр.}$ в течение всего исследуемого периода времени. В целом за период времени 1350 суток, который рассматривался при численном анализе, значение $P_{кр.}$ уменьшилось на 21%, 32% и 45% соответственно.

В центрально сжатых элементах из дуба в течение первых двух месяцев в условиях повышенной влажности наблюдается увеличение значения критической силы на 3,3 %

(см. рис. 4). Далее значения $R_{кр.}$ снижается в течение всего исследуемого периода времени на 40 %.

В третьей главе диссертации изложена программа, методика и результаты экспериментальных исследований центрально-сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности.

При планировании экспериментальных исследований сформулированы и решены следующие задачи:

- изготовлены опытные образцы, разработана экспериментальная установка и расчетная методика для оценки устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и одновременном средовом воздействии в виде переменной влажности образца;
- проведены испытания образцов центрально-сжатых стержней из древесины при их статическом нагружении и переменной влажности;
- проведен анализ параметров прочности и устойчивости исследуемых опытных образцов и произведено сопоставление с их расчётными значениями, полученными по разработанной методике.

Программа исследований включала испытания пяти серий стержней из древесины по пять образцов в каждой. Основные параметры экспериментальных образцов приведены в таблице 1, количество испытываемых конструкций принято с учетом возможности варьирования гибкостью стержней и влажностью древесины. Механические характеристики древесины были определены в соответствии с действующими стандартами на определение физико-механических характеристик.

Таблица 1 - Основные параметры экспериментальных образцов деревянных стержней

Серия образца	Мом. ин. min, $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	Мом. ин. max, $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	Радиус ин. min, $10^{-3} \cdot \text{м}$	Радиус ин. max, $10^{-3} \cdot \text{м}$	Гибкость
Д-25	0,0025	0,0225	2,89	8,66	86,60
Д-30	0,0025	0,0225	2,89	8,66	103,92
Д-35	0,0025	0,0225	2,89	8,66	121,24
Д-40	0,0025	0,0225	2,89	8,66	138,56
Д-45	0,0025	0,0225	2,89	8,66	155,88

Экспериментальные значения параметров прочности и устойчивости центрально сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности определялись по специально разработанной методике, приоритет которой защищен патентом РФ на полезную модель № 142336. Схема и общий вид опытной установки приведены на рисунке 5.

Установка устроена следующим образом: рабочая шарнирно-стержневая система с одной стороны на анкерных болтах крепится к жесткому основанию, с другой стороны к этой шарнирно-стержневой системе закрепляется канат 1, который запасовывается через подвижную обойму блока полиспаста 5 и неподвижную обойму блока полиспаста 3. Блок полиспаста 3 неподвижно закрепляется на несущей раме 2, через неподвижную обойму блока полиспаста 4 канат соединяется с элементом для крепления груза 13.

Испытательная установка работает следующим образом. На элемент для крепления груза 13 подвешивается груз 6, который создает натяжение каната 1. Усилие натяжения у рабочей рамки увеличивается в соответствии с кратностью полиспаста. В металлических силовых элементах 10 рабочей шарнирно-стержневой системы возникают усилия растяжения. При этом в сжимающих элементах 11 этой системы возникают сжимающие усилия, которые нагружают исследуемый деревянный опытный образец 8. При нагружении опытного образца масса груза увеличивается степенями.

В процессе эксперимента при помощи тензорезисторов 9, установленных на поверхности опытного образца, фиксируются деформации его верхних волокон. Таким обра-

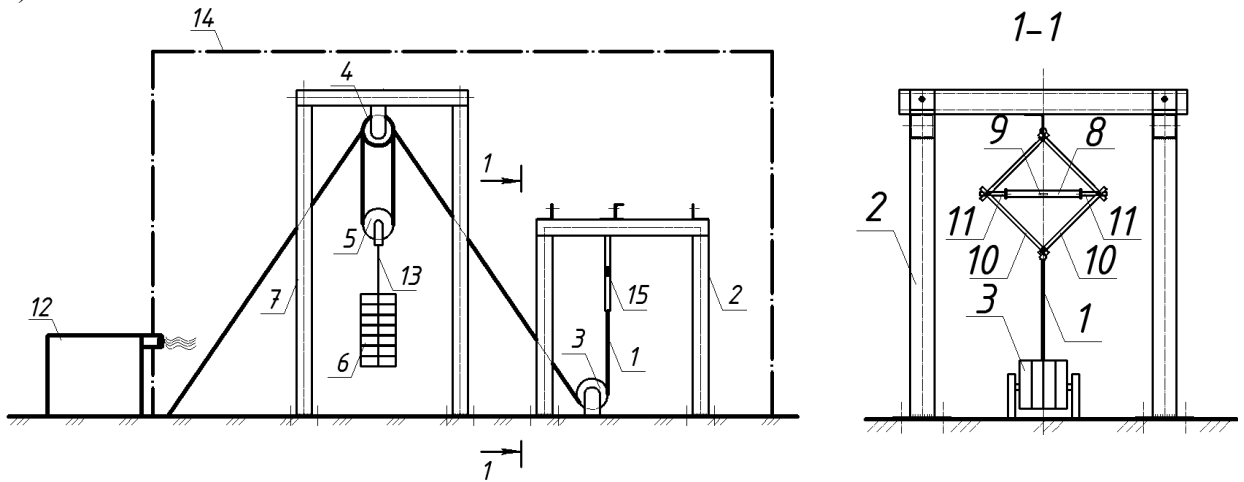
зом, с помощью описанной установки в опытном образце создается сжимающее усилие N . Это позволяет, увеличивая нагрузку заранее тарированными грузами, исследовать устойчивость сжатого деревянного стержня.

В соответствии с принятой конструктивной системой испытательного стенда и принятой кратностью полиспаста значение сжимающей силы, передаваемой на исследуемый образец, определялось из уравнения статики по следующей формуле:

$$N = \alpha \cdot P \cdot \frac{(b + 0,5 \cdot l) \cdot \sqrt{a^2 - 0,25 \cdot (0,5 \cdot l + b)^2}}{a^2}, \quad (16)$$

где α – кратность полиспаста; P – масса груза; l – длина испытываемого образца; a , b – размеры рабочей рамки шарнирно-стержневой системы (см. рис. 4, в).

а)



б)



в)

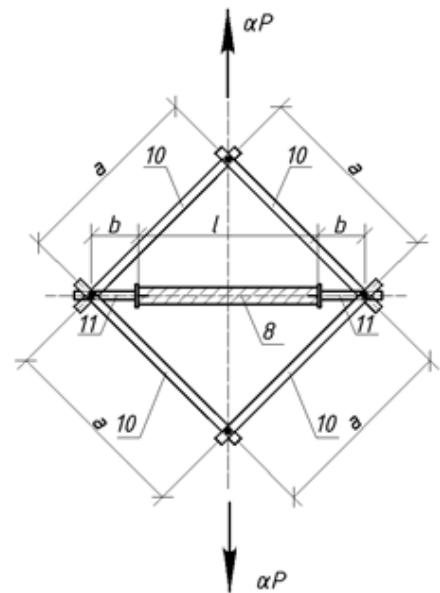


Рисунок 5 – Схема (а), общий вид (б) и рабочая шарнирно-стержневая система (в) установки для оценки прочности и устойчивости центрально-сжатого стержня из древесины: 1 – канат; 2 – несущая рама шарнирно-стержневой системы, 3 – неподвижная обойма 1 блока полиспаста, 4 – неподвижная обойма 2 блока полиспаста, 5 – подвижная обойма блока полиспаста, 6 – груз, 7 – несущая рама, 8 – исследуемый образец, 9 – тензорезистор, 10 – силовые элементы шарнирно-стержневой системы, 11 – сжимающие элементы шарнирно-стержневой системы, 12 – увлажнитель воздуха, 13 – элемент для крепления груза, 14 – герметичная камера, 15 – рабочая шарнирно-стержневая система

Для создания одновременного приложения к опытному образцу нагрузки и среднего воздействия испытательная установка размещалась в герметичной камере 14. При помощи увлажнителя воздуха 12 в камере изменяется влажность до заданного уровня.

В таблице 2 приведены основные результаты кратковременных испытаний образцов серий Д-30; в таблице 3 представлены результаты длительных испытаний образцов серии Д-35.

На рисунке 6 показан график изменения значения критической силы $P_{кр}$ от времени t при указанных гибкостях.

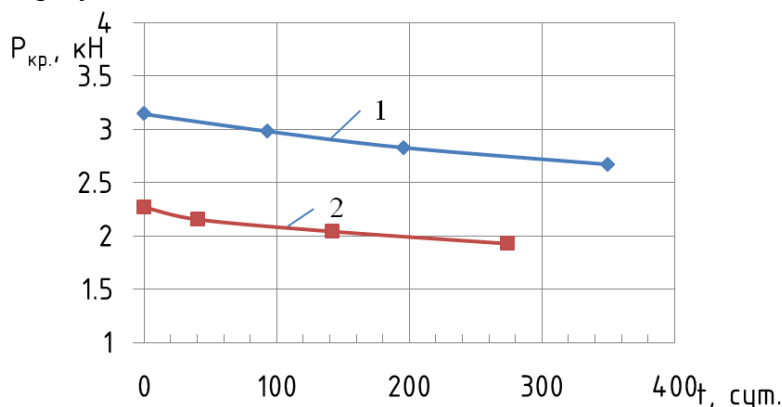


Рисунок 6 – График изменения критической силы ($P_{кр}$) во времени: 1 - при $\lambda=103.92$; 2 - $\lambda=121.34$, кН

Из рисунка 6 видно, что параметр времени оказывает существенное влияние на предельное напряжение и устойчивость центрально сжатого стержня из древесины в первые 200 суток. Определено, что при постоянной влажности и длительном действии нагрузки критическая сила экспоненциально уменьшается во времени. При влажности $w=20\%$ в момент времени $t=0$ сут критическая сила исследуемого образца гибкостью $\lambda=103.92$ равна $P_{кр}=2,92$ кН, в момент времени $t=40$ сут критическая сила уменьшается на 10% и составляет 2,77 кН, а при $t=62$ сут критическая сила уменьшается на 20%, значение $P_{кр}$ при этом равно 2,63 кН (рис. 7, а).

Таблица 2 – Результаты кратковременных испытаний образцов серии Д-30 при влажности $w=12\%$

Гибкость	$P_{кр}$, кН
103.92	3.39
103.92	3.24
103.92	3.10
103.92	3.07
103.92	3.10
среднее значение	3.24
среднеквадратическое отклонение	0.07
коэффициент вариации	0.02
значение ряда с вероятностью 0.99	3.14

Таблица 3 – Результаты длительных испытаний образцов серии Д-35 при влажности $w=12\%$

Гибкость	$P_{кр}$, кН	t до разрушение при P , сут.		
		0,95* $P_{кр}$	0,9* $P_{кр}$	0,85* $P_{кр}$
121,244	2,47	43,00	122,0	272,0
121,244	2,38	55,00	135,0	286,0
121,244	2,74	42,00	125,0	292,0
121,244	2,35	39,00	131,0	269,0
121,244	2,35	32,00	115,0	256,0
среднее значение	2,46	42,20	125,6	275,0
среднеквадратическое отклонение	0,07	3,34	6,97	5,71
коэффициент вариации	0,03	0,08	0,55	0,02
значение ряда с вер, 0,99	2,38	38,35	120,1	268,4

Выявлено, что критическая сила при кратковременном действии нагрузки экспоненциально уменьшается при увеличении влажности древесины. В момент времени $t=0$ сут критическая сила исследуемого образца при влажности 12% равна 3,19 кН, при влажности 20% значение $P_{кр}$ уменьшается до 2,92 кН, при влажности $w=30\%$ - до 2,50 кН (рис. 7, б).

Еще больше критическая сила уменьшается при длительном действии нагрузки и при увеличении влажности древесины. При влажности 12% в момент времени $t=0$ сут

критическая сила равна 3,19 кН, а при $t=72$ сут и влажности $w=30\%$ критическая сила уменьшается на 10% и составляет 2,40 кН.

Таблица 4 – Результаты длительных испытаний образцов серии Д-30 при влажности $w=20\%$

Гибкость	Р _{кр} , кН	t до разрушение при Р, сут.	
		0,95*Р _{кр}	0,9*Р _{кр}
103.92	3.12	41.00	69.00
103.92	2.77	38.00	57.00
103.92	3.35	48.00	84.00
среднее значение	3.08	42.33	70.00
среднеквадратическое отклонение	0.14	2.42	6.38
коэффициент вариации	0.05	0.06	0.09
значение ряда с вероятностью 0.99	2.92	39.54	62.64

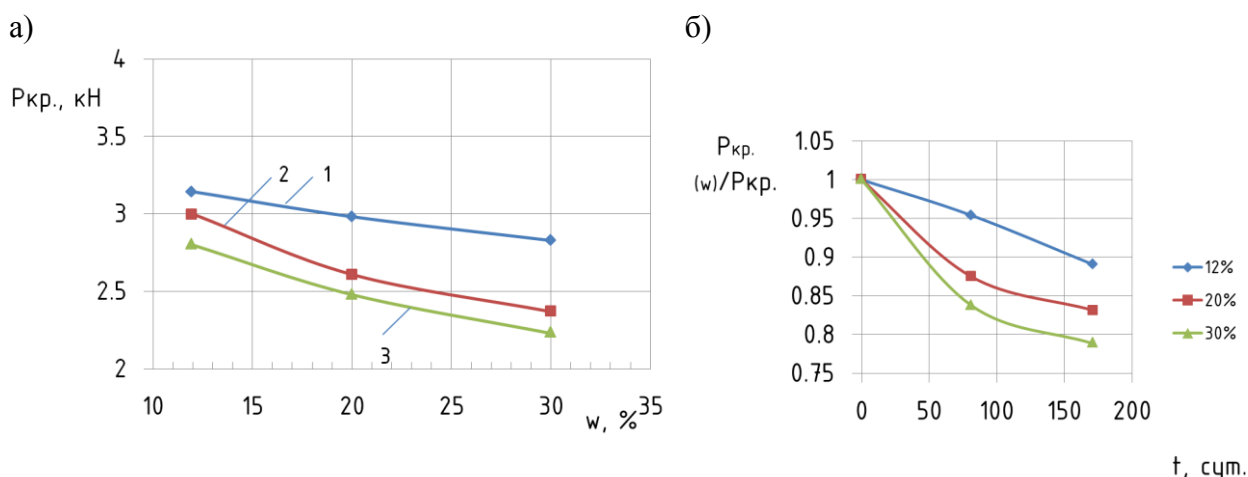


Рисунок 7 – График изменения критической силы ($P_{кр}$) при переменной влажности при $\lambda=103.92$ (а) и во времени при $\lambda=103.92$ при различной влажности (б): 1 – при $t=0$ сут.; 2 – при $t=81$ сут.; 3 – при $t=171$ сут.

Предложенная методика экспериментальных исследований позволила получить данные о напряжённо-деформированном состоянии центрально сжатых стержней из древесины.

В четвертой главе диссертации рассмотрена задача влияния времени приложения нагрузки и изменения влажности на характер бифуркации стержней в конструктивной системе из древесины.

Рассмотрена деревянная двухпролетная рама, в которой центральная стойка нагружена сосредоточенной силой $P_{кр}$, а крайние стойки нагружены силами $\alpha P_{кр}$ (рис. 8). Определен вид бифуркации стержня (стесненной или принужденной). Расчет рамы выполним квазистатическим методом перемещений с использованием шагово-итерационной процедуры и алгоритма для раскрытия физической нелинейности.

Пусть выделенный из системы стержень при некотором критическом значении нагрузки $P_{кр}$ (w , t) теряет устойчивость. Его энергия деформации U_i , добавляющаяся при бифуркации будет равна сумме работ концевых сил и моментов:

$$U_i = A_i(N) + A_i(M_i, Q_i), \quad (17)$$

где $A_i(N) = N_i \cdot \Delta_i$ – работа продольных сжимающих сил на сближение Δ_i точек А и В от изгиба; $A_i(M_i, Q_i)$ – работа концевых реакций i -го стержня в процессе изгиба. Усилия M_i и Q_i и концевые перемещения находятся из решения задач устойчивости системы.

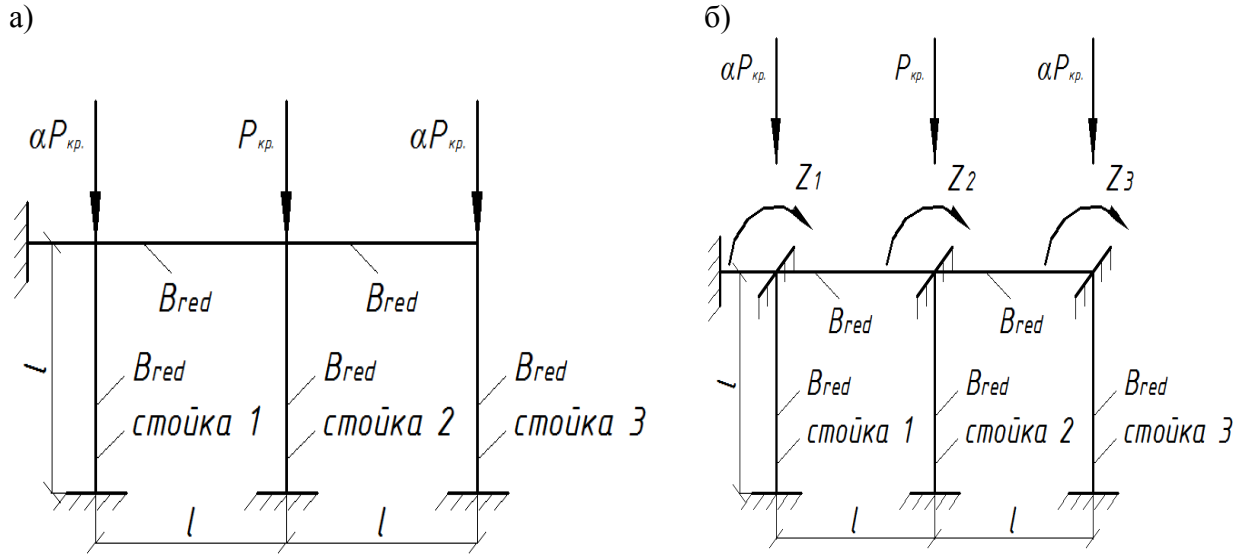


Рисунок 8 - Расчетная схема (а) и эквивалентная (б) системы метода перемещений

Критерий $A_i(M_i, Q_i) < 0$ становится признаком *активной* потери устойчивости стержня в конструктивной системе, т.е. работы одной продольной силы N_i достаточно для компенсации приращения потенциальной энергии деформации стержня U_i и окружение стержня (в виде опорных реакций) сопротивления его бифуркации. Критерий $A_i(M_i, Q_i) > 0$ становится признаком *пассивной* потери устойчивости, т.е. окружение стержня помогает его бифуркации. Критерий $A_i(M_i, Q_i) = 0$ говорит о равноустойчивом положении стержня.

Вычисление работ концевых моментов и поперечных сил выполнено с помощью специальных функций метода перемещений. Если принять за неизвестные углы поворота узлов Z_1, Z_2, Z_3 (рис. 8), однородная система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} r_{11} \cdot Z_1 + r_{12} \cdot Z_2 + r_{13} \cdot Z_3 = 0 \\ r_{21} \cdot Z_1 + r_{22} \cdot Z_2 + r_{23} \cdot Z_3 = 0 \\ r_{31} \cdot Z_1 + r_{32} \cdot Z_2 + r_{33} \cdot Z_3 = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{где } r_{11} &= 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1); \\ r_{22} &= 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2); \\ r_{33} &= 4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3); \\ r_{12} &= r_{23} = 2 \cdot i; \\ r_{13} &= r_{31} = 0; \\ v_i &= l \cdot \sqrt{\frac{P_i}{B_{red}(w,t)}}, \quad (i = 1,2,3). \end{aligned}$$

Детерминант системы (18) определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} Det &= (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)) \cdot (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2)) \cdot (4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)) + 16 \cdot \\ & i^3 - (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)) \cdot 4 \cdot i^2 - 4 \cdot i^2 \cdot (4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)). \end{aligned} \quad (19)$$

После преобразования выражения (19) характеристическое уравнение для определения критического параметра $P_{кр}(w, t)$ примет вид:

$$8 \cdot [(2 + \varphi_2(v_1)) \cdot (2 + \varphi_2(v_2)) \cdot (1 + \varphi_2(v_3))] - 2 \cdot [3 + \varphi_2(v_1) + \varphi_2(v_3)] = 0. \quad (20)$$

Приведенная переменная во времени при заданной влажности древесины жесткость сечения стержня $B_{red}(w, t) = E(w, t) \cdot I$ определена с учетом (14).

С использованием приведенных уравнений определены критические параметры и формы потери устойчивости рассматриваемой конструктивной системы. Интерес представляет оценка влияния времени приложения нагрузки и изменения влажности древесины на характер бифуркации стержней в конструктивной системе. В действительности можно ожидать, что под воздействием силовых и средовых факторов отдельные стержни рамы могут перейти из пассивной потери устойчивости в активную и наоборот, т.е. неравенство $A_i < 0$ изменит свой знак.

Для решения этой задачи определим параметр векового уравнения $v_{i_{кр}}$, при котором возможен переход от пассивной бифуркации к активной:

$$v_{i_{кр}} = l \cdot \sqrt{\frac{P}{B_{red}(w,t)}}. \quad (21)$$

Начальный параметр векового уравнения при заданном постоянном значении нагрузки ($t=0$) и фиксированном значении влажности древесины ($w=12\%$), будет соответственно равен:

$$v_{i_0} = l \cdot \sqrt{\frac{P}{B_0}}. \quad (22)$$

Отношение квадратов критического и начального параметров векового уравнения обратно пропорционально отношению соответствующих жесткостей:

$$\frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2} = \frac{B_0}{B_{red}(w,t)}. \quad (23)$$

Параметр v_{i_0} определяется при расчете рамы на устойчивость по известным правилам строительной механики, а параметр $v_{i_{кр}}$ по уравнению (17) при $U_i = 0$.

Пользуясь соотношением (23), выразим значение приведенной, переменной во времени (t) и влажности древесины (w) жесткости сечения стержня, при котором возможен переход от пассивной бифуркации к активной:

$$B_{red}(w,t) = \frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2} \cdot B_0. \quad (24)$$

В случаях, когда уравнение (24) имеет действительные корни, вследствие изменения жесткости стержня рамы во времени, соответствующий элемент рамы переходит от пассивного состояния к активному. При этом возникает вероятность потери устойчивости рамы в целом.

Используя этот критерий (24) для рассматриваемой рамы было определено изменение формы потери устойчивости стоек при различных значениях параметра нагрузки $\alpha=0,5$; $\alpha=0,6$; $\alpha=0,7$; $\alpha=0,8$; $\alpha=0,9$ в режиме изменения жесткости стоек. $B_{red}(w,t)$ определялось с учетом (14). Результаты такого расчета представлены на рис. 9.

Из рисунка (см. рис.9) видно, что режимное нагружение рамы во времени уменьшает величину критической силы, при которой происходит потеря устойчивости крайних стоек. Такое же влияние на изменение критической силы для крайних стоек оказывает и увеличение влажности древесины.

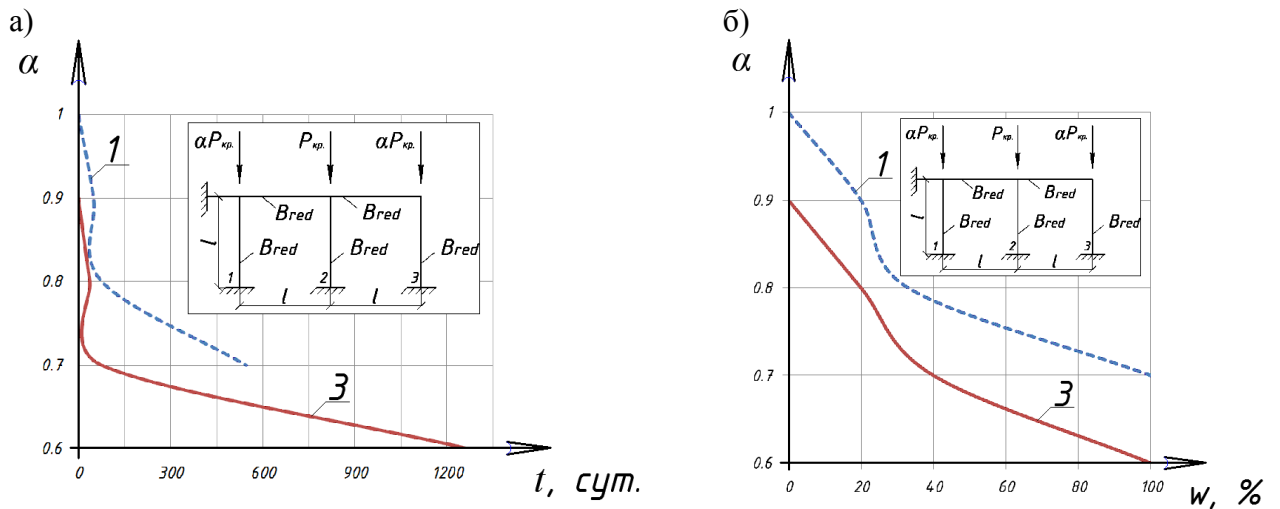


Рисунок 9 - Изменение характера потери устойчивости крайних стоек при различных значениях параметра α во времени (а) и при изменении их влажности (б)

Для анализа представленных выше графиков рассмотрим изменение формы потери устойчивости стоек рамы во времени при $\alpha=0,8$ (рис. 10).

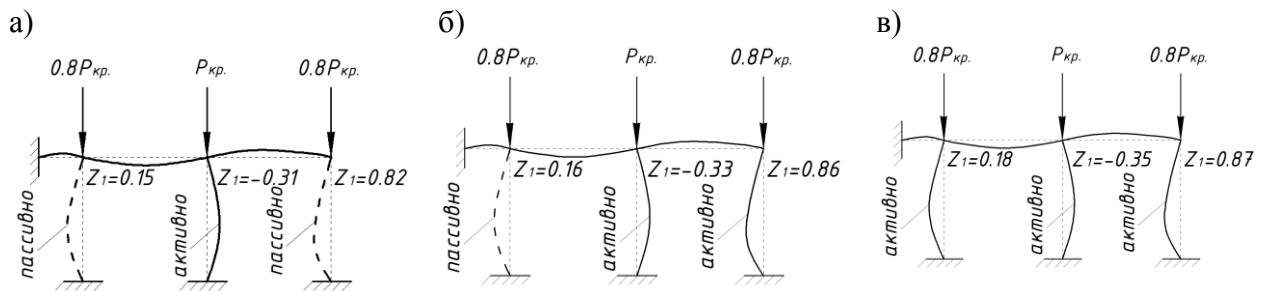


Рисунок 10 - Изменение формы потери устойчивости крайних стоек рамы при значении параметра $\alpha=0,8$ и влажности 12% во времени: а) от $t = 0$ до $t = 36$ сут; б) от $t = 36$ сут. до $t = 132$ суток; в) при $t > 132$ сут.

Механизм возникновения активной и пассивной бифуркации во времени наглядно можно проследить по рис. 11, из которого видно, что при режимном нагружении рамы во времени от $t = 0$ до $t = 36$ сут при $\alpha=0,8$ средняя стойка испытывает «активный» тип потери устойчивости, а крайние – пассивный, т.е. имеет место случай, когда $A_1(M_i, Q_i) > 0$, $A_2(M_i, Q_i) < 0$, $A_3(M_i, Q_i) > 0$.

Аналогичный анализ изменения формы потери устойчивости при более высокой влажности $w=25\%$, $w=30\%$ показан на рис. 11.

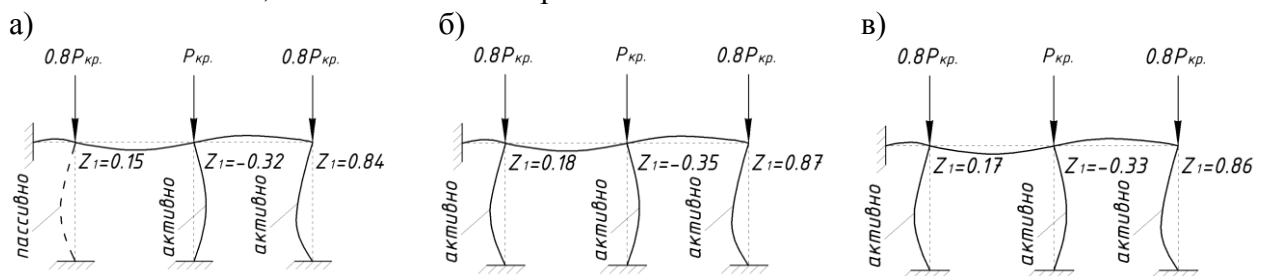


Рисунок 11 - Изменение формы потери устойчивости крайних стоек рамы при значении параметра $\alpha=0,8$ и влажности 25% во времени: а) от $t = 0$ до $t = 94$ сут.; б) при $t > 94$ сут.; в) при влажности более 30%

В пределах значений времени от $t = 36$ сут. до $t = 132$ суток средняя 2 и правая 3 стойки испытывают активный тип потери устойчивости, а левая стойка 1 – пассивный, т.е. $A_1(M_i, Q_i) > 0$, $A_2(M_i, Q_i) < 0$, $A_3(M_i, Q_i) < 0$. При $t > 132$ сут. все стойки рамы испытывают активный тип потери устойчивости, вовлекая в общую бифуркацию всю конструктивную систему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что в диссертации получили существенное развитие экспериментально-теоретические способы определения критической силы при расчете на устойчивость стержневых элементов из древесины. При этом получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Построены определяющие уравнения определения длительной прочности и предельного значения критической силы сжатого стержня на основе реологической модели режимного нагружения древесины.

2. Разработан критерий длительной устойчивости сжатого стержня из древесины при совместном проявлении силового воздействия, влажности и времени нагружения.

3. Разработана методика экспериментального определения параметров прочности и устойчивости центрально сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности.

4. Экспериментально определены параметры длительной прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности.

5. Проведен анализ параметров прочности и устойчивости исследуемых опытных образцов и произведено сопоставление с их расчётными значениями, полученными по разработанной методике.

6. Разработаны методика и алгоритм расчетного анализа устойчивости нагруженных стержневых элементов конструктивных систем, выполненных из древесины, в условиях стесненной бифуркации с учетом реологических свойств древесины, переменной влажности и влияния соседних несущих элементов конструктивной системы.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшие исследования устойчивости стержневых элементов из древесины планируется направить на исследование пространственной расчетной схемы, а также на разработку методик и алгоритмов расчетного анализа устойчивости нагруженных стержневых элементов конструктивных систем, выполненных из древесины, в условиях стесненной бифуркации при коррозионных, ударных и др. воздействиях.

В приложения включены справки о внедрении результатов диссертационной работы, текст программы для ЭВМ, пример расчета двух пролетной рамы.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Травуш В.И. Длительная прочность и устойчивость сжатых стержней из древесины [Текст]/В.И. Травуш, В.И. Колчунов, **К.О. Дмитриева**//Строительство и реконструкция. - 2015. - №5, - С. 40-46.

2. Травуш В.И. Устойчивость сжатых стержней из древесины при одновременном проявлении силового и средового воздействия [Текст]/ В.И. Травуш, В.И. Колчунов, **К.О. Дмитриева** //Строительная механика и расчет сооружений. - 2016. - №2. – С.50-53.

3. Травуш В.И. Анализ устойчивости стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности [Текст]/В.И. Травуш, В.И. Колчунов, **К.О. Дмитриева**//Технология текстильной промышленности. - 2016. - №3. - С. 280-285.
4. Н.В. Ключева. Анализ устойчивости стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности [Текст]/Н.В. Ключева, **К.О. Дмитриева**//Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2016. - №3. - С. 17-24.
5. **Дмитриева К.О.** Вопросы устойчивости стержневых элементов конструктивных систем из древесины при силовом и средовом нагружении [Текст]/К.О. Дмитриева//Строительство и реконструкция. - 2016. - №4. - С. 13-18.
6. Ключева Н.В. Вопросы устойчивости стержневых элементов конструктивных систем из древесины различных пород при силовом и средовом нагружении в условиях повышенной влажности [Текст]/ Н.В. Ключева, **К.О. Дмитриева**//Строительство и реконструкция. 2016. - №5. - С. 60-66.
7. Пат. 142 336 RU, МПК G01M 7/00 (2006.01) Устройство для исследования устойчивости центрально-сжатого стержня из древесины/ Барановская К.О. (Дмитриева К.О.), Сморгчов А.А., Кереб С.А.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. - № RU 142 336; Заявл. 19.02.2014; опубл. 27.06.2014. Бюл. №18.
8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. «Программа для определения критической силы при росте на устойчивость стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности» /Дмитриева К.О., Колчунов В.И.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. - № RU 2016616852; Заявл. 26.04.2016; опубл. 27.07.2016.

Статьи и доклады в других научных изданиях:

9. Травуш В.И. Длительная прочность и устойчивость сжатых стержней из древесины [Текст]/В.И. Травуш, В.И. Колчунов, **К.О. Дмитриева**//Вторая Крымская международная конференция «Методология энерго-ресурсосбережения и экологической безопасности», 2015. - С. 70-71.
10. Барановская К.О. (**Дмитриева К.О.**) Устойчивость сжатых анизотропных стержней // Региональный круглый стол «Теория расчета сооружений и конструкций: современное состояние и перспективы развития научных школ ЮЗГУ».

Подписано в печать 21.10.2016 г. Формат 60x90/16 Гарнитура Times New Roman. Объем 1,0 усл. п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета ИП Бескровным А.В. 305029, г. Курск, ул. К. Маркса, 61/Б