

ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Дмитриева Ксения Олеговна

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

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
академик РААСН,
доктор технических наук,
профессор В. И. Травуш

Курск - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СИЛОВЫХ И СРЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.....	11
1.1 Конструктивные решения и методы расчета устойчивости несущих деревянных элементов конструкций.....	11
1.2 Существующие подходы к построению теории и критериев устойчивости стержневых конструкций.....	19
1.3 Применяемые физические методы для расчета прочности и устойчивости деревянных конструкций при кратковременном нагружении.....	24
1.4 Цель и задачи диссертации.....	30
2. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ПРОЯВЛЕНИИ СИЛОВЫХ И ВЛАЖНОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	31
2.1 Общие замечания. Исходные гипотезы.....	31
2.2 Физическая модель, расчетная схема и разрешающие уравнения устойчивости центрально сжатых стержней из древесины.....	33
2.3 Критерий устойчивости стержневого элемента при силовом и средовом нагружениях.....	45
Выводы по главе 2.....	54
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГИБКИХ ДЕРЕВЯННЫХ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СИЛОВОМ И СРЕДОВЫМ НАГРУЖЕНИИ.....	55
3.1 Цель и задачи экспериментальных исследований.....	55
3.2 Методика экспериментальных исследований. Конструкции опытных образцов.....	55
3.3 Устойчивость сжатых опытных образцов при длительном нагружении.....	63
3.4 Устойчивость сжатых опытных образцов при длительном нагружении и переменной влажности.....	73

3.5 Выводы по главе 3	79
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМАХ, ИХ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ	81
4.1 Интегральный критерий определения форм потери устойчивости центрально сжатых стержней в конструктивной системе	81
4.2 Влияние различных факторов на характер бифуркации стержней в конструктивной системе	88
4.4 Исследование устойчивости деревянных элементов конструктивной системы с центрально сжатыми стойками из древесины	97
4.5 Особенности алгоритмизации задач расчета устойчивости стержней в конструктивных системах	106
4.6 Выводы по главе 4	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	111

Приложение А Пример расчета устойчивости сжатых элементов одноэтажной деревянной рамы в условиях силового и среднего нагружения	132
Приложение Б Реферат и исходный текст программы для определения критической силы при расчете на устойчивость стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности	145
Приложение В Справки и акты о внедрении	160

ВВЕДЕНИЕ

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 характеристики древесины подвержены изменению во времени и при воздействии переменной влажности.

Однако еще недостаточно изучена прочность и устойчивость стержней из древесины в условиях длительного силового и средового сопротивления, что значительно влияет на определении 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 причиной потери устойчивости всей конструктивной системы часто 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 из древесины при силовом нагружении и средовом воздействии. 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. Вопросами устойчивости стержней и стержневых систем занималось большое количество известных ученых такие, как Т. Карман, Ф. Энгессер, Ф.С. Ясинский, И.Г. Бубнов, С.П. Тимошенко, П.Ф. Папкович, Н.С. Стрелецкий, А.Р. Ржаницын, Ф.Р. Шенли, А.С. Вольмир, Н.В. Карнаухов, А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Л.С. Ляхович, В.В. Болотин, Б.Я. Лашенников, Н.Н. Шапошников, В.Д. Потапов и др.

Кроме того вопросам исследования в области устойчивости конструктивных систем посвящены работы А.В. Александрова, А.В. Перельмутера, В.И. Сливкера, В.И. Колчунова, Г.Г. Кашеваровой, К.П. Пятикрестовского, Н.В. Ключевой, А.В. Туркова Р.С. Санжаровского, Б.В. Лабудина, А.М. Ибрагимова, А.С. Бухтияровой, М. Зицковскі, М.М. Фридмана, Elishakoff, D.Stojić.

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

Разработка физических методов для расчета прочности и устойчивости деревянных конструкций при кратковременном и длительном нагружении отражена в работах К.П. Пятикрестовского, 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 определении 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 соседних 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;
- построенный 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 покрытий 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.

В полном объеме работа рассмотрена и одобрена на расширенном заседании кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, сентябрь 2016 г.).

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 146 страницах, включающих 109 страниц основного текста, 46 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 194 наименований и 3 приложения.

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

В первой главе анализируется современное состояние исследований в области устойчивости деревянных элементов конструкций при силовых и средовых воздействиях, а также методы для расчета прочности и устойчивости деревянных конструкций при кратковременном и длительном нагружении.

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

Для решения поставленной задачи сформулированы 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 $1/\epsilon$ и др.;

- при мгновенном изменении степени статической неопределимости, полная удельная энергия конструктивной системы не изменяется;

- под воздействием силовых и средовых факторов отдельные стержни рамы могут перейти из пассивной потери устойчивости в активную и наоборот;

- задача рассматривается при одноосном напряженном состоянии, кроме того в линейной постановке предложено ввести длительный модуль деформации.

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

В ходе эксперимента были сформулированы и решены следующие задачи:

- изготовлены опытные образцы, разработаны 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;

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

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

Для составления алгоритма определения характера бифуркации стержней из древесины в конструктивной системе в зависимости от силового нагружения и влажности приняты следующие рабочие гипотезы:

- при мгновенном изменении степени статической неопределимости, полная удельная энергия конструктивной системы не изменяется;

- под воздействием силовых и средовых факторов отдельные стержни рамы могут перейти из пассивной потери устойчивости в активную и наоборот.

Заключение содержит основные результаты и выводы по работе.

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

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СИЛОВЫХ И СРЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

1.1 Конструктивные решения и методы расчета устойчивости несущих деревянных элементов конструкций

Применение деревянных конструкций в нашей стране имеет давние традиции. В Советском Союзе в 30-х годах впервые были применены разнообразные формы пространственных дощато-гвоздевых конструкций типа оболочек. Эти формы базировались на конструктивных идеях И.П. Кулибина по созданию многорешетчатых систем. Начиная с 1932 г. сотрудники ЦНИИПС Г.Г. Карлсен, Б.В. Большаков, М.Е. Каган [70], П.Н. Ершов, В.М. Коченов [92], М.Ф.Ковальчук, А.В. Лентяшин, И. А. Цыпленков, а также инженеры-исследователи и проектировщики К.П. Какаров, Г.В. Свенцицкий, Р.В. Мильвицкий разработали и возвели своды и купола-оболочки, куполообразные конструкции из плоских решетчатых арок, тонкостенные купола - оболочки из меридиональных ребер и кольцевых настилов, купола с ребрами составного сечения с фанерной стенкой и кольцевыми связями из парных прогонов и подкосов, кольцемассивные купола. Например, ребристый купол диаметром 59 м Симоновского дворца культуры в Москве (автор Г.В.Свенцицкий), цирк-театр в Баку с куполом диаметром 67 м (автор К.П. Какаров), купол цирка в Иваново диаметром 50 м и др. Известны оригинальные по конструкции и живописные своды арх. С.И. Песельника. В период первой половины XX века, когда древесина была одним из наиболее популярных и распространенных материалов. Строительство общественных и промышленных зданий и сооружений из неё позволило решить многие хозяйственные проблемы. Были возведены большепролетные эллинги, покрытия химических предприятий, складские и зрелищные и многие другие здания и сооружения.

В дальнейшем строительные конструкции производились в основном из других различных строительных материалов – стали, алюминия, железобетона,

пластмасс, которые во многом ограничили применение дерева в конструкциях. В настоящее время клееные и обычные деревянные конструкции в основном используются для покрытий спортивных залов, стропильных кровель, в качестве несущих конструкций бань и жилых домов в индивидуальной застройке, для отделки интерьеров и т.д.

С падением интереса к дереву как к строительному материалу связано и уменьшение количества научных исследований, что в свою очередь привело к уменьшению числа диссертаций, статей, учебной литературы, сохранению устаревшей нормативной базы. Для студентов высших учебных заведений часто переиздаются учебники, написанные в 30-е – 80-е года XX века.

Более широкое применение имеют деревянные конструкции за рубежом. Выдающимся, сооружением из деревянных конструкций является Плаза-де-ла-Энкарнасьон в Севилье (рис. 1.1). Это уникальное строение считается самой огромной деревянной конструкцией на всем земном шаре. Деревянная крыша строения Плаза-де-ла-Энкарнасьон находится на высоте 28 метров от земли. Держится она на столбах из железобетона. Длина конструкции составляет 175 метров, а ширина ее достигает 75 метров.

Уникальная современная часовня the TreeofLifeChapel (рис. 1.2) была построена в семинарии Сент-Джеймс, расположенной в Браге (Португалия).

Волнообразная кровля павильона в Виндзорском парке в Лондоне собрана из деревянных несущих элементов, образующих необычный орнамент. В Лондоне строится также самое высокое на сегодняшний день здание из древесины — девятиэтажный жилой дом. Конечно, сооружают его не из простых досок, а из специального надежного многослойного материала, по строению похожего на толстую фанеру. Сборка из готовых элементов конструкции с вырезанными оконными и дверными проемами значительно ускоряет возведение дома — планируется возвести его всего лишь за девять недель.



Рисунок 1. 1 - Плаза-де-ла-Энкарнасьон в Севилье

Для более широкого внедрения деревянных конструкций в нашей стране необходимо проведение массовых научных экспериментальных и теоретических исследований. Среди них актуальны, например, исследования прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом и средовом воздействии.



Рисунок 1. 2 - Часовня the Tree of Life Chapel

а)



б)



Рисунок 1. 3 – Самый большой деревянный дом Timber Tower в Лондоне: а – общий вид здания; б – план этажа

Вопросы, связанные с проектированием деревянных конструкций, остаются актуальными и при реконструкции зданий. Значительная часть действующих предприятий промышленности построена более 50-60 лет назад. Несущие стены здания и колонны традиционно выполнялись из кирпича; стропильные конструкции покрытия и междуэтажные перекрытия чаще всего были деревянными. Кроме того, здания обычно пристраивались и надстраивались по мере развития производства. С течением времени и под воздействием силовых и средовых факторов несущие конструкции этих зданий все чаще приходят в ветхое состояние и требуют ремонта. Такая же ситуация наблюдается и с жилыми домами, построенными в послевоенный период.

В настоящее время разработаны различные технологии поддержания таких конструкций в эксплуатационном состоянии. Основной сложностью при усилении деревянных конструкций объектов промышленности является отсутствие результатов исследования деревянных конструкций на отдельные виды воздействий при их эксплуатации. В частности, недостаточно изученными

остаются вопросы прочности и устойчивости стержней из древесины в условиях длительного силового и средового сопротивления.

Вопросы, связанные с поиском путей повышения безопасности зданий и сооружений будут актуальны до тех пор, пока человек будет строить. Отдельное место в данной области занимают проблемы исследования устойчивости равновесия объектов, т.к. очень часто процесс потери устойчивости развивается почти молниеносно и не дает возможности эвакуировать людей и принять меры по предотвращению разрушения.

Под устойчивостью понимают способность систем сохранять свое состояние равновесия или движения во времени под действием малых возмущений. Под неустойчивостью - способность систем при действии весьма малых возмущений получать большие перемещения. "Понятие устойчивости, его определение и критерий должны быть неотделимы от практического представления о потере устойчивости конструкций и их элементов, как о катастрофическом явлении развития перемещений, деформаций, напряжений. Поэтому неединственность решения дифференциальных уравнений, описывающих те или иные процессы нагружения и деформирования, являются необходимым, но недостаточным условием потери устойчивости"[63].

Одной из первых работ, посвященных исследованию устойчивости сжатых стержней в условиях ползучести, была работа А.Р. Ржаницына [130-132], в которой был рассмотрен идеально прямой шарнирно опертый стержень, материал которого подчиняется закону деформирования Кельвина. Решалась задача об изменении амплитуды малого синусоидального прогиба, вызванного возмущением (начальным прогибом) при постоянной сжимающей силе. Автор ввел понятия мгновенной P_3 и длительной P_d критических нагрузок. Если действующая нагрузка $P < P_d$, то прогиб асимптотически стремится к нулю при стремлении времени к бесконечности. При $P_d < P < P_3$ прогиб возрастает, а при $P = P_3$ прогиб мгновенно обращается в бесконечность в начальный момент времени. Далее А.Р. Ржаницыным был рассмотрен стержень с постоянным

возмущением начального прогиба и получены те же окончательные качественные выводы об устойчивости вязкоупругого стержня [131].

Подробный анализ истории развития методов расчета стержневых элементов на устойчивость представлен в работах Г.Г. Кашеваровой [62, 72], К.П. Пятикрестовского [113-127], Б.В. Лабудина [94], А.В. Александрова [3-8], А.В. Туркова [147-151].

Так в современных нормативных документах по расчету и проектированию строительных конструкций [140] содержатся требования принимать конструктивные схемы, обеспечивающие прочность, устойчивость и пространственную неизменяемость всего здания и сооружения, а также их отдельных элементов на весь период строительства и эксплуатации. Как правило, конструкции необходимо рассчитывать с учетом неупругих деформаций материала как единые пространственные системы. До недавнего времени основным аналитическим методом расчета стержневых конструкций на устойчивость в строительной механике являлся метод перемещений [2, 29, 49, 80, 101], который получил развитие в трудах А.И. Рабиновича [128], Н.В. Корноухова [91], Ю.Н. Работнова [129], Н. Хоффа [162], А.Ф. Смирнова [138] и др. При расчете конструкций методом перемещений в качестве неизвестных принимаются линейные смещения и углы поворота узлов. Основная разрешающая система уравнений метода перемещений формируется установкой дополнительных связей, т.е. закреплением некоторых узлов от линейного смещения и поворота. При расчете на устойчивость прикладывать внешнюю нагрузку необходимо в узлах конструкции. До момента потери устойчивости в дополнительных связях никаких реакций не возникает. Определение перемещения в рамках метода сил для ряда случаев может приводить к довольно громоздким вычислениям [138], [143], [159, 160].

Исследования в области деревянных конструкций опираются на существенные достижения в области теории, конструирования и массового применения в строительстве конструкций из других материалов, особенно из железобетона и металлов. Большое практический вклад в развитие теории

расчета, проектирования и конструирования зданий и сооружений внесли Г.А. Гениев [49-52], В.И. Травуш [145, 146], В.И. Колчунов [80-90], Вл. И. Колчунов [45], Н.В. Ключева [77-78], А.Г. Тамразян [142], С.П. Тимошенко [143], А.А. Гвоздев [48], П.А. Лукаш [101], К.П. Пятикрестовский [113-127] и др.

Одновременно в нашей стране придается огромное значение разработкам нелинейной теории расчета различных конструкций. Кроме трудов перечисленных ученых успехи в решении вопросов использования теории ползучести достигнуты благодаря разработкам В.М. Бондаренко [30], А.Б. Гольшева.

Большое внимание уделялось построению деформационных моделей ползучести бетона и железобетона, в том числе разработке инженерных методов расчета (В.М. Бондаренко), позволяющие упростить применение строгих теорий при проектировании зданий и сооружений.

Вопросами нелинейной работы древесины и ее длительного сопротивления, в том числе с учетом изменения влажности и температуры, посвящены труды Е.Н. Квасникова [74], Ю.М. Иванова [65-68].

Часто причиной потери устойчивости всей конструкции является один элемент или небольшая их группа. Важным вопросом в исследовании устойчивости систем является выявление наиболее опасных элементов или частей конструкции, способствующих потере устойчивости. Установлению критерия определения вида бифуркации стержня (стесненной или принужденной) или какой-либо части конструкции посвящены работы Л.С. Ляховича [100], Александрова А.В. [2-8], Перельмутера А.В. и Сливкера В.И. [109-110]. Развитию указанного критерия, построению методики и соответствующего программного обеспечения для анализа стержневых систем, теряющих устойчивость с выявлением наиболее активных и тем самым опасных элементов посвящены работы Сливкера В.И., Перельмутера А.В., Матвеева А.В. [104-107].

Разработка методики и алгоритма расчета для исследования живучести железобетонных рамно-стержневых систем в предельных состояниях при

внезапной потере устойчивости несущих элементов ведется в работах Прасолова Н.О., Ветровой О.А. [77-78].

1.2 Существующие подходы к построению теории и критериев устойчивости стержневых конструкций

Современное состояние нормативных документов в области деревянных строительных конструкций требует совершенствования методики их расчетов, а также гармонизации с европейскими нормами.

Существующий нормативный документ [140] предусматривает расчёт изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов по следующим формулам:

– на устойчивость плоской формы деформирования при изгибе:

$$\sigma = \frac{M}{W\varphi_m} \leq R_e; \quad (1.1)$$

– на устойчивость плоской формы деформирования при сжатии с изгибом:

$$\frac{N}{\varphi_y R_c A} + \left(\frac{M_{\dot{a}}}{\varphi_m W R_n} \right)^n \leq 1; \quad (1.2)$$

– на устойчивость при сжатии:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq R_c, \quad (1.3)$$

где φ_m – коэффициент устойчивости при изгибе; φ_y и φ – коэффициенты продольного изгиба.

В общем случае φ_m и φ определяют по формулам:

$$\varphi_m = M_{кр} / M_{раз}; \quad (1.4)$$

$$\varphi = N_{кр} / N_{раз}, \quad (1.5)$$

где $M_{кр}$ и $N_{кр}$ – момент и продольная сила, при которых происходит потеря устойчивости; $M_{раз}$ и $N_{раз}$ – разрушающий момент и продольная сила.

Теоретическое значение коэффициента продольного изгиба согласно [139] определяется формулой:

$$\phi_m = 0,7 \left(\frac{E_x}{R_u} \right) \frac{b^2}{l_p h} k_\phi \quad (1.6)$$

Критическая сила, определяющая устойчивость элементов при сжатии, может быть определена по известной формуле Эйлера:

$$N_{кр} = \frac{\pi^2 E_x J}{l_0^2}, \quad (1.7)$$

а разрушающая сила по формуле:

$$N_{раз} = R_c A. \quad (1.8)$$

Отсюда:

$$\varphi = \left(\frac{E_x}{R_c} \right) \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2, \quad (1.9)$$

где λ – гибкость элемента.

Как показывают исследования Б.Е. Родина и А.М. Иванова [67], отношение E_x/R_c зависит от влажности древесины и длительности приложения нагрузки (см. рис. 1.4).

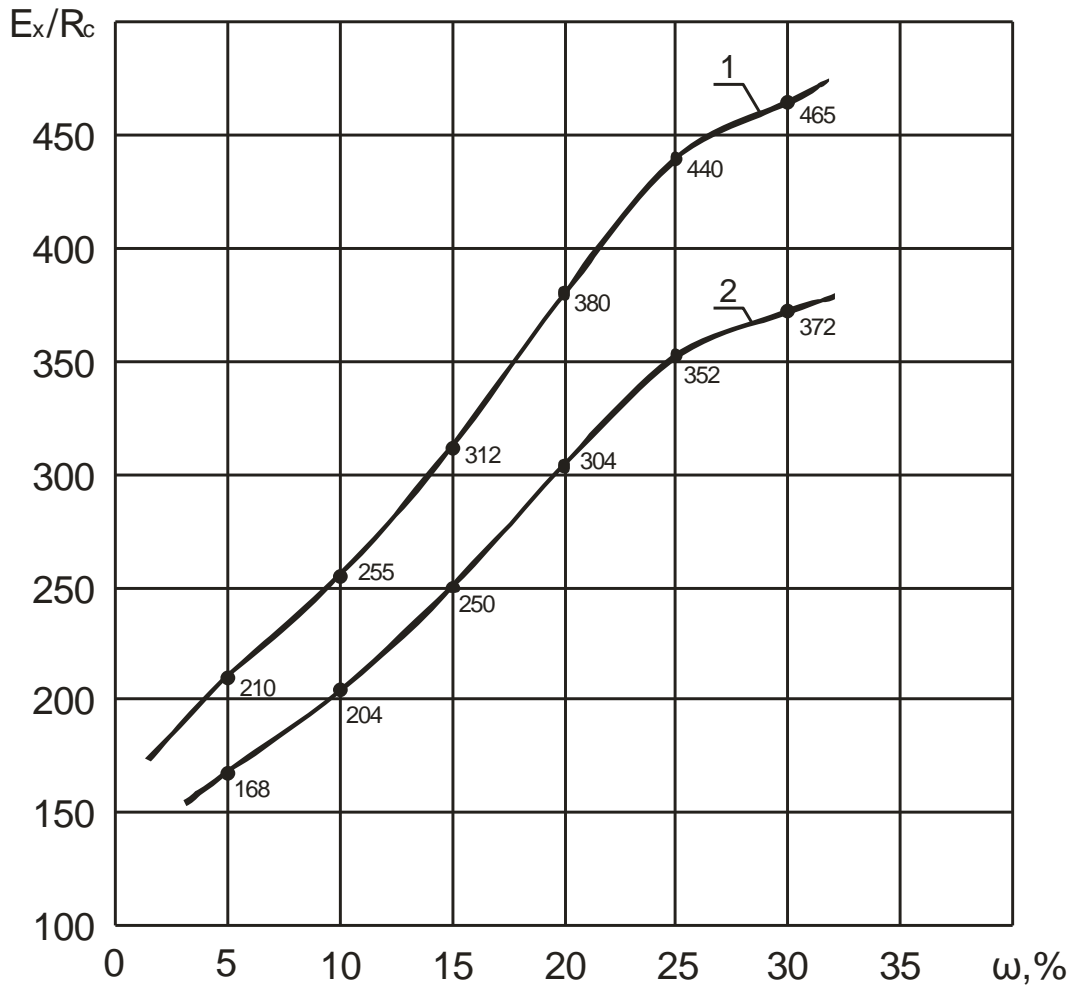


Рисунок 1.4 - Зависимость отношения (E_x/R_c) от влажности ω при кратковременном (1) и длительном приложении нагрузок (2)

Величина критической силы по данным М.Е. Кагана [70] и Л.П. Дроздовой [61] зависит от гибкости элемента и длительности приложения нагрузки (рис. 1.5).

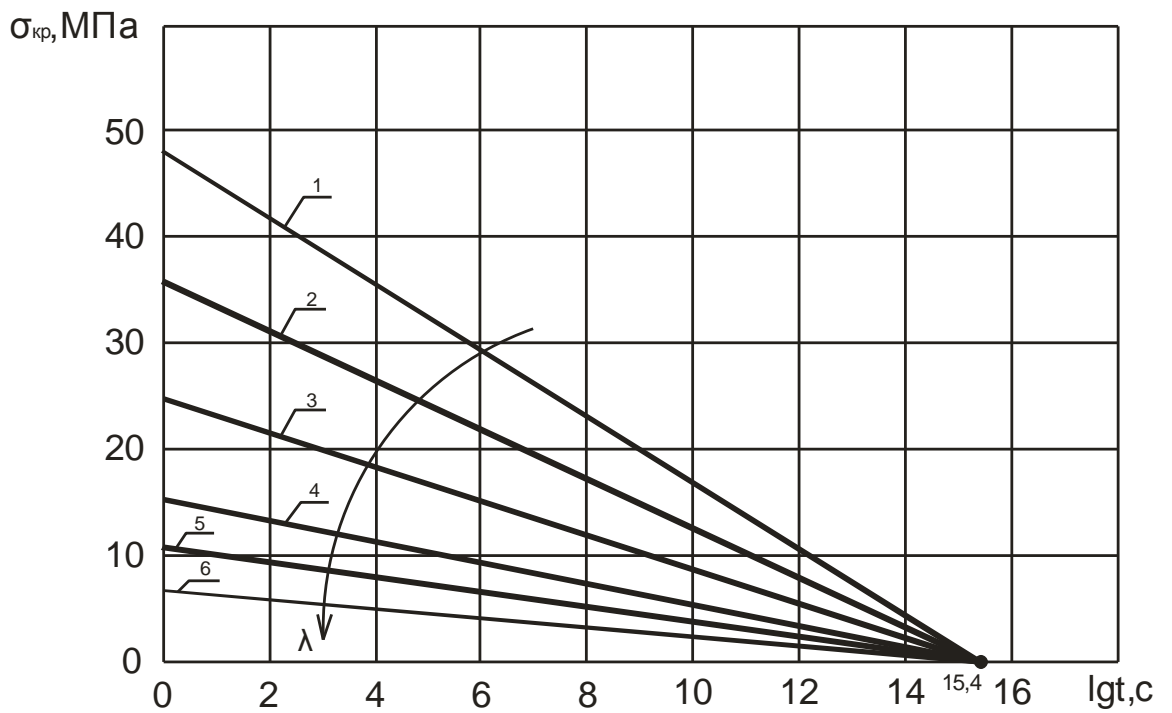
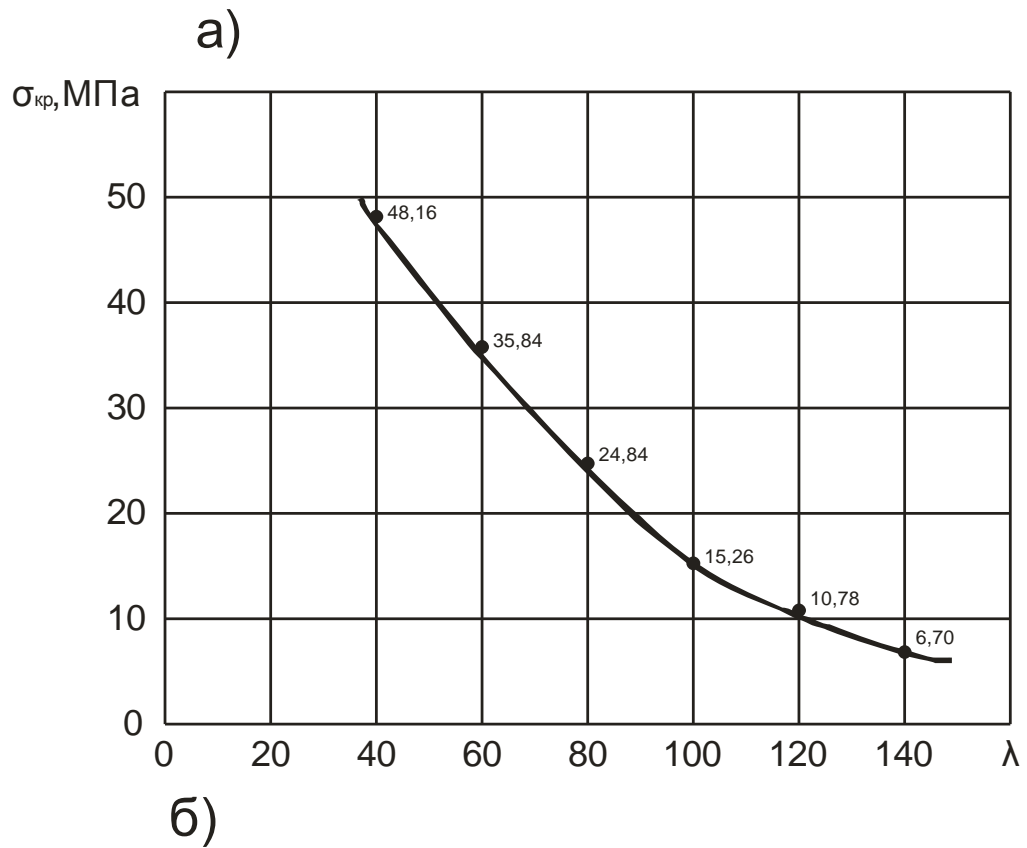


Рисунок 1.5 - Графики зависимости $\sigma_{кр}$ от гибкости элемента λ (а) и длительности приложения нагрузки (б): 1- $\lambda=40$; 2- $\lambda=60$; 3- $\lambda=80$; 4- $\lambda=100$; 5- $\lambda=120$; 6- $\lambda=140$.

Графики на рис. 1.5,б могут быть аппроксимированы уравнением (см. рис. 1.5, б) вида:

$$\sigma_{кр} = a_i - b_i \lg t, \quad (1.10)$$

Значения критических напряжений для различных гибкостей стержня приведены в табл.1.1

Таблица 1.1. Уравнения зависимостей $\sigma_{кр} = f(\lg t)$

Гибкость, λ	Уравнение $\sigma_{кр} (a_i - b_i \lg t)$	$\sigma_{кр}$, МПа
40	$(0,997 - 0,065 \lg t)48,16$	48,16
60	$(0,991 - 0,064 \lg t)35,84$	35,84
80	$(0,994 - 0,064 \lg t)24,86$	24,86
100	$(1,009 - 0,065 \lg t)15,26$	15,26
120	$(1,002 - 0,065 \lg t)10,78$	10,78
140	$(1,000 - 0,064 \lg t)6,70$	6,70

Поскольку в [140] прочность на сжатие и изгиб принимается равной, то можно при определении коэффициента φ_m использовать формулу:

$$\varphi_m = 0,7(E_x/R_c)_\omega k_1 \frac{b^2}{lph} k_\varphi, \quad (1.11)$$

где величину $(E_x/R_c)_\omega$ брать по рис. 1.5 (кривая 1) в зависимости от влажности; $k_1 = 0,8$ - коэффициент, учитывающий длительность приложения нагрузки.

Коэффициент φ с учётом влажности и длительности нагрузки можно определить по формуле:

$$\varphi = \left(\frac{E_x}{R_c} \right)_\omega \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 (1 - 0,064 \lg t), \quad (1.12)$$

где отношение $(E_x/R_c)_\omega$ по рис. 1;

t – время эксплуатации конструкции (или элемента конструкции) (с).

1.3 Применяемые физические методы для расчета прочности и устойчивости деревянных конструкций при кратковременном нагружении

В настоящее время используются различные реологические модели для анализа длительной прочности и устойчивости конструкций из дерева при оценке их силового сопротивления [9-19, 24-28, 36, 57-60, 75]. Эти модели основаны на известных эмпирических зависимостях напряжений и деформаций древесины. Они отличаются точностью, количеством учитываемых различных факторов, уровнем эффективности при применении в практических целях и др.

Модель упругого элемента — идеально упругая пружина (рис. 1.6, а), в которой процесс деформации происходит мгновенно и подчиняется закону Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1.13)$$

где E - модуль упругости.

На рисунке 1.6, б изображен график зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$; а на рисунке 1.6 (в) — графики зависимости $\varepsilon = f(t)$ в изотоническом и $\sigma = f(t)$ в изометрическом режимах. Изотонический режим – это изменение деформации при постоянной нагрузке (ползучесть), а изометрический режим – это изменение напряжения при постоянной деформации (релаксация).

Эта модель не может описать присущие древесине и наблюдающиеся в экспериментах вязкие свойства.

Модель вязкого элемента — поршень с отверстиями, движущийся в цилиндре с вязкой жидкостью (рис. 1.7, а).

При движении поршня жидкость протекает через отверстия и создает сопротивление, которое растет пропорционально скорости движения поршня. Относительная деформация вязкого элемента пропорциональна времени t действия внешней силы и зависит от напряжения σ и вязкости η жидкости:

$$\varepsilon = \frac{\sigma \cdot t}{\eta} \quad (1.14)$$

Но эта модель полностью вязкого тела не описывает упругие свойства.

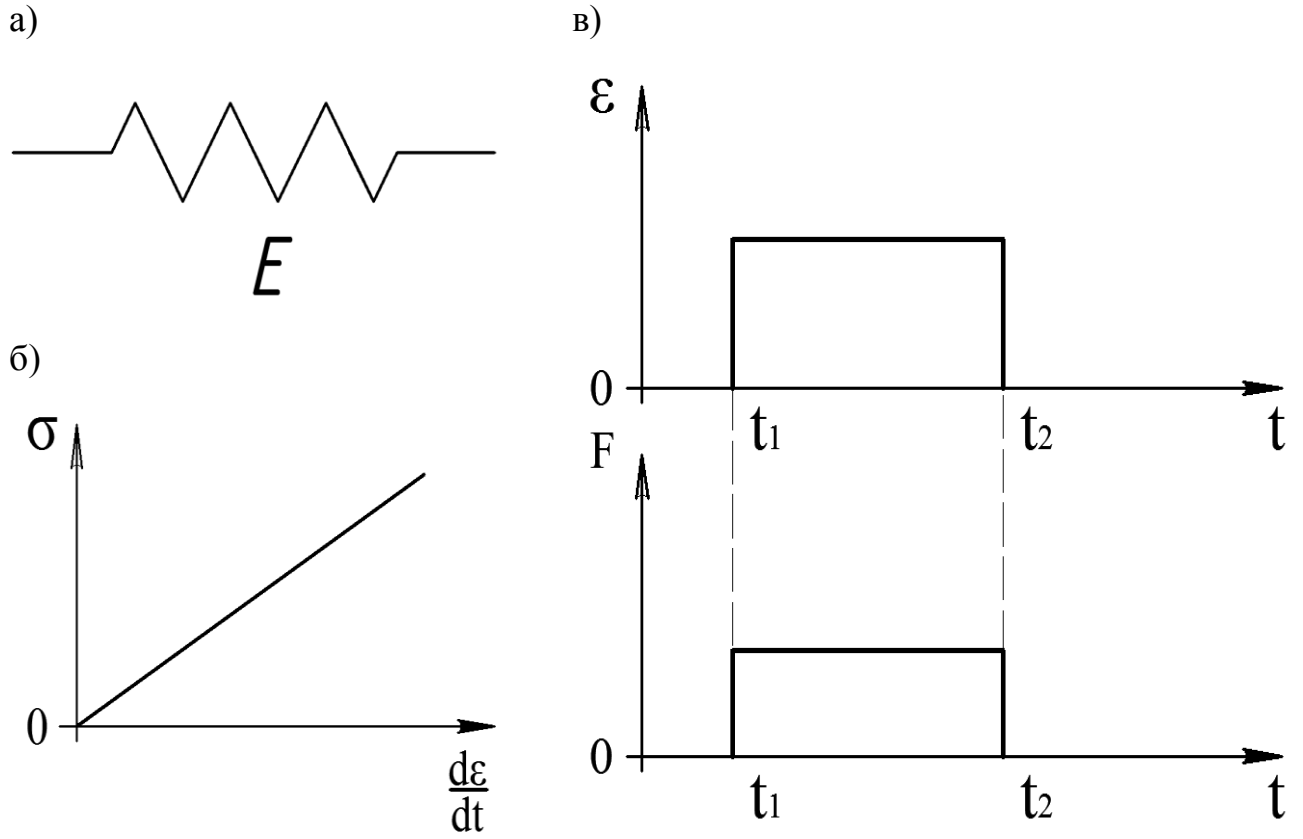


Рисунок 1.6 - Модель упругого элемента

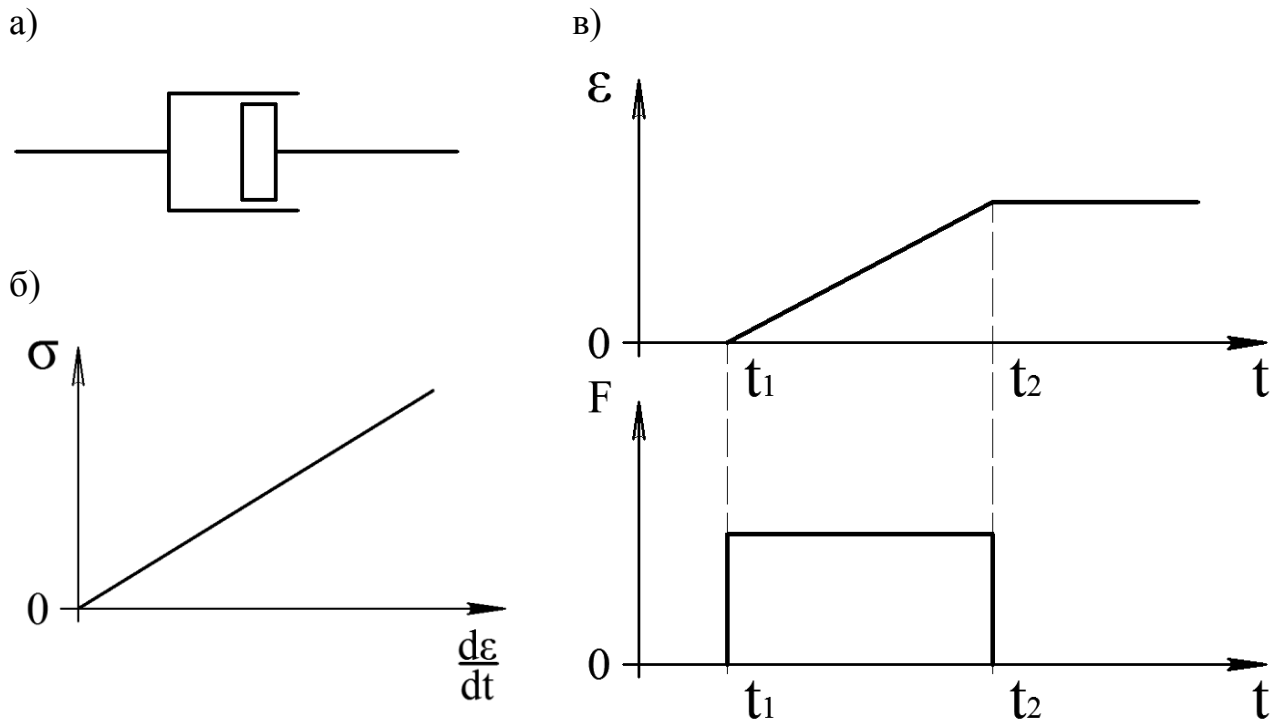


Рисунок 1.7 - Модель вязкого элемента

В связи с тем, что древесине присущи упругие и вязкие деформации, то вязкоупругие свойства древесины моделируются системами, состоящими из различных комбинаций моделей упругого и вязкого элементов. Наиболее простой моделью, отвечающей этому требованию, является модель Максвелла, в которой последовательно соединены упругий и вязкий элементы (рис. 1.8). При использовании этой модели деформация конструкции состоит из суммы деформаций упругого и вязкого элементов, недостатком данной модели является невозможность учесть сдвиговые деформации. В этой модели также нельзя учесть возникающее запаздывание деформаций в древесине. Поэтому независимо друг от друга Кельвиным и Фойгтом для вязкоупругих тел была предложена модель с параллельным соединением пружины и поршня (модель Кельвина –Фойгта) (рис. 1.9), которая позволяет учесть запаздывание упругих деформаций.

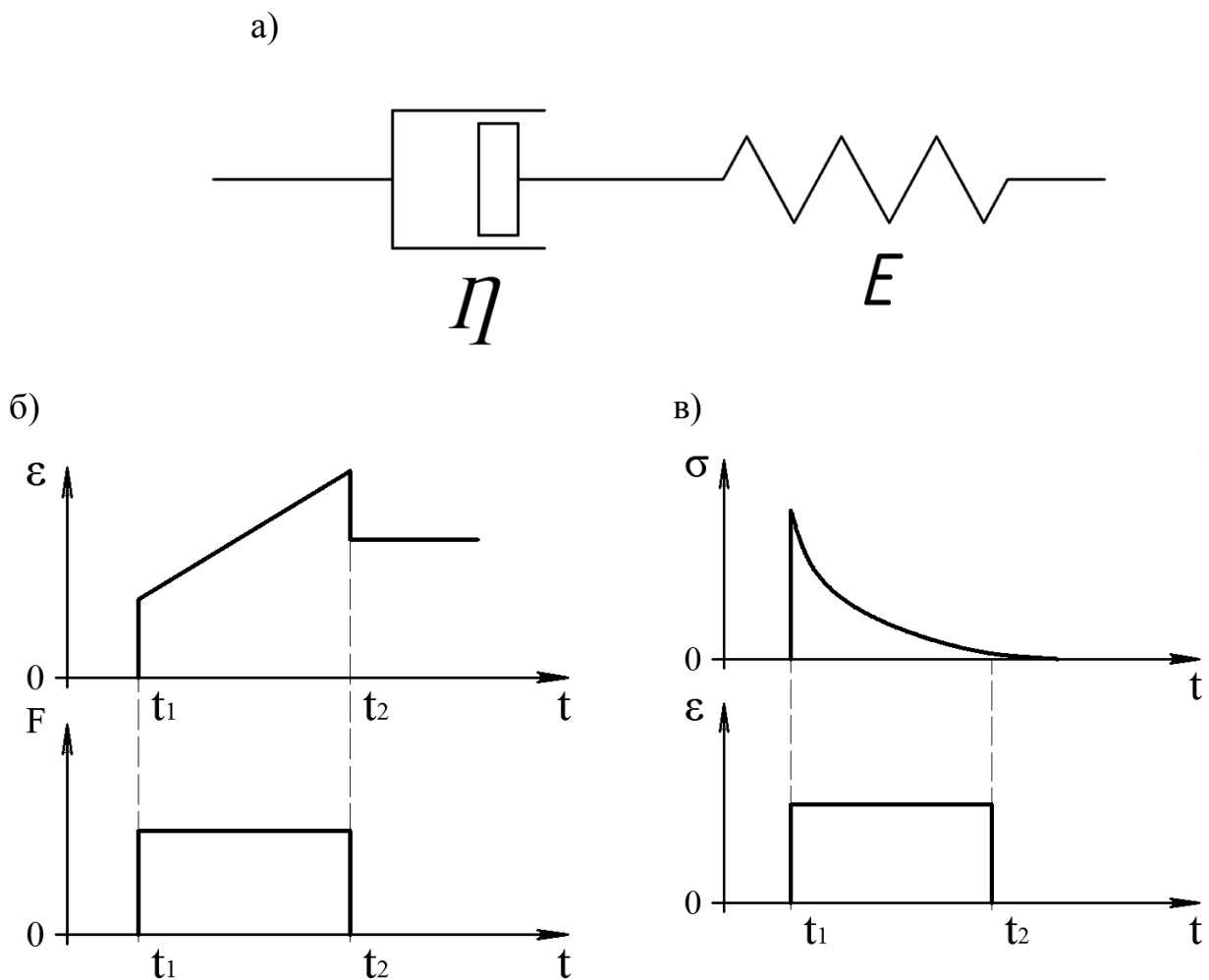
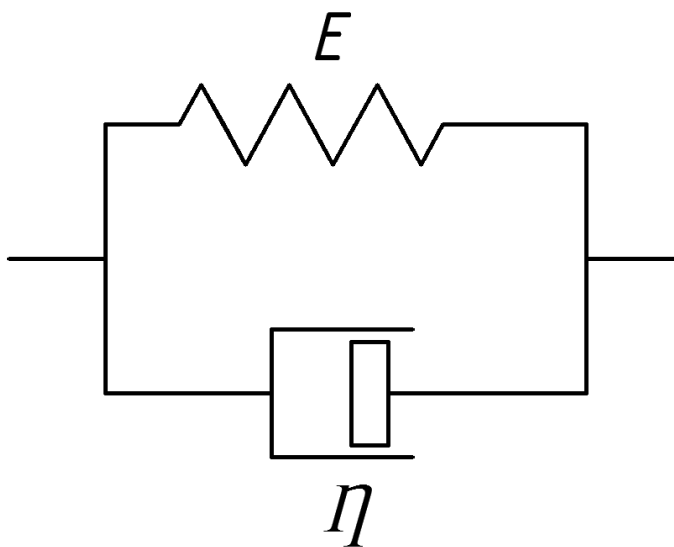


Рисунок 1.8 - Модель Максвелла

В изотоническом режиме (рис. 1.9, б) пружина мгновенно удлиняется (момент времени t_1) до значения, определяемого законом Гука, а поршень движется с постоянной скоростью до тех пор, пока действует постоянная внешняя сила. После снятия нагрузки (момент времени t_2) пружина мгновенно сокращается, а положение поршня остается неизменным. В изометрическом режиме (рис. 1.9, в) пружина после быстрого растяжения начинает сокращаться, вытягивая при этом поршень, т. е. происходит релаксация напряжения.

а)



б)

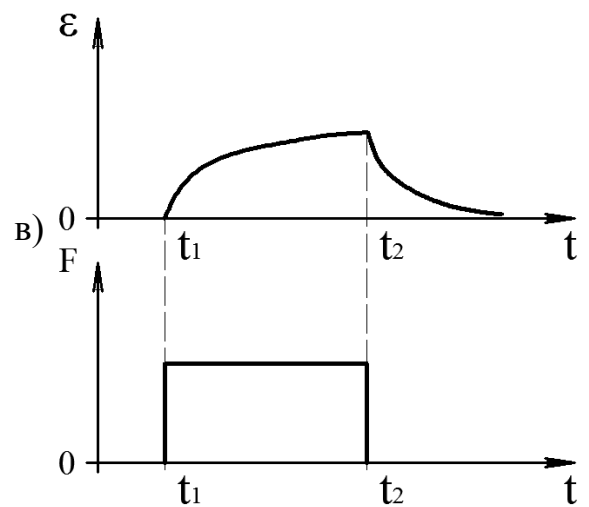


Рисунок 1.9 - Модель Кельвина-Фойгта

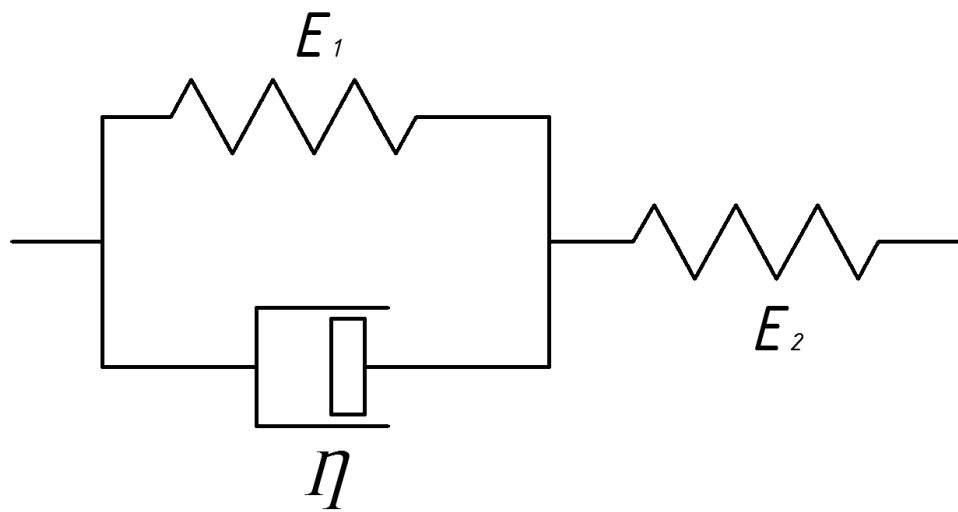
Однако реальные деревянные конструкции редко следуют этим двум моделям. Поэтому существуют другие модели, в основном основанные на комбинациях моделей Максвелла и Кельвина – Фойгта.

Модель Зинера — последовательное соединение моделей Кельвина — Фойгта и упругого элемента (рис. 1.10, а).

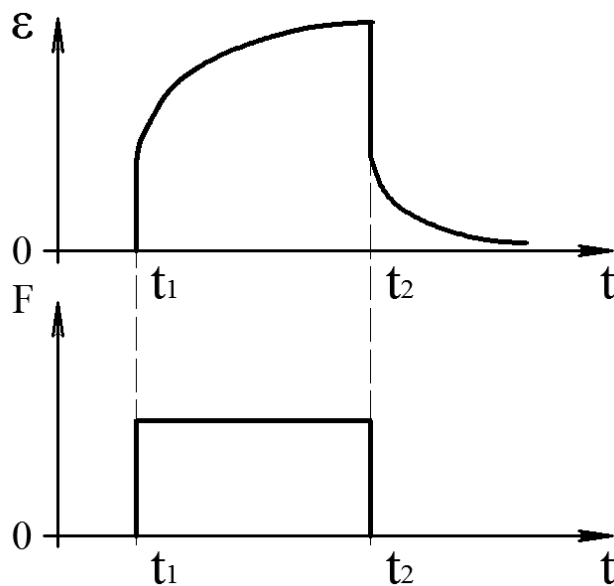
В изотоническом режиме (рис. 1.10, б) пружина 1 мгновенно удлиняется до значения, определяемого законом Гука, а пружина 2 удлиняется постепенно по мере вытягивания поршня и ее удлинение имеет нелинейный характер. После прекращения действия внешней постоянной силы пружина мгновенно сокращается, пружина 2 сокращается постепенно, втягивая поршень в обратном направлении. Таким образом, после снятия нагрузки в модели не сохраняется

остаточная деформация. Зависимость деформации от времени имеет сложный характер: она определяется начальным напряжением, модулями упругости пружин 1 и 2 и вязкостью системы. В изометрическом режиме (рис. 1.10, в) в пружине 1 мгновенно создается напряжение σ_0 , затем напряжение убывает по экспоненциальному закону, так как происходит постепенное вытягивание поршня и растяжение пружины 2. После прекращения деформации напряжение резко падает до некоторой величины (сокращается пружина 1), а затем плавно убывает до нуля.

а)



б)



в)

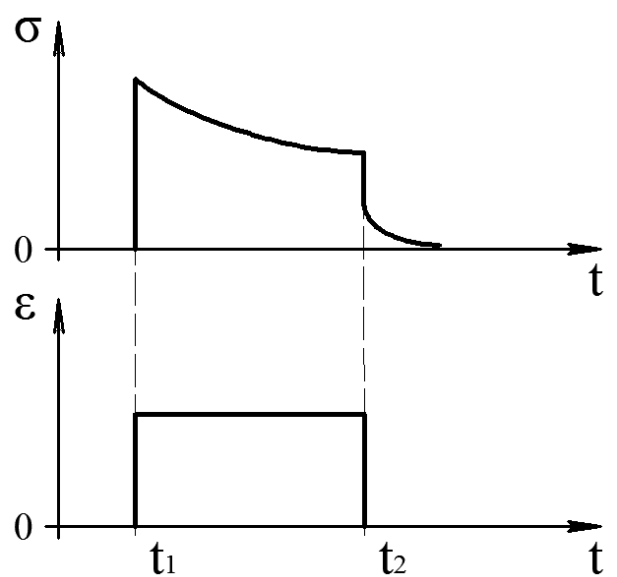


Рисунок 1.10 - Модель Зинера

В то же время отсутствуют расчетные модели и данные экспериментальных исследований, позволяющие вести анализ деформирования конструкций из дерева при одновременном проявлении силового сопротивления и изменения свойств атмосферного воздействия. Не менее важным является создание расчетных моделей для анализа устойчивости конструктивных систем с учетом взаимного влияния элементов конструктивных систем.

Учитывая определенную сложность в решении такой задачи необходимо создать простейшие реологические модели изменения деформационных и прочностных параметров древесины во времени, позволяющие получить достаточно простые аналитические выражения для критериев длительной прочности конструктивных элементов из древесины.

Будем полагать, что относительный дефицит текущего значения исследуемого фактора неравновесного силового сопротивления дерева описывается некоторой функцией, которая инвариантна по отношению ко всем физико-механическим характеристикам этого материала: прочность R , модуль деформации (E), ползучесть $1/c$ и др.

Для построения критерия прочности древесины используем реологическую модель деформирования материала, состоящую из двух последовательно соединенных элементов. Первый элемент соответствует упругой составляющей, а второй – вязкой составляющей (модель Кельвина-Фойгта [81]).

В соответствии с этой моделью предельное значение главной линейной деформации древесины (или интенсивность деформации сдвига Γ_*) ε_{ult} :

$$\varepsilon_{ult} = \varepsilon_0 + \varepsilon_1, \quad (1.15)$$

где ε_0 – деформации соответствующие элементу А используемой физической модели деформирования, характеризующие процесс кратковременного («мгновенного») нагружения, ε_1 – деформации, соответствующие модели Кельвина-Фойгта, последовательно соединяемой с элементом А (рис. 1.9а).

1.4 Цель и задачи диссертации

Из проведенного выше анализа следует, что в области расчета устойчивости равновесия конструкций накоплен большой теоретический материал по расчету отдельных стержней из древесины и конструктивных систем из них, в меньшей степени, представлены методы расчета указанных конструкций во времени и при воздействии переменной влажности. С этих позиций 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 сформулированной цели поставлены следующие задачи:

1. Построение определяющих уравнений длительной прочности и предельного значения критической силы сжатого стержня на основе реологической модели режимного нагружения древесины;
2. Разработка критерия длительной устойчивости сжатого стержня из древесины при совместном проявлении силового воздействия, влажности и времени нагружения;
3. Экспериментальное определение параметров длительной прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности;
4. 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 соседних несущих элементов конструктивной системы.

2. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ПРОЯВЛЕНИИ СИЛОВЫХ И ВЛАЖНОСТНО- ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

2.1 Общие замечания. Исходные гипотезы

В настоящее время используются различные реологические модели для анализа длительной прочности и устойчивости конструкций из дерева при оценке их силового сопротивления. Они отличаются точностью, количеством учитываемых различных факторов, уровнем эффективности при применении в практических целях и др. В то же время, на сегодняшний день отсутствуют расчетные модели и данные экспериментальных исследований, позволяющие вести анализ деформирования конструкций из дерева при одновременном проявлении силового сопротивления и изменения свойств атмосферного воздействия. Не менее важным является создание расчетных моделей для анализа устойчивости конструктивных систем с учетом взаимного влияния элементов конструктивных систем.

Учитывая определенную сложность в решении такой задачи, необходимо создать простейшие реологические модели изменения деформационных и прочностных параметров древесины во времени, позволяющие получить достаточно простые аналитические выражения для критериев длительной прочности конструктивных элементов из древесины.

Используя гипотезу о феноменологическом единообразии кинетики неравновесных процессов повреждений и развития деформаций в нелинейно-упругих телах, будем полагать, что она распространяется и на процессы потери устойчивости деревянных стержневых элементов и конструктивных систем из них при влиянии силового нагружения и переменной влажности.

Неравновесные процессы силового сопротивления древесины, эволюционирующие во времени, могут иметь разное происхождение – силовое и несиловое. Формы их проявления сходны, а поэтому они поддаются единообразному математическому описанию.

Это обстоятельство оказывается существенным при поиске и построении исходных базовых обобщений, требуемых для решения прикладных задач конструктивной безопасности и живучести сооружений.

В частности, исходя из существования критических величин накопившихся во времени неравновесных деформаций или средовых повреждений введено соотношение [30]:

$$\frac{d[\Delta L(i, t_0)]}{dt} = -\alpha \cdot [\Delta L(t, t_0)]^m, \quad (2.1)$$

где

$$\Delta L(t, t_0) = \frac{L_{\text{пр}} - L(t, t_0)}{L_{\text{пр}}} \quad (2.2)$$

в частности,
$$\Delta L(t, t_0) = \frac{L_{\text{пр}} - L(t_0, t_0)}{L_{\text{пр}}}.$$

Здесь ΔL – относительный дефицит текущего значения исследуемого фактора неравновесного силового сопротивления $L(t, t_0)$ по отношению к его предельному значению $L_{\text{пр}}$;

t, t_0 – текущее время наблюдения, время начала наблюдения;

α – эмпирический параметр скорости изменения ΔL ;

m – эмпирический параметр нелинейной связи между значениями дефицита ΔL и скоростью его изменения во времени.

Обозначим $\Delta L(t, t_0) = f(t)$. Уравнение (2.1) примет вид:

$$\frac{df}{dt} = -\alpha f^m. \quad (2.3)$$

Или после разделения переменных:

$$\frac{df}{f^m} = -\alpha dt. \quad (2.4)$$

Решая это уравнение, получим:

$$\Delta L(t, t_0) = \sqrt[m-1]{\alpha(m-1)t + D}, \quad (2.5)$$

где D – начальное значение ΔL при $t = t_0$.

Поскольку исходная зависимость (2.1) предполагает постоянство режимных, термодинамических и физико-химических факторов внешних воздействий, $L_{пр}$, α , t_0 – постоянные величины, а m – скачкообразно изменяющийся параметр времени t .

Резюмируя изложенное, при построении критериев и расчетных зависимостей для анализа устойчивости стержневых элементов и конструктивных систем из них при силовом нагружении и переменной влажности, будем использовать следующие 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 $1/\epsilon$ 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;

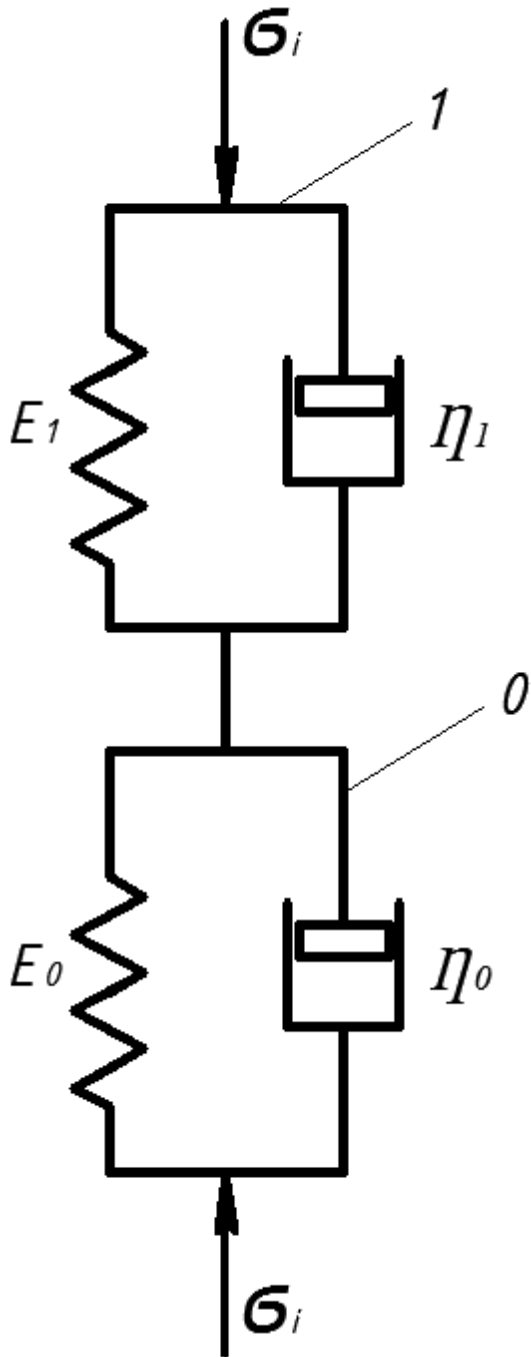
- изменение прочностных и деформационных характеристик в расчетных сечениях конструктивной системы определяется на основе деформационной модели однородного сложного напряженно-деформированного состояния Г.А. Гениева.

2.2 Физическая модель, расчетная схема и разрешающие уравнения устойчивости центрально сжатых стержней из древесины

Для построения критерия прочности древесины используем реологическую модель деформирования материала, предложенную Г.А. Гениевым [51], состоящую из двух последовательно соединенных моделей Кельвина-Фойгта (рис. 2.1, а). Элементы 0 и 1 предназначены для аналитического описания развития кратковременных и длительных деформаций материала соответственно. Жесткость вязкого элемента 0 на несколько порядков меньше жесткости вязкого

элемента 1: $\eta_0 \ll \eta_1$. В связи с этим при определении длительной прочности в данной работе используем следующую модификацию модели Г.А. Гениева: исключаем из элемента 0 его вязкую составляющую (рис. 2.1, б).

а)



б)

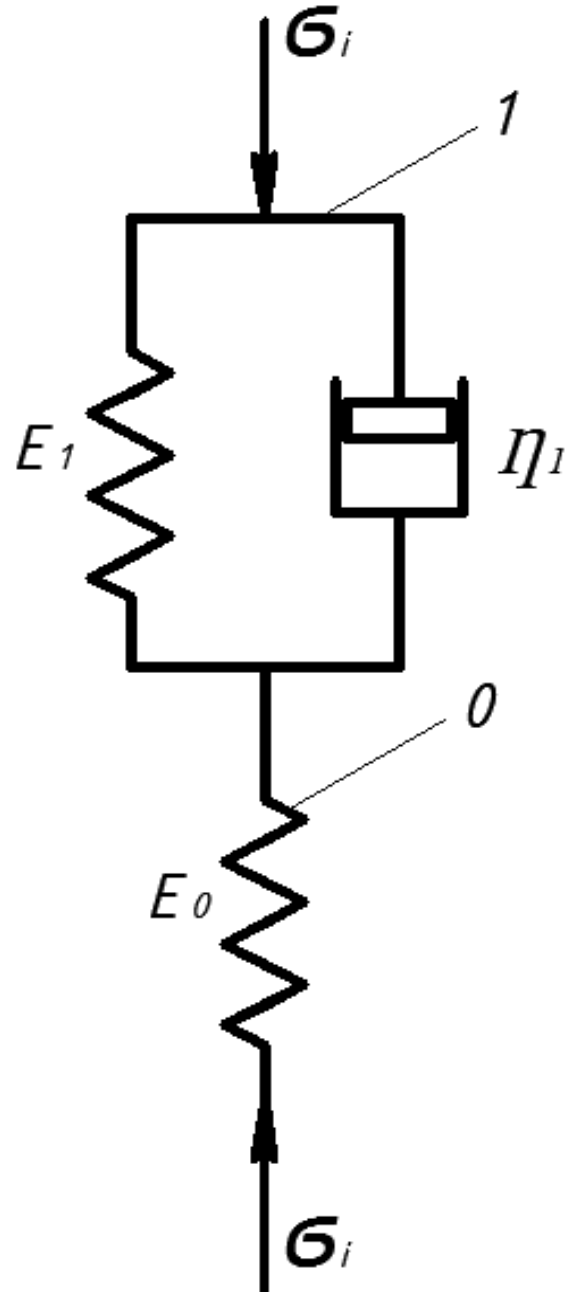


Рисунок 2.1 – Схема реологической модели анизотропного материала Г.А. Гениева (а) и ее модификация (б)

В соответствии с этой моделью предельное значение главной линейной деформации древесины (или интенсивность деформации сдвига Γ) ε_{ult} :

$$\varepsilon_{ult} = \varepsilon_0 + \varepsilon_1, \quad (2.6)$$

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 (рис. 2.1, б).

При использовании представленного критерия прочности древесины определяющее уравнение ее длительной прочности при $\sigma = \text{const}$ записывается в виде [49]:

$$\varepsilon \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma}{R}}\right) + \frac{\sigma}{E} \cdot (1 - \exp(-\omega \cdot t)) = \varepsilon_{ult}, \quad (2.7)$$

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 $\sigma = \text{const}$. Уравнение (2.7) позволяет найти либо длительную прочность древесины σ при заданном критическом времени $t = t_{кр.}$, либо наоборот определить $t_{кр.}$ по заданному значению σ .

В том случае, если при активном нагружении напряжение возрастает по произвольному закону во времени $\sigma = \sigma(t)$ значение ε_1 в зависимости (2.5) определяется выражением:

$$\varepsilon_1 = K^{-1} \cdot e^{-\omega \cdot t} \int_0^t \sigma \cdot e^{\omega t} dt. \quad (2.8)$$

В (2.7) и (2.8) 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 (2.8) найдем значение ε_1 :

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E} \cdot (1 - e^{-\omega t}). \quad (2.9)$$

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

При аппроксимации нелинейной зависимости мгновенной (кратковременной) деформации квадратной параболой напряжение σ определяется из выражения [49]:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{\text{ult}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma_{\text{ult}}}{R}}\right), \quad (2.10)$$

где предельное значение деформации $\varepsilon_{\text{ult}} = \frac{2 \cdot R}{E_0}$, E_0 – начальный модуль упругости древесины, соответствующий точке $\sigma = 0$ (рис. 2.2).

В расчетах принято уменьшенное значение модуля деформации древесины с учетом ее ползучести $E = 0,75 \cdot E_0$. Это соотношение принято Е.Н. Квасниковым [74] при формировании математической модели с учетом экспериментальных данных. Помножим правую часть формулы (2.9) на $\frac{2 \cdot R}{2 \cdot R}$, получим:

$$\varepsilon_1 = \frac{2 \cdot R \cdot \sigma}{2 \cdot R \cdot 0,75 \cdot E_0} \cdot (1 - e^{-\omega t}). \quad (2.11)$$

Для количественного анализа длительной прочности деревянного сжатого стержня преобразуем зависимость (2.11) следующим образом: обозначим $\varphi_{\text{ult}} = \frac{\sigma_{\text{ult}}}{R}$, $\varepsilon_{\text{ult}} = \frac{2 \cdot R}{E_0}$, для деформаций ε_1 получим:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{\text{ult}} \cdot \varphi_{\text{ult}}}{1,5} \cdot (1 - e^{-\omega t}). \quad (2.12)$$

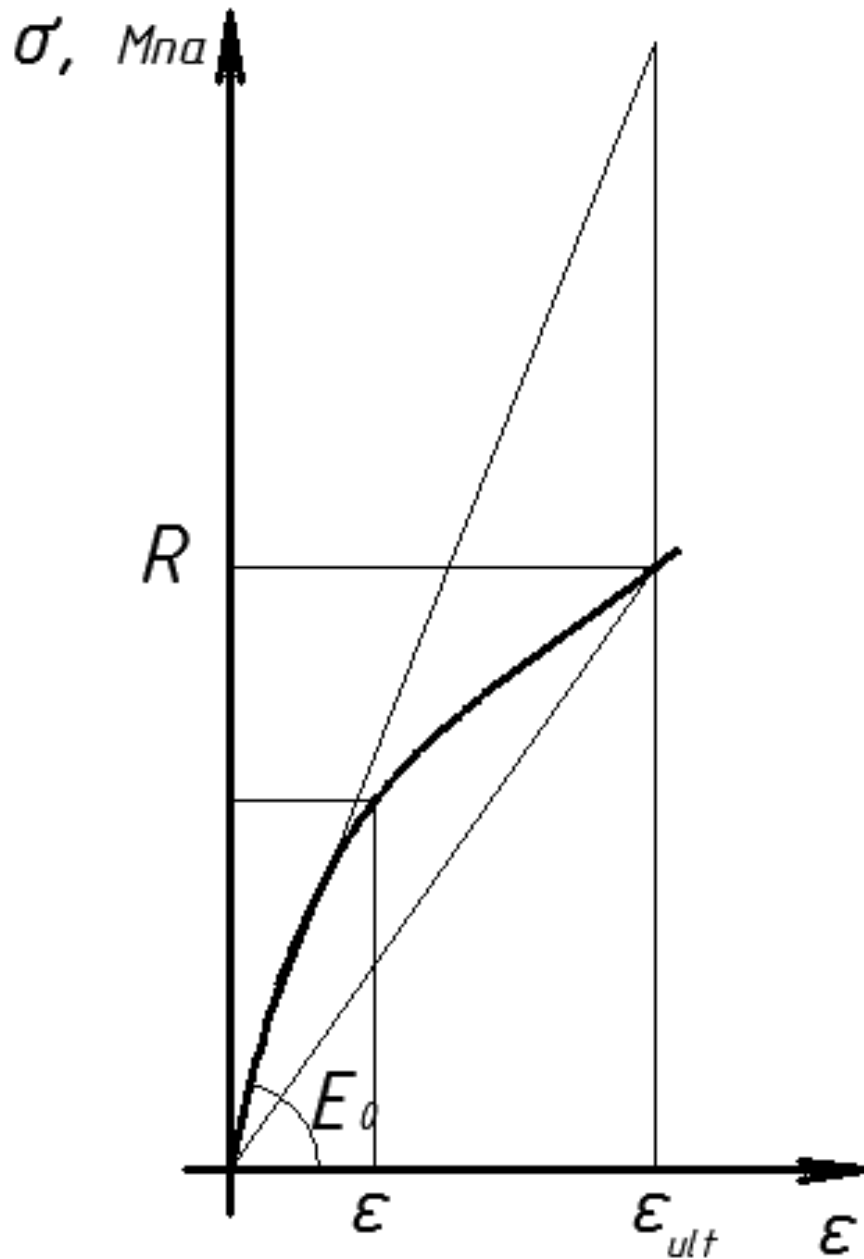


Рисунок 2.2 –Общая физическая модель деформирования древесины

Подставив (2.10), (2.12) в (2.6) получим:

$$\varepsilon_{ult} = \frac{\varepsilon_{ult} \cdot \varphi_{ult}}{1,5} \cdot (1 - e^{-\omega \cdot t}) + \varepsilon_{ult} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma_{ult}}{R}}\right), \quad (2.13)$$

разделив левую и правую части уравнения (2.13) на ε_{ult} и заменив $\frac{\sigma_{ult}}{R}$ на φ_{ult} , получим:

$$1 = \frac{\varphi_{ult}}{1,5} \cdot (1 - e^{-\omega \cdot t}) + \left(1 - \sqrt{1 - \varphi_{ult}}\right). \quad (2.14)$$

После преобразований выражение (2.14) запишем в виде:

$$\frac{\varphi_{ult}}{1,5} \cdot (1 - e^{-\omega \cdot t}) - \sqrt{1 - \varphi_{ult}} = 0, \quad (2.15)$$

обозначив $A = (1 - e^{-\omega \cdot t})$ и произведя соответствующие преобразования, получим:

$$\frac{\varphi_{ult}}{1,5} \cdot A = \sqrt{1 - \varphi_{ult}}. \quad (2.16)$$

Возведем обе части выражения (2.16) в квадрат, запишем его в виде квадратного уравнения относительно φ_{ult} :

$$\frac{A^2}{2,25} \cdot \varphi_{ult}^2 + \varphi_{ult} - 1 = 0. \quad (2.17)$$

Отсюда значение φ_{ult} :

$$\varphi_{ult} = \frac{-1 \mp \sqrt{1 + 1,7(7) \cdot A^2}}{0,8(8) \cdot A^2}, \quad (2.18)$$

заменив A на $(1 - e^{-\omega \cdot t})$ и произведя соответствующие преобразования, получим:

$$\varphi_{ult} = \frac{-1 \mp \sqrt{1 + 1,7(7) \cdot (1 - e^{-\omega \cdot t})^2}}{0,8(8) \cdot (1 - e^{-\omega \cdot t})^2}. \quad (2.19)$$

Значение ω может быть найдено из анализа экспериментальных данных [74], используя следующее соотношение:

$$\omega = \frac{E_0}{K} = \frac{n^*}{n} \cdot \left(\frac{t}{n}\right)^{n^*-1}, \quad (2.20)$$

где n – время релаксации; n^* – коэффициент, характеризующий нелинейность вязкого сопротивления. Значение n и n^* принимается по экспериментальным данным.

Принимая значение $n=20$ и $n^* = 0,38$ по экспериментальным данным [74], выражение (2.20) запишем в виде:

$$\omega = \frac{0,38}{20} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{-\frac{62}{100}}. \quad (2.21)$$

Проведя математические преобразования, выражение (2.21) запишем в виде:

$$\omega = 0,0913 \cdot t^{-0,62}. \quad (2.22)$$

Выражение (2.19) запишем с учетом (2.22):

$$\varphi_{ult} = \frac{-1 \mp \sqrt{1 + 1,7(7) \cdot (1 - e^{-0,0913 \cdot t^{0,38}})^2}}{0,8(8) \cdot (1 - e^{-0,0913 \cdot t^{0,38}})^2}. \quad (2.23)$$

Учитывая значение константы e , получим:

$$e^{-0,0913 \cdot t^{0,38}} = 0,913 t^{0,38}. \quad (2.24)$$

Выражение (2.23) с учетом (2.24) запишем в виде:

$$\varphi_{ult} = \frac{-1 \mp \sqrt{1 + 1,7(7) \cdot (1 - 0,913 t^{0,38})^2}}{0,8(8) \cdot (1 - 0,913 t^{0,38})^2}. \quad (2.25)$$

С учетом того, что $\varphi_{ult} = \frac{\sigma_{ult}}{R}$ из выражения (2.25) определим σ_{ult} :

$$\sigma_{ult} = \frac{R \cdot [-1 \mp \sqrt{1 + 1,7(7) \cdot (1 - 0,913 t^{0,38})^2}]}{0,8(8) \cdot (1 - 0,913 t^{0,38})^2}, \quad (2.26)$$

Для иллюстрации зависимости (2.26) на рисунке 2.3 приведен график зависимости критического времени $t_{кр.}$ от заданного значения напряжений σ .

Из рисунка 2.3 видно, что значение критического времени $t_{кр.}$ довольно резко уменьшается при значениях напряжений от $\sigma = R$ до $\sigma = 0,8 \cdot R$ и далее экспоненциально стремится к значению $\sigma = 0,7 \cdot R$. При значении напряжений центрально сжатого стержня из древесины менее $\sigma = 0,7 \cdot R$ указанный фактор перестает оказывать влияние на значение критического времени, т.е. $t \rightarrow \infty$.

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 определения σ_{ult} , подставим в формулу (2.8) значение $t=\infty$, заменив E на $0,75 \cdot E_0$, обозначив $\varepsilon_{ult} = \frac{2 \cdot R}{E_0}$, $\varphi_{ult} = \frac{\sigma_*}{R}$, получим:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varphi_{ult} \cdot \varepsilon_{ult}}{1,5}. \quad (2.27)$$

Подставив (2.10) и (2.27) в (2.6), получим квадратное уравнение относительно φ_{ult} , из которого найдем φ_{ult} , а затем σ_{ult} . Для иллюстрации полученных результатов построен график зависимости предельного напряжения от времени (рис. 2.4) по зависимости (2.27).

Из рисунка 2.4 видно, что предельное напряжение довольно резко уменьшается в первые 200 суток и далее экспоненциально стремится к значению $0,7 \cdot \sigma_{ult}$. Через промежуток времени $t=2200$ сут. временной фактор перестает оказывать влияние на предельное значение длительной прочности центрально сжатого стержня из древесины.

Оценку длительной устойчивости для центрально сжатого прямолинейного стержня из древесины выполним, используя формулу Эйлера в следующем виде:

$$P_{кр.} = \frac{v^2 \cdot E \cdot I}{l^2}, \quad (2.28)$$

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

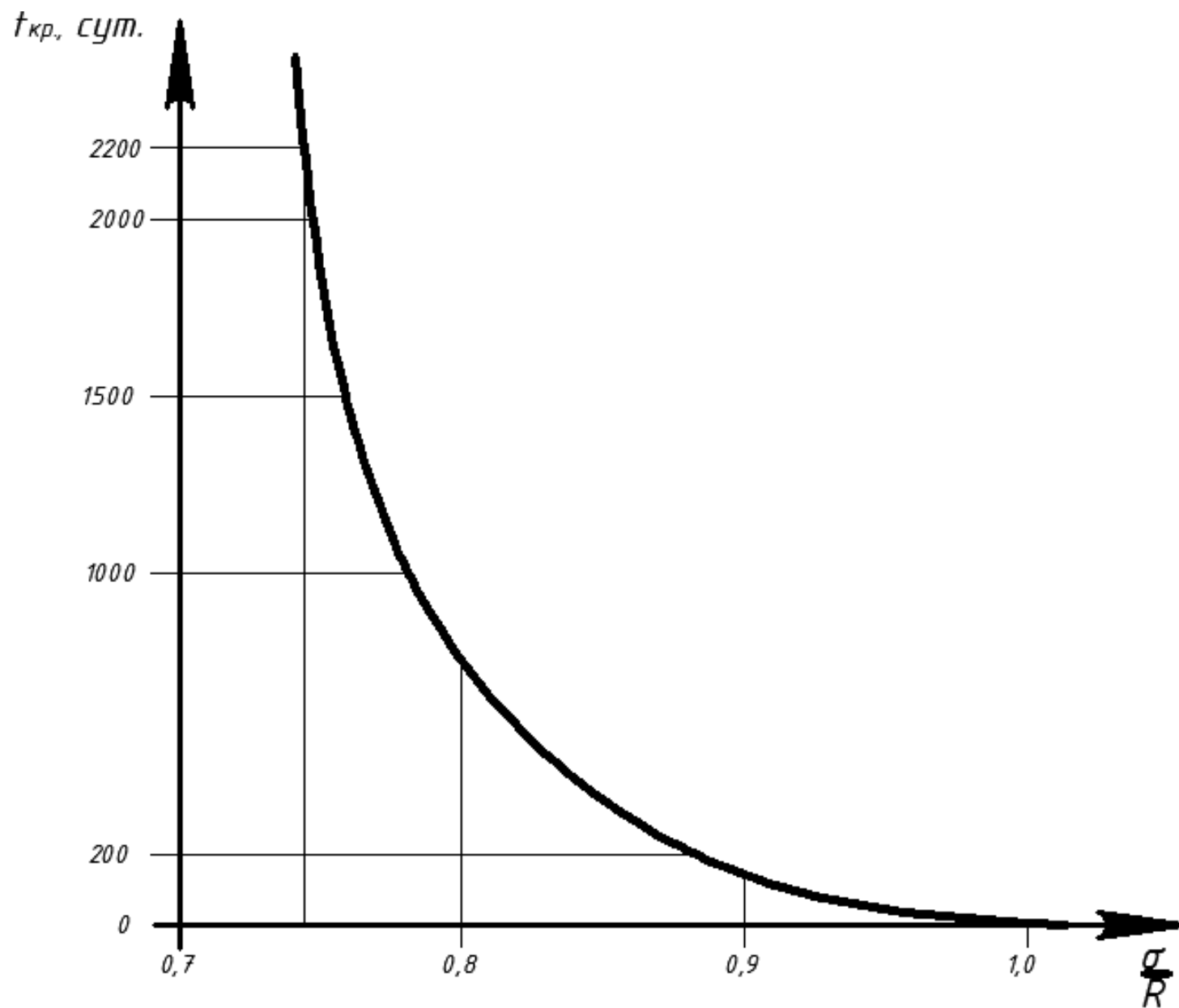


Рисунок 2.3 – График зависимости критического времени $t_{кр}$ от заданного значения напряжений σ

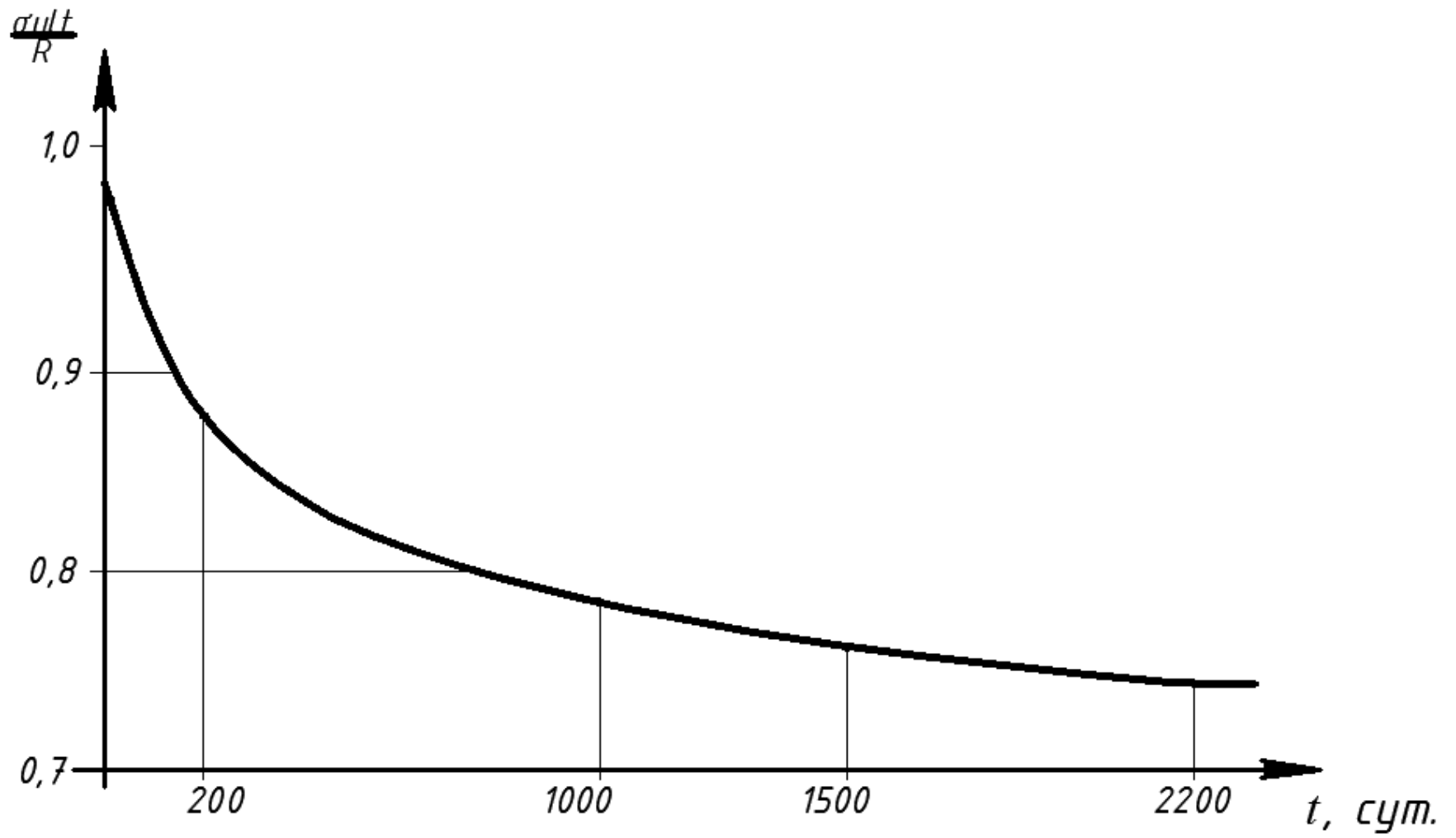


Рисунок 2.4 - График зависимости предельного напряжения от времени

Предельное значение линейного модуля E_1 древесины, при котором сжатый элемент не потеряет устойчивость можно найти, полагая в зависимости (2.7) значение $t = \infty$. Из обозначения $\varepsilon_{ult} = \frac{2 \cdot R}{E_0}$ выразим R :

$$R = \frac{\varepsilon_{ult} \cdot E_0}{2}. \quad (2.29)$$

Аналогично из выражения $\varphi_{ult} = \frac{\sigma_{ult}}{R}$:

$$R = \frac{\sigma_{ult}}{\varphi_{ult}}. \quad (2.30)$$

Приравняв выражения (2.29) и (2.30), получим:

$$\frac{\varepsilon_{ult} \cdot E_0}{2} = \frac{\sigma_{ult}}{\varphi_{ult}}. \quad (2.31)$$

Выразив E_0 из соотношения (2.31), запишем:

$$E_0 = \frac{2 \cdot \sigma_{ult}}{\varphi_{ult} \cdot \varepsilon_{ult}}. \quad (2.32)$$

Подставив выражение (2.32) в (2.28), получим выражение для предельного значения критической силы:

$$P_{кр.} = \frac{\nu^2 \cdot 2 \cdot I}{l^2 \cdot \sigma_{ult} \cdot \varepsilon_{ult}} \cdot \frac{[-1 \mp \sqrt{1 + 1,7(7) \cdot (1 - 0,913t^{0,38})^2}]}{0,8(8) \cdot (1 - 0,913t^{0,38})^2}. \quad (2.33)$$

Для иллюстрации полученных результатов построен график зависимости значения критической силы от времени (рис. 2.5) по зависимости (2.33).

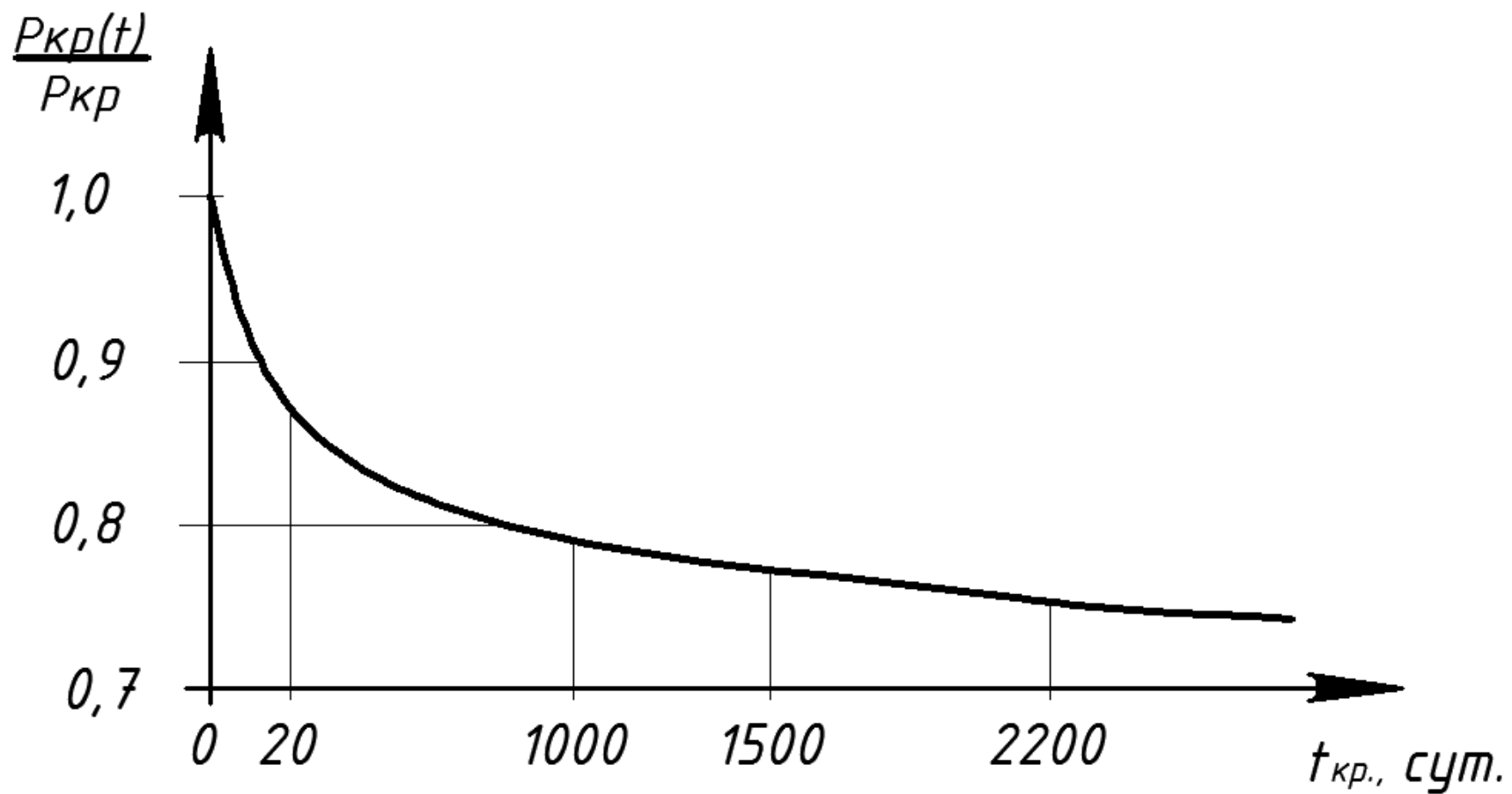


Рисунок 2. 5 – График изменения критической силы центрально-сжатого стержня из древесины во времени

Подставив в формулу (2.32) значение $t=\infty$, получим предельное значение критической силы центрально сжатого стержня из древесины $P_{кр*}$.

Из рисунка 2.4 видно, что предельное значение критической силы довольно резко уменьшается в первые 200 суток и далее экспоненциально стремится к значению $0,7 \cdot P_{кр0}$. Здесь $P_{кр0}$ обозначена критическая сила центрально-сжатого стержня из древесины при $t=0$ сут. Через промежуток времени $t=2200$ сут. временной фактор перестает оказывать влияние на предельное значение критической силы центрально сжатого стержня из древесины.

2.3 Критерий устойчивости стержневого элемента при силовом и средовом нагружениях

Известные расчетные модели не позволяют вести анализ деформирования деревянных конструкций при одновременном проявлении силового сопротивления и изменения параметров атмосферного воздействия. В этой связи рассматривается решение задачи по определению критической силы сжатого стержня из древесины при его длительном нагружении и одновременном учете влажности материала. Учитывая определенную сложность в решении такой задачи для построения аналитических зависимостей использованы простейшие реологические модели, учитывающие изменения деформационных и прочностных параметров древесины во времени, позволяющие получить достаточно простые выражения для критерия длительной устойчивости конструктивных элементов из древесины при одновременном силовом и средовом нагружении. Задача в рассматриваемой постановке о длительной прочности и устойчивости стержней из древесины с использованием модели Кельвина-Фойгта при силовом нагружении была рассмотрена в п. 2.2. В соответствии с этой моделью предельное значение главной линейной деформации древесины ϵ_{ult} определяется по формуле (2.6) и предельное значение критической силы центрально сжатого прямолинейного стержня из древесины – по формуле (2.33).

При эксплуатации реальных конструкций из древесины на значения этих параметров существенное влияние оказывает влажность. В этой связи в настоящей главе сформулирована задача о сохранении потенциала длительной устойчивости стержня во времени под влиянием деградиационного атмосферного воздействия в неравновесной постановке (наложение во времени главной линейной деформации древесины и составляющих деформаций, связанных с влажностью).

Относительная деформация зависит от режима, длительности, уровня нагружения элемента, свойств старения и наследственности материалов. Непосредственное использование нелинейного уравнения механического состояния материала в решениях задач строительной механики, как правило, не реализуется в практике проектирования ввиду его громоздкости. С.Е. Фрайфельд [116], исследуя одноосное напряженное состояние, предложил для линейной постановки задачи ввести длительный модуль деформации:

$$E_{\text{дл.}}(t_0, t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t_0, t)}, \quad (2.34)$$

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

Значение деформаций в области линейной ползучести древесины при постоянном напряжении ($\sigma = \text{const}$) могут быть определены в соответствии с предложением Ю.М. Иванова [68] из выражения:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_0) \cdot (1 + b \cdot t^{0,21}), \quad (2.35)$$

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

$$b = \frac{10^{-2}}{0,735 - 0,02086 \cdot W}. \quad (2.36)$$

Для предельного значения главной линейной деформации древесины центрально сжатого прямолинейного стержня из древесины выражение для напряжений, действующих в элементе в момент времени t получено в п. 2.2 (2.26).

Записав уравнение (2.26) относительно σ с учетом принятого по опытным данным значения ω получим:

$$\sigma(t) = \frac{4 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 + 2.25} - 1.5}{2 \cdot (1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2}. \quad (2.37)$$

Подставив полученное значение деформаций древесины (2.37) и напряжений, действующих в момент времени t , для длительного модуля деформаций получим следующее выражение:

$$E_{\text{дл.}}(t_0, t) = \frac{4 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 + 2.25} - 1.5}{2 \cdot (1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 \cdot \varepsilon(t_0) \cdot (1 + b \cdot t^{0.21})}. \quad (2.38)$$

Определив на основе приведенной реологической модели модуль деформации древесины в рассматриваемый момент времени t при заданной влажности древесины w , используя формулу Эйлера в виде (2.28) можно записать выражение для определения предельного значения критической силы:

$$P_{\text{кр.}}(w, t) = \frac{v^2 \cdot I}{l^2} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 + 2.25} - 1.5}{(1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 \cdot \varepsilon(t_0) \cdot (1 + b \cdot t^{0.21})}. \quad (2.39)$$

С использованием полученной зависимости для стержневых элементов из сосны проведен численный анализ изменения параметра $\xi = P_{\text{кр.}}(w, t)/P_{\text{кр.}}$, выражающего отношение значения критической силы с учетом длительности приложения нагрузки и влажности $P_{\text{кр.}}(w, t)$ к критической силе, определяемой при начальном модуле деформации древесины без учета влияния влажности $P_{\text{кр.}}$. Результаты этого анализа представлены на рисунках 2.6, 2.7, где изменение критической силы для центрально сжатого стержня приведены в координатах « $\xi - t$ » и « $\xi - w$ », а также критерия устойчивости сжатых стержней из древесины при влиянии двух факторов в виде поверхности в координатах « $\xi - t - w$ » (рис. 2.8).

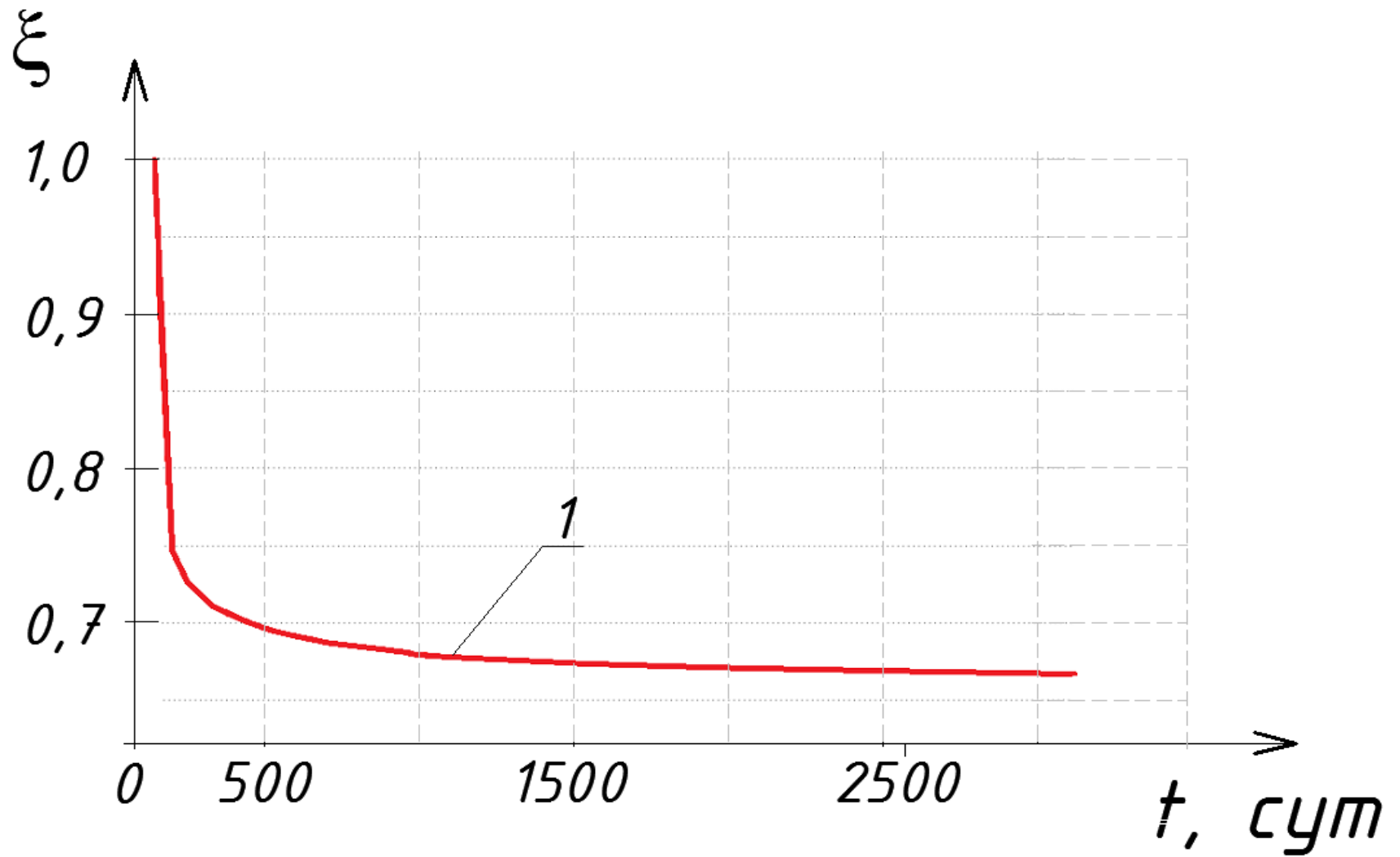


Рисунок 2.6 - График изменения критической силы центрально-сжатого стержня из древесины во времени

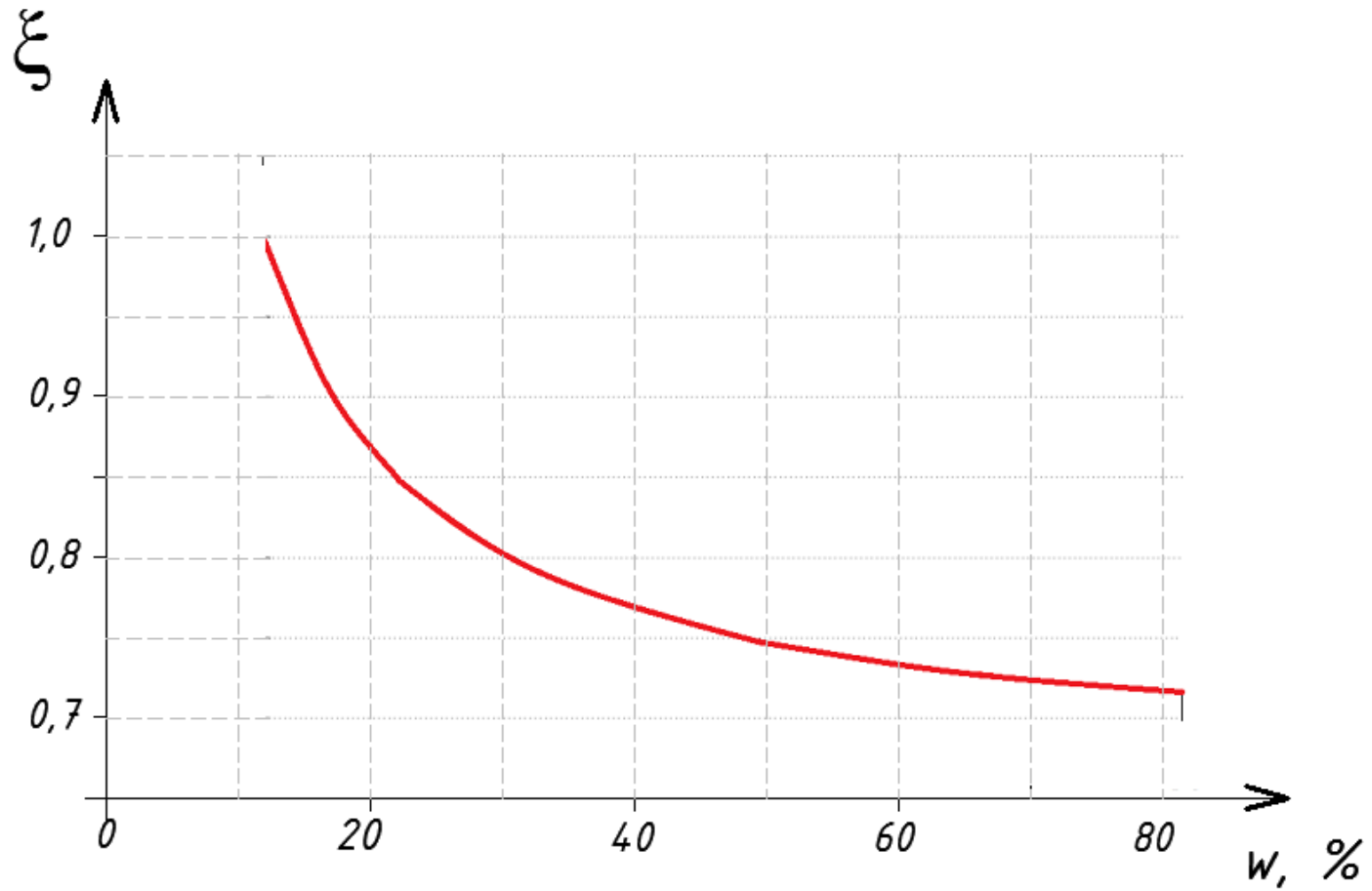


Рисунок 2.7 - График изменения критической силы центрально-сжатого стержня в зависимости от влажности

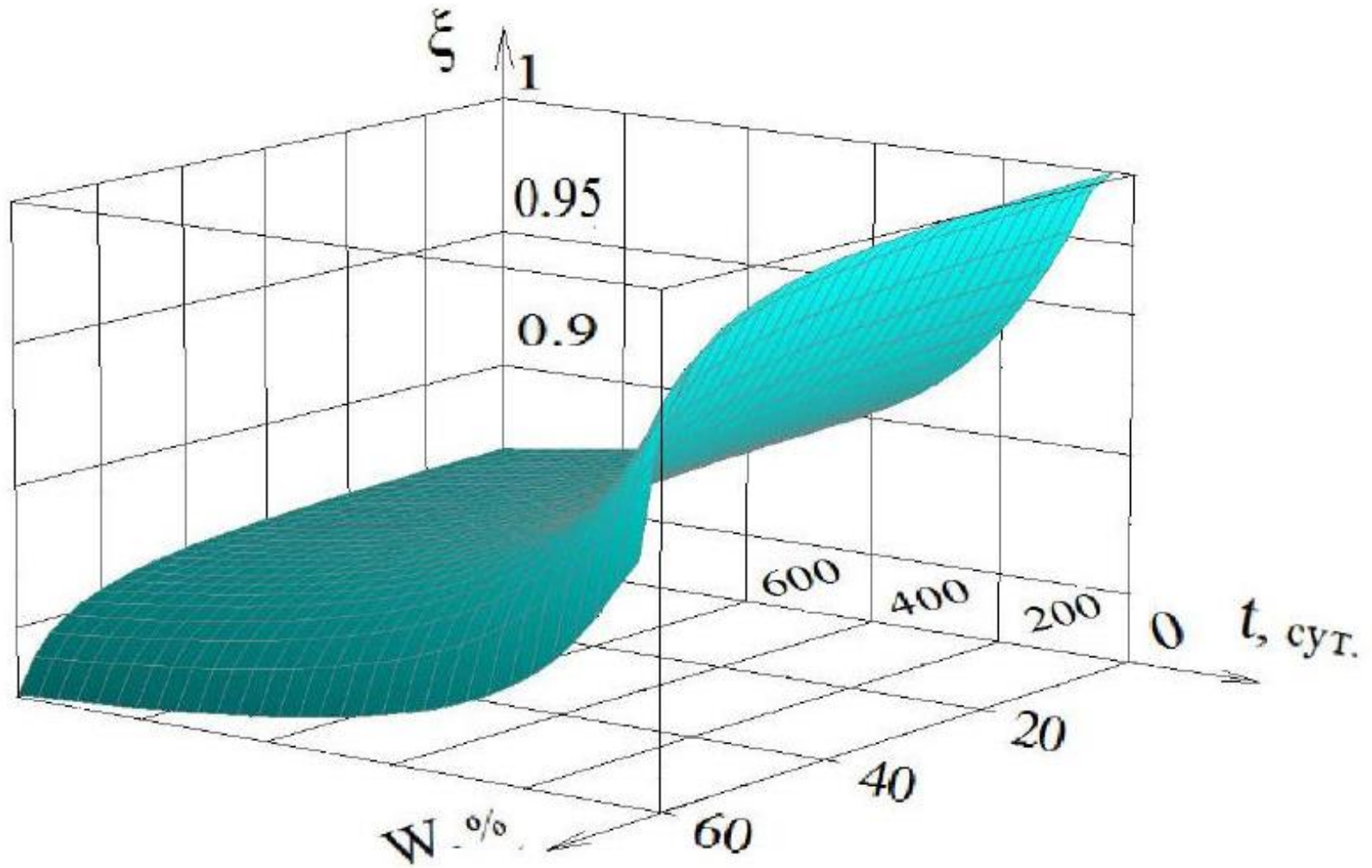


Рисунок 2.8 – Критерий устойчивости сжатых стержней из древесины при влиянии двух факторов в виде поверхности в координатах « ξ - t - w »

Из рисунков видно, что значение критической силы центрально сжатого стержня экспоненциально убывает с увеличением времени до определенного значения ξ_0 , t_0 . Далее график асимптотически приближается к графику функции $\xi = \xi_0$.

С использованием полученной зависимости проведен численный анализ изменения параметра ξ для различных пород дерева. Результаты этого анализа представлены на рисунке 2.9, где изменение критической силы для центрально сжатого стержня приведены в координатах « $\xi - t$ ».

Как видно из рисунка 2.9 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. При этом следует отметить, что изменение значения критической силы с учетом длительности приложения нагрузки в условиях повышенной влажности ($P_{кр.}(w, t)$) прямо пропорционально критической силе, определяемой при начальном модуле деформации древесины ($P_{кр.}$).

У центрально сжатых элементов из дуба в течение первых двух месяцев в условиях повышенной влажности наблюдается увеличение значения критической силы на 3,3 % (см. рис. 2.9). Далее значения $P_{кр.}$ снижается в течение всего исследуемого периода времени на 40 %.

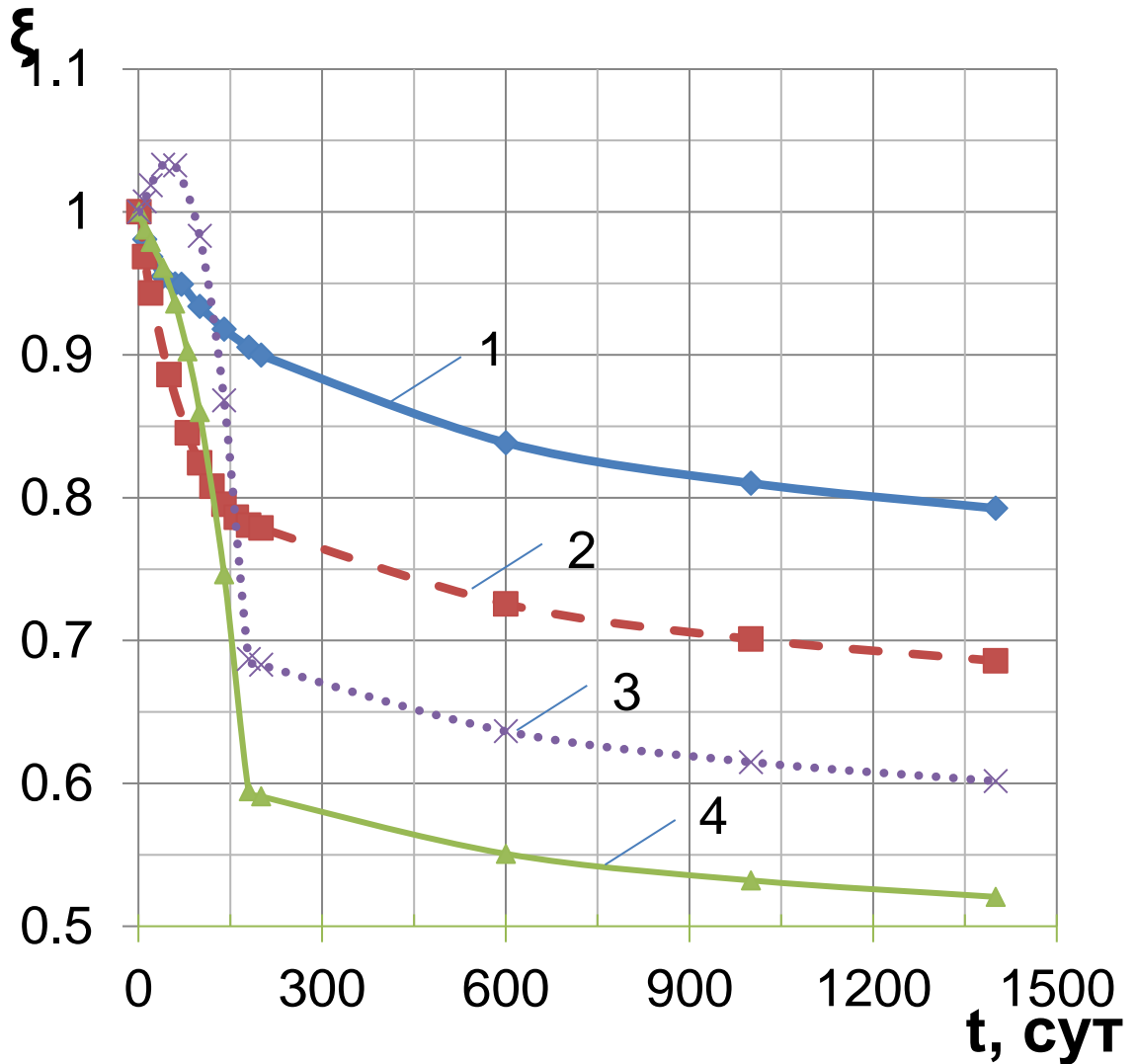


Рисунок 2.9 - График изменения критической силы центрально-сжатого стержня из древесины во времени в условиях повышенной влажности для различных пород древесины: 1 – сосна, 2 – береза, 3 – дуб, 4 - ясень

Далее проведен численный анализ изменения параметра $\theta = ((P_{кр.} - P_{кр.}(w, t)/P_{кр.}) \cdot 100\%)$, т.е. разности значений критической силы, определяемой при начальном модуле деформации древесины ($P_{кр.}$), и критической силы с учетом длительности приложения нагрузки в условиях повышенной влажности ($P_{кр.}(w, t)$) по отношению к $P_{кр.}$, в зависимости от значения $P_{кр.}$, приведенного к критической силе для центрально сжатых элементов из сосны ($(\eta = (P_{кр.} - P_{кр.}^c/P_{кр.}))$).

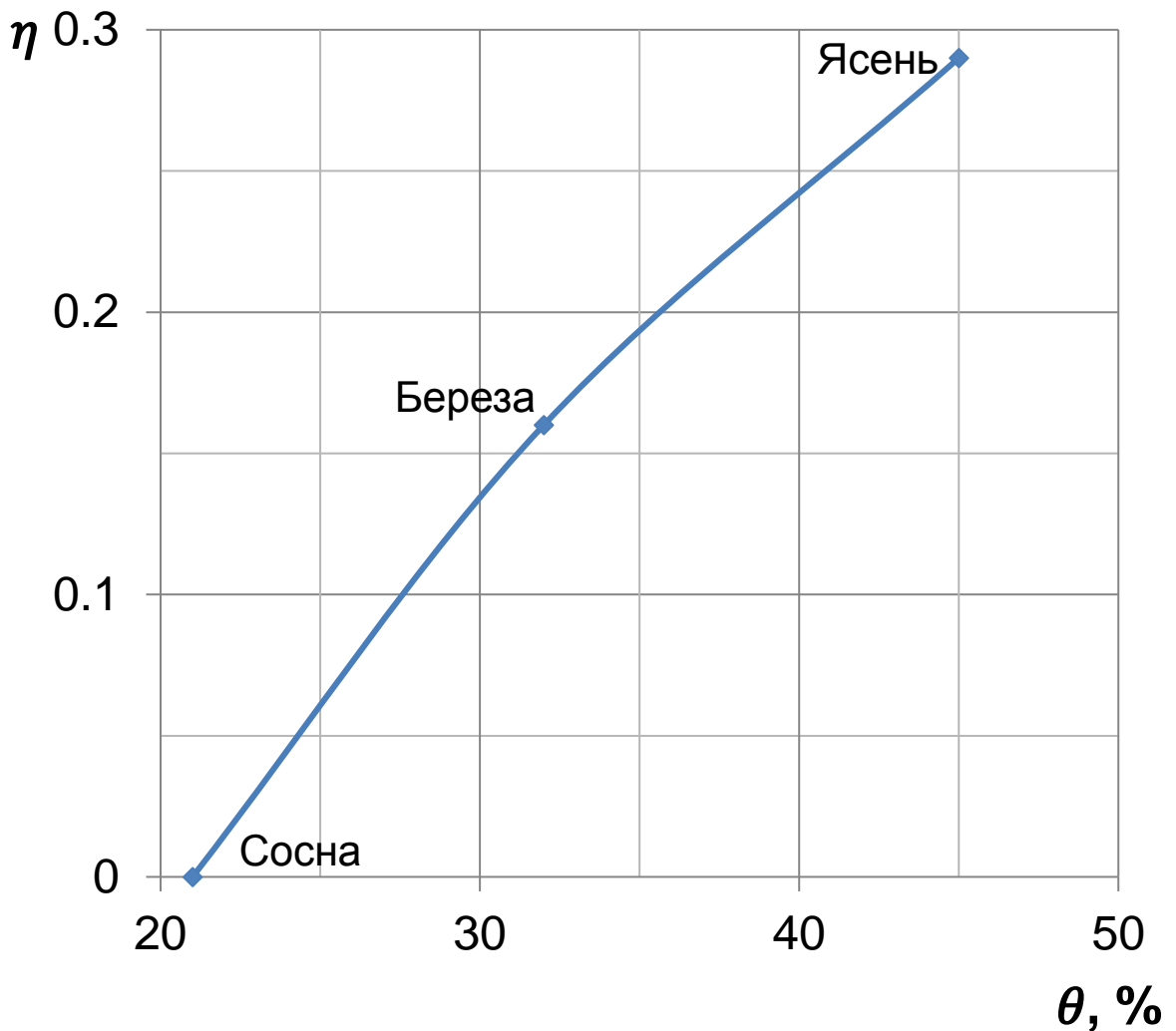


Рисунок 2.10 - График изменения критической силы центрально-сжатого стержня из древесины при длительном приложении нагрузки в условиях повышенной влажности в зависимости от значения $P_{кр.}$, приведенного к критической силе для центрально сжатых элементов из сосны

Как видно из рисунка 2.10, изменение критической силы центрально-сжатого стержня из древесины при длительном приложении нагрузки в условиях повышенной влажности прямо пропорционально значению критической силы, определяемой при начальном модуле деформации древесины ($P_{кр.}$). Следовательно, силовое и средовое нагружение влияет в большей степени на

центрально сжатые элементы из древесины с более высокими показателями физико-механических свойств.

На основе численного исследования (см. рис. 2.9, 2.10) можно сделать вывод о том, что из рассмотренных центрально сжатых элементов из древесины наиболее прочными являются элементы из ясеня. При этом для применения в условиях повышенной влажности наиболее эффективны элементы из хвойных пород деревьев (например, из сосны).

Выводы по главе 2

Представленные достаточно простые алгебраические зависимости позволяют получать качественную и количественную оценки длительной прочности и устойчивости стержней из древесины при проектных и запроектных воздействиях.

Выведена зависимость критической силы от двух параметров: времени и влажности. Получен критерий прочности сжатых стержней из древесины при совместном влиянии двух факторов: влажности и времени. Предложенный критерий оценки длительной прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины позволяет относительно просто оценивать ресурс сопротивления таких элементов при рассматриваемых воздействиях.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГИБКИХ ДЕРЕВЯННЫХ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СИЛОВОМ И СРЕДОВЫМ НАГРУЖЕНИИ

3.1 Цель и задачи экспериментальных исследований

Экспериментальное исследование длительной прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины проведены с целью проверки разработанного расчетного аппарата для определения прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины, основанного на гипотезе о том, что 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 $1/\epsilon$ и др. 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.

3.2 Методика экспериментальных исследований. Конструкции опытных образцов

Программа исследований включала испытания пяти серий стержней из древесины по пять образцов в каждой. Основные параметры экспериментальных образцов приведены в таблице, 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.

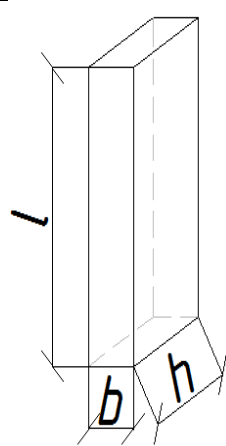
Экспериментальные значения параметров прочности и устойчивости центрально сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности определялись по специально разработанной методике, приоритет которой защищен патентом РФ на полезную модель № 142336. Схема и общий вид опытной установки приведены на рисунках 3.1 – 3.3.

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 натяжение 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 ступенями.

Таблица 3.1 - Основные параметры экспериментальных образцов деревянных стержней

Серия образца	Длина, м	Высота, м	Ширина, м	Мом. ин. min, $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	Эскиз образца	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	0.25	0.03	0.01	0.0025		0.0225	2.89	8.66	86.60
Д-30	0.3	0.03	0.01	0.0025		0.0225	2.89	8.66	103.92
Д-35	0.35	0.03	0.01	0.0025		0.0225	2.89	8.66	121.24
Д-40	0.4	0.03	0.01	0.0025		0.0225	2.89	8.66	138.56
Д-45	0.45	0.03	0.01	0.0025		0.0225	2.89	8.66	155.88

В процессе эксперимента при помощи тензорезисторов 9, установленных на поверхности опытного образца, фиксируются деформации его верхних волокон. Прогиб опытного образца в процессе нагружения измеряли электронным прогибомером, а изменение длины стержня определяли по перемещению груза б. Таким образом, с помощью описанной установки в опытном образце создается сжимающее усилие N. Это позволяет, увеличивая нагрузку заранее тарированными грузами исследовать устойчивость сжатого деревянного стержня. Сила тяжести, создаваемая за счет массы грузов, вызывает натяжение каната, которое посредством шарнирно-стержневой системы рабочей рамки преобразуется в сжимающую силу.

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:

$$N = \alpha \cdot P \cdot \frac{(b + 0,5 \cdot l) \cdot \sqrt{a^2 - 0,25 \cdot (0,5 \cdot l + b)^2}}{a^2}, \quad (3.1)$$

где α – кратность полиспаста; P – масса груза; l – длина испытываемого образца; a, b – размеры рабочей рамки шарнирно-стержневой системы (см. рис. 3. 4).

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.

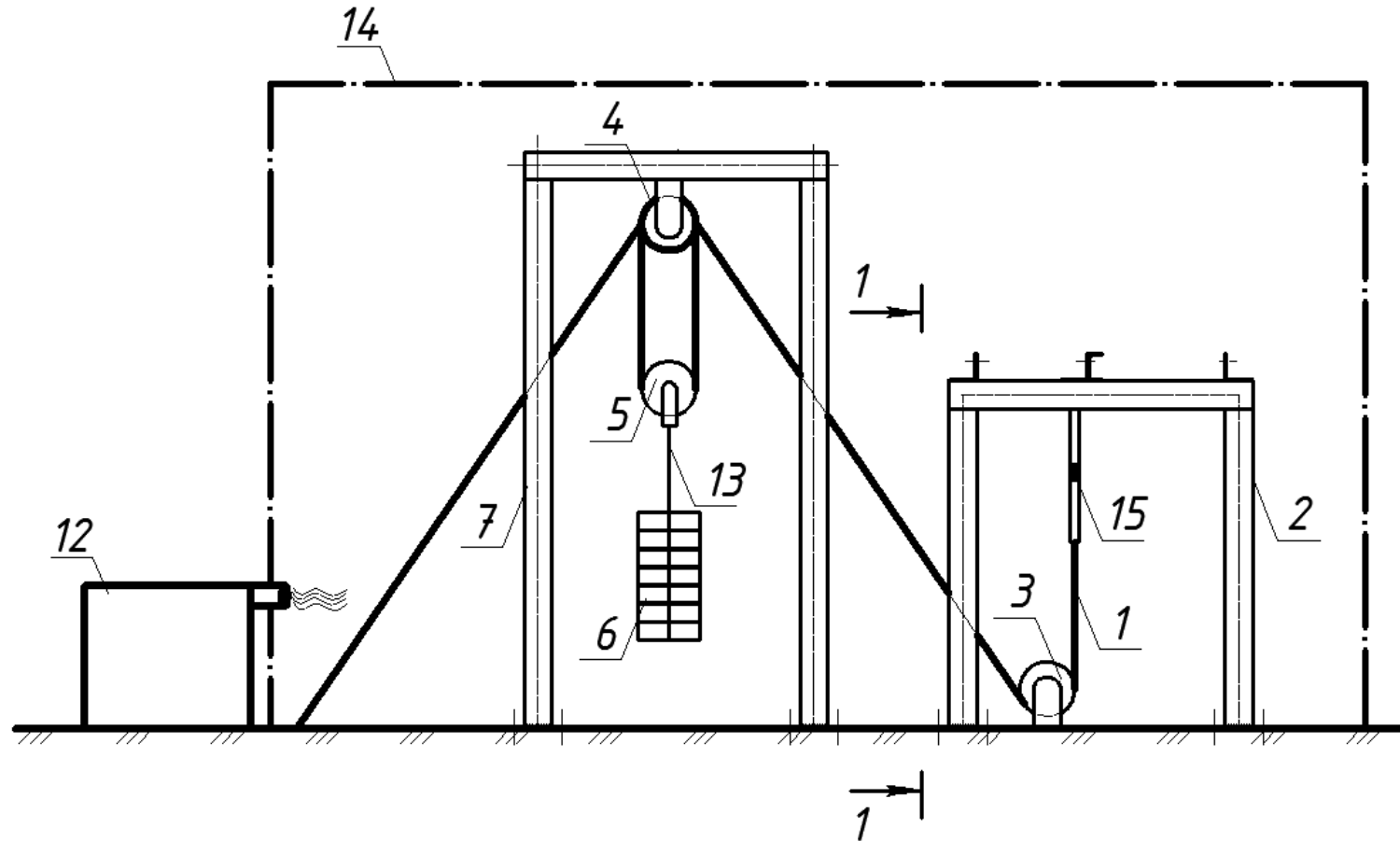


Рисунок 3.1 - Схема установки для оценки прочности и устойчивости центрально сжатого стержня из древесины: 1 – канат, 2 – несущая рама шарнирно-стержневой системы, 3 – неподвижная обойма 1 блока полиспаста, 4 – неподвижная обойма 2 блока полиспаста, 5 – подвижная обойма блока полиспаста, 6 – груз, 7 – несущая рама, 12 – увлажнитель воздуха, 13 – элемент для крепления груза, 14 – герметичная камера, 15 - рабочая шарнирно-стержневая система

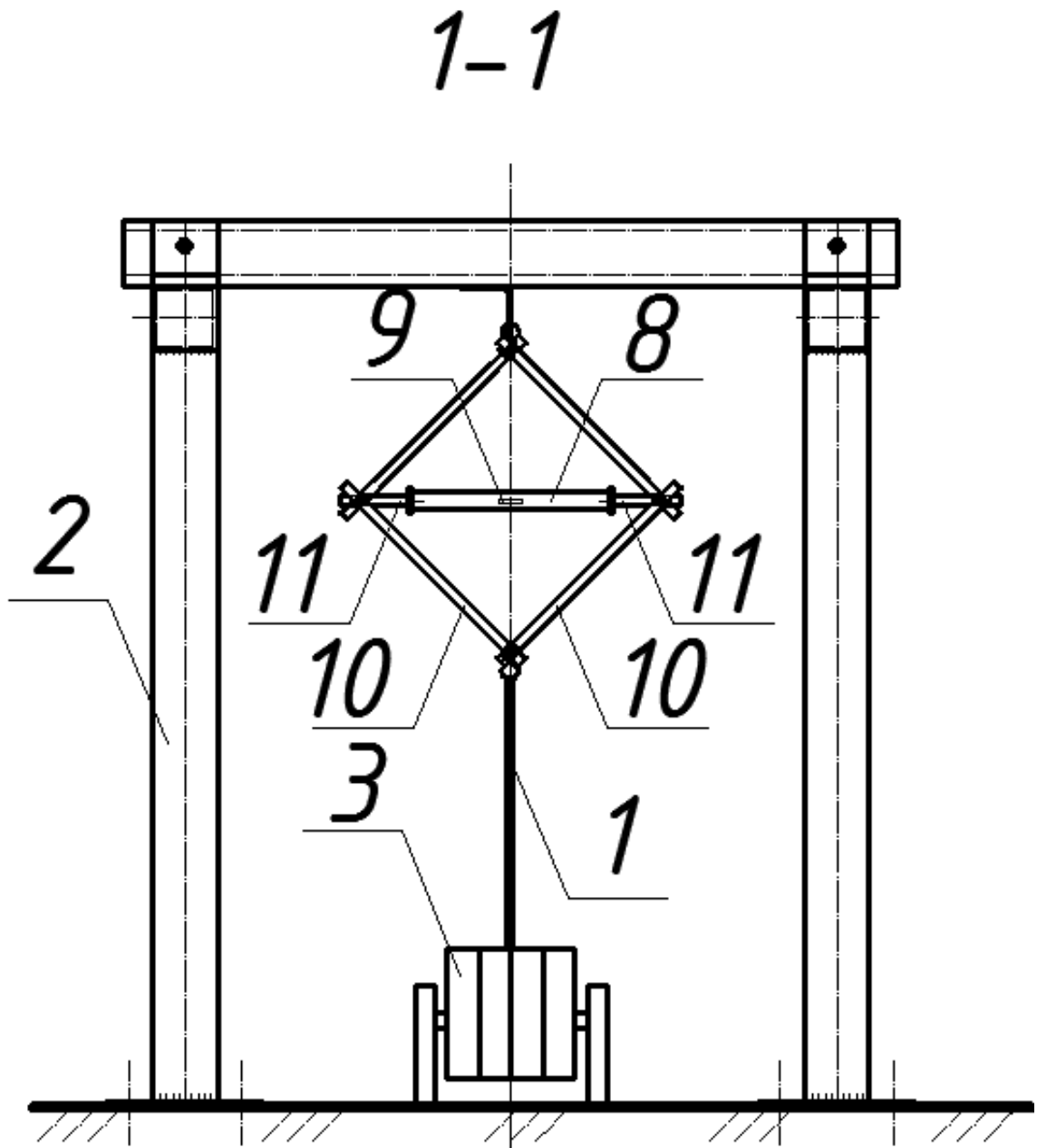
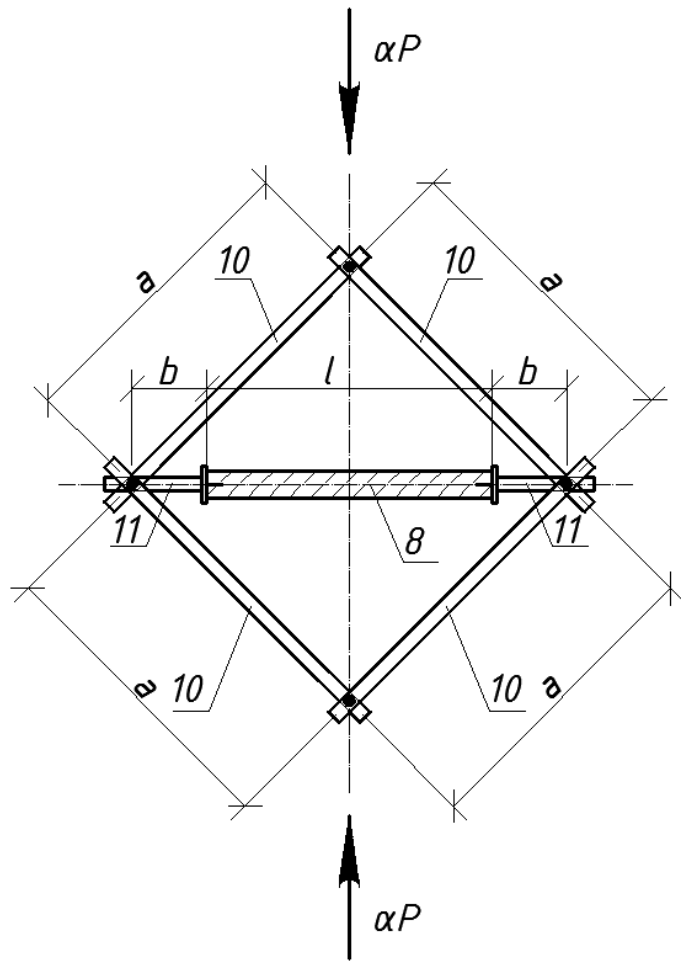


Рисунок 3.2 – Схема установки для оценки прочности и устойчивости центрально-сжатого стержня из древесины: 1 – канат, 2 – несущая рама шарнирно-стержневой системы, 3 - неподвижная обойма 1 блока полиспаста, 8 – исследуемый образец, 9 – тензорезистор, 10 – силовые элементы шарнирно-стержневой системы, 11 – сжимающие элементы шарнирно-стержневой системы



Рисунок 3.3 – Общий вид установки для оценки прочности и устойчивости центрально-сжатого стержня из древесины

а)



б)



Рисунок 3.4 – Схема (а) и общий вид (б) шарнирно-стержневой системы установки для оценки прочности и устойчивости центрально сжатого стержня из древесины: 8 – исследуемый образец, 10 – силовые элементы шарнирно-стержневой системы, 11 – сжимающие элементы шарнирно-стержневой системы

Устройство для экспериментального определения критической силы стержня из древесины позволяет проводить экспериментальные исследования прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины с различными условиями закрепления при сравнительно низких экономических затратах.

3.3 Устойчивость сжатых опытных образцов при длительном нагружении

В лаборатории кафедры ПГС Юго-Западного государственного университета были проведены экспериментальные исследования устойчивости опытных образцов для проведения качественной и количественной оценки приведенных в главе 2 аналитических зависимостей. Опытные образцы сечением 30x10 мм испытывались на центральное сжатие по специально разработанной методике, приоритет которой защищен патентом РФ на полезную модель № 142336. Схема испытаний образца и общий вид опытной установки описаны в п.3.2 и приведены на рисунках 3.1-3.4.

В таблицах 3.2, 3.3, 3.4 приведены результаты кратковременных испытаний образцов серий Д-30, Д-35, Д-45 соответственно; в таблицах 3.5, 3.6 представлены результаты длительных испытаний образцов серий Д-35, Д-30.

При составлении таблиц по результатам экспериментов определялись:

среднее значение критической силы:

$$\overline{P}_{кр} = \frac{\sum_i^n P_{кр,i}}{n}, \quad (3.2)$$

где n – количество испытаний;

математическое ожидание:

$$E(x) = \sum_i^n P_{кр,i} \cdot p_i, \quad (3.3)$$

где p_i – вероятность значения критической силы $P_{кр,i}$;

среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\bar{P}_{кр.} - P_{кр,i})^2}{n - 1}}. \quad (3.4)$$

среднеквадратичное отклонение среднего значения:

$$\sigma_R = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.5)$$

коэффициент вариации:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}}. \quad (3.6)$$

Значение критической силы с вероятностью $p = 0,99$ определялось по формуле:

$$x = \bar{x} - \sigma_r \cdot t, \quad (3.7)$$

где t – коэффициент Стьюдент, определяемый по таблице Д.1 ГОСТ Р 8.736-2011.

На рисунке 3.5 приведен график зависимости критического напряжения $\sigma_{кр}$ от времени t при гибкости $\lambda=103,92$ и $\lambda=121,24$. На рисунках 3.6 показан график изменения значения критической силы $P_{кр}$ от времени t при указанных гибкостях.

Результаты экспериментальных исследований изменения отношения критической силы центрально сжатого стержня из древесины в момент времени $t=200$ сут. и $t=300$ сут. ($P_{кр}(t)$) к критической силе в момент времени $t=0$ сут ($P_{кр}$) в зависимости от гибкости λ представлены на рис. 3.7.

Таблица 3.2 – Результаты длительных испытаний образцов серии Д-30 при влажности w=12%

Длин а, м	Высот а, м	Ширин а, м	Мом. ин. min, $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	Мом. ин. max, $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	Радиус ин. мин., $10^{-3} \cdot \text{м}$	Радиус ин. макс., $10^{-3} \cdot \text{м}$	Гибкост ь	$R_{кр}$, кН	Масса груза
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.92	3.39	950.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.92	3.24	910.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.92	3.10	870.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.92	3.07	860.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.92	3.10	870.00
среднее значение								3.24	910.00
среднеквадратическое отклонение								0.07	18.86
коэффициент вариации								0.02	0.02
значение ряда с вероятностью 0.99								3.14	888.24

Таблица 3.3 – Результаты кратковременных испытаний образцов серии Д-35 при влажности w=12%

Длин а, м	Выс ота, м	Шири на, м	$J_{\min},$ $10^{-6} \cdot \text{М}^4$	$J_{\max},$ $10^{-6} \cdot \text{М}^4$	$\Gamma_{\min.}, 10^{-3} \cdot \text{М}$	$\Gamma_{\max}, 10^{-3} \cdot \text{М}$	λ	$P_{\text{кр}}, \text{кН}$	Масса груза
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121	2.48	650.00
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121	2.22	580.00
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121	2.33	610.00
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121	2.41	630.00
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121	2.56	670.00
среднее значение								2.34	613.33
среднеквадратическое отклонение								0.06	16.56
коэффициент вариации								0.03	0.03
значение ряда с вероятностью 0.99								2.27	594.23

Таблица 3.4 – Результаты кратковременных испытаний образцов серии Д-45 при влажности $w=12\%$

Длина, м	Высота, м	Ширина, м	Мом. ин. min, $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	Мом. ин. max, $10^{-6} \cdot \text{м}^4$	Радиус ин. мин., $10^{-3} \cdot \text{м}$	Радиус ин. макс., $10^{-3} \cdot \text{м}$	Гибкость	$R_{кр}$, кН	Масса груза
0.45	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	155.885	1.34	310
0.45	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	155.885	1.64	380
0.45	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	155.885	1.51	350
0.45	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	155.885	1.38	320
0.45	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	155.885	1.47	340
среднее значение								1.47	340.00
среднеквадратическое отклонение								0.05	17.00
коэффициент вариации								0.03	0.05
значение ряда с вероятностью 0.99								1.42	320.39

Таблица 3.5 – Результаты длительных испытаний образцов серии Д-35 при влажности w=12%

Длин а, м	Высот а, м	Шири на, м	Мом. ин. min, 10 ⁻⁶ *М ⁴	Мом. ин. max, 10 ⁻⁶ *М ⁴	Радиу с ин. мин., 10 ⁻³ *М	Радиус ин. макс., 10 ⁻³ *М	Гибкос ть	Р кр, кН	Масса груза	t до разрушение при Р, сут.		
										0,95* Ркр	0,9*Рк р	0,85*Р кр
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121.244	2.47	140.00	43.00	122.00	272.00
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121.244	2.38	135.00	55.00	135.00	286.00
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121.244	2.74	155.00	42.00	125.00	292.00
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121.244	2.35	133.00	39.00	131.00	269.00
0.35	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	121.244	2.35	133.00	32.00	115.00	256.00
среднее значение								2.46	139.20	42.20	325.60	275.00
среднеквадратическое отклонение								0.07	3.71	3.34	178.11	5.71
коэффициент вариации								0.03	0.03	0.08	0.55	0.02
значение ряда с вер. 0.99								2.38	134.92	38.35	120.10	268.41

Таблица 3.6 – Результаты длительных испытаний образцов серии Д-30 при влажности $w=12\%$

Длина, м	Высота, м	Ширина, м	Мом. ин. min, $10^{-6} \cdot \text{М}^4$	Мом. ин. max, $10^{-6} \cdot \text{М}^4$	Радиус ин. мин.	Радиус ин. макс.	Гибкость	Р кр, кН	Масса груза, кН	t до разрушение при Р, сут.		
										$0,95 \cdot P_{кр}$	$0,9 \cdot P_{кр}$	$0,85 \cdot P_{кр}$
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	0.002887	0.008660	103.923	3.20	82.00	91.00	190.00	348.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	0.002887	0.008660	103.923	3.16	81.00	90.00	191.00	366.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	0.002887	0.008660	103.923	3.27	84.00	89.00	182.00	375.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	0.002887	0.008660	103.923	3.39	87.00	94.00	175.00	337.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	0.002887	0.008660	103.923	3.18	81.50	92.00	210.00	343.00
среднее значение								3.24	83.10	91.20	189.60	353.80
среднеквадратическое отклонение								0.04	0.98	0.77	5.25	6.42
коэффициент вариации								0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
значение ряда с вероятностью 0.99								3.19	81.96	90.31	183.54	346.39

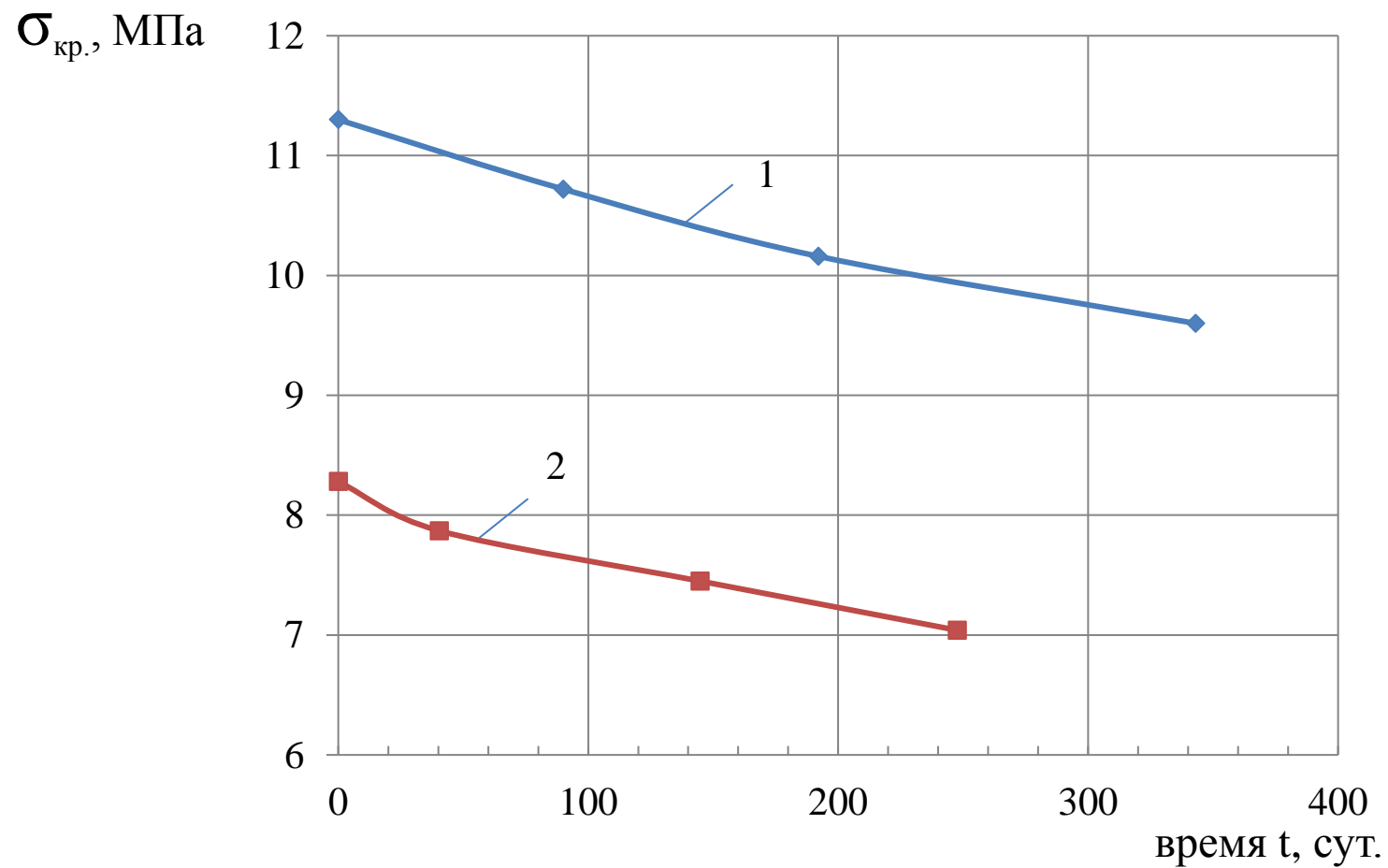


Рисунок 3.5 – График изменения предельных напряжений во времени: 1 - при $\lambda=103.92$; 2 - при $\lambda=121,24$

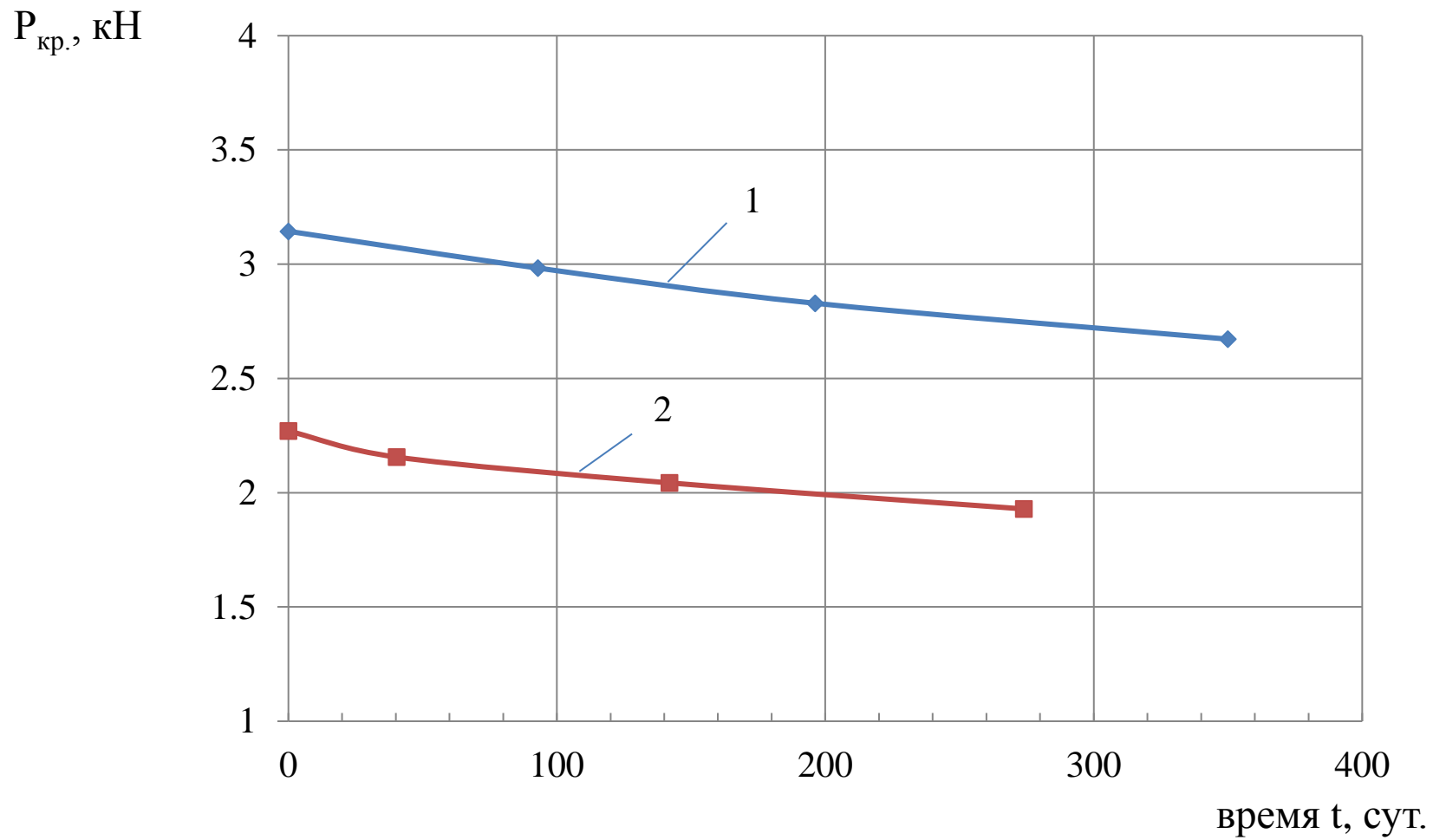


Рисунок 3.6 – График изменения критической силы ($P_{кр}$) во времени: 1 - при $\lambda=103.92$; 2 - $\lambda=121.34$, кН

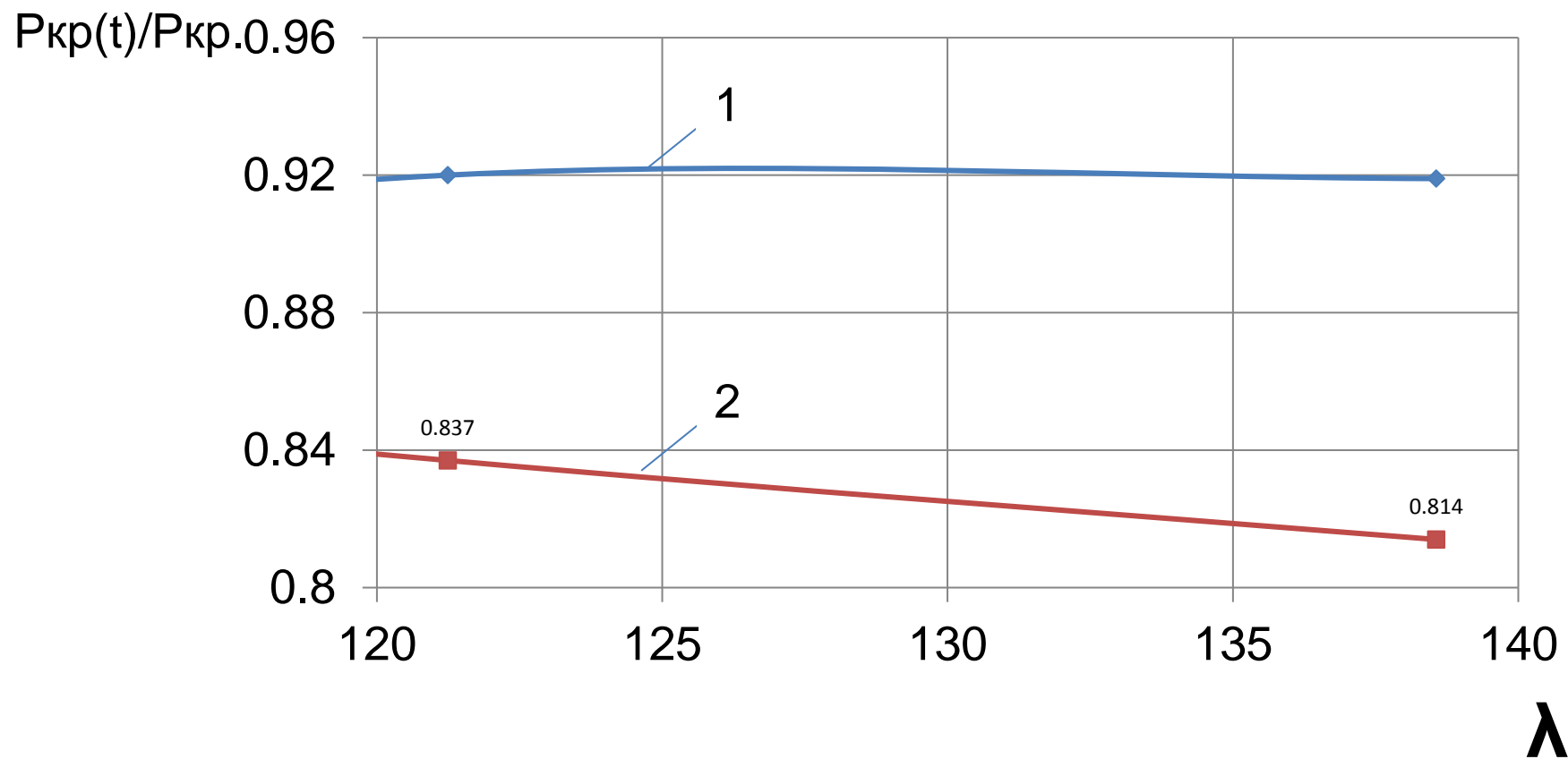


Рисунок 3.7 – График изменения отношения критической силы центрально сжатого стержня из древесины в момент времени $t=200$ сут. (1) и $t=300$ сут. (2) ($P_{кр}(t)$) к критической силе в момент времени $t=0$ сут ($P_{кр}$) в зависимости от гибкости λ

Из рисунков 3.5, 3.6 видно, что параметр времени оказывает существенное влияние на предельное напряжение и устойчивость центрально сжатого стержня из древесины в первые 200 суток.

Из рисунка 3.7 можно сделать вывод о том, что в первые 200 суток на изменение критической силы центрально сжатого стержня из древесины $(P_{кр}(t)/P_{кр})$ его гибкости существенного влияния не оказывает. В период времени $t=300$ сут. при гибкости образца $\lambda=120$ отношение $(P_{кр}(t)/P_{кр})$ критической силы центрально сжатого стержня из древесины в указанный момент времени $(P_{кр}(t))$ к критической силе в момент времени $t=0$ сут $(P_{кр})$ равно 0,84; при гибкости $\lambda=140$ - 0,81. Следовательно, с течением времени наблюдается обратно пропорциональная зависимость между отношением $P_{кр}(t)/P_{кр}$ и гибкостью рассматриваемого центрально сжатого стержня из древесины.

3.4 Устойчивость сжатых опытных образцов при длительном нагружении и переменной влажности

Было проведено экспериментальное исследование на центральное сжатие шарнирно-закрепленных по концам образцов деревянных стержней и определено значение критической силы. В таблицах 3.7, 3.8 приведены результаты длительных испытаний образцов серии Д-30 при влажности $w=20\%$ и $w=30\%$ соответственно. На рис. 3.7-3.9 показаны значения критической силы во времени и при различной влажности, полученные экспериментально при различных значениях гибкости λ опытных образцов.

Анализируя полученные значения критической силы во времени можно видеть, наиболее интенсивные реологические процессы в опытных образцах проявляются в первые полтора года с последующим затуханием во времени. Варьирование влажности опытных конструкций в пределах 10-30% существенно влияет на значение критической силы.

Таблица 3.7 – Результаты длительных испытаний образцов серии Д-30 при влажности w=20%

Дли на, м	Высота, м	Ширин а, м	Мом. ин. Min, 10 ⁻⁶ *М ⁴	Мом. ин. max, 10 ⁻⁶ *М ⁴	Радиус ин. min, 10 ⁻³ *М	Радиус ин. max, 10 ⁻³ *М	Гибкость	Р кр, кН	Масса груза	t до разрушение при Р, сут.	
										0,95*Р _{кр}	0,9*Р _{кр}
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.92	3.12	80.00	41.00	69.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.92	2.77	71.00	38.00	57.00
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.92	3.35	86.00	48.00	84.00
среднее значение								3.08	47.40	42.33	70.00
среднеквадратическое отклонение								0.14	18.59	2.42	6.38
коэффициент вариации								0.05	0.39	0.06	0.09
значение ряда с вероятностью 0.99								2.92	25.95	39.54	62.64

Таблица 3.8 – Результаты длительных испытаний образцов серии Д-30 при влажности w=30%

Длина , м	Высота, м	Ширина , м	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	$P_{кр}$, Н	Масса груза	t до разрушение при P, сут.	
										$0,95 \cdot P_{кр}$ р	$0,9 \cdot P_{кр}$
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.923	2,64	74.1	70	150
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.923	2.57	71.89	76	157
0.3	0.03	0.01	0.0025	0.0225	2.89	8.66	103.923	2.48	69.6	80	165
среднее значение								2.56	71.86	75.40	157.04
средне квадратическое отклонение								0.15	1.06	2.39	3.49
коэффициент вариации								0.01	0.01	0.03	0.02
значение показателя с вер. 0.99								2.50	70.64	72.64	153.01

$P_{кр.}, кН$

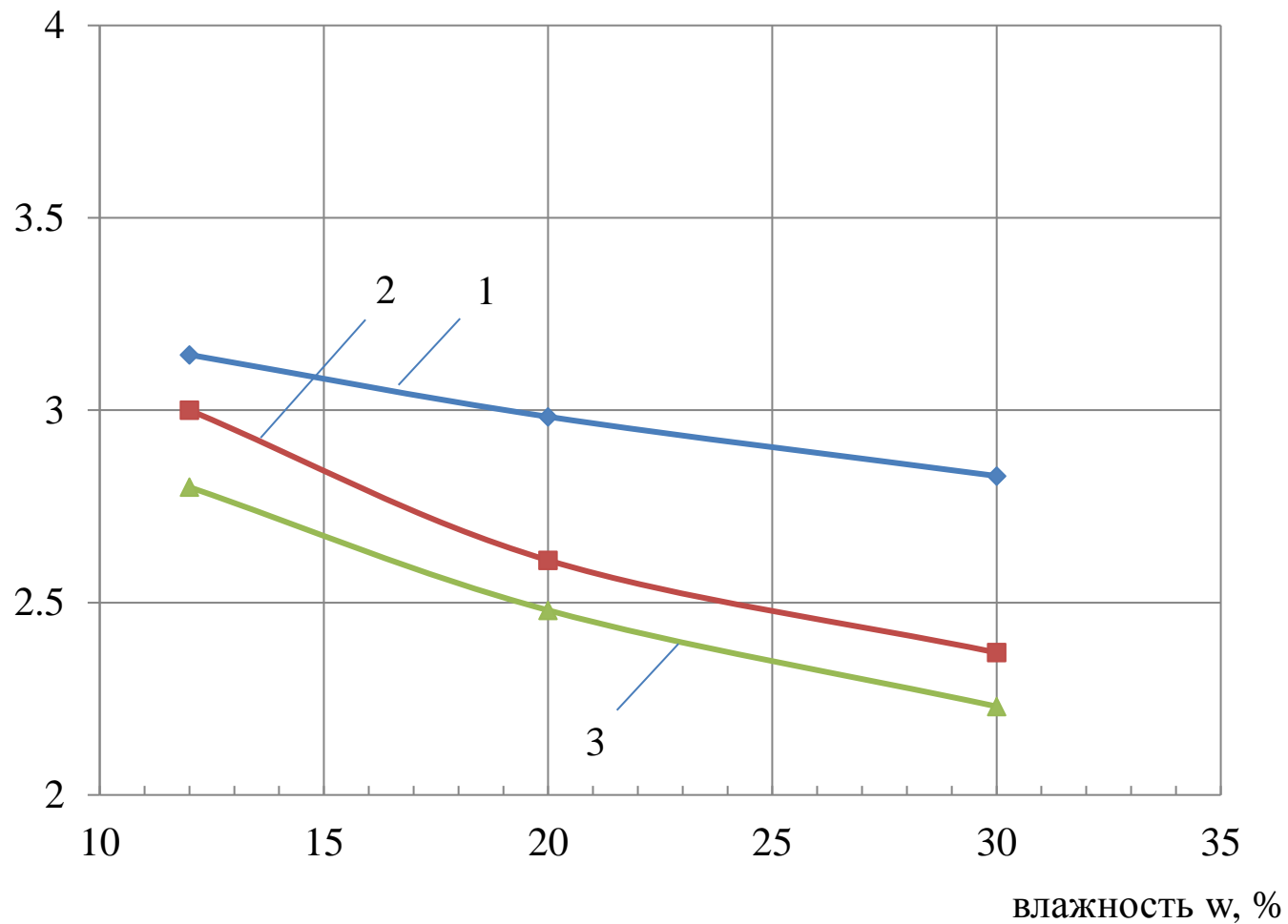


Рисунок 3.8 – График изменения критической силы ($P_{кр.}$) при переменной влажности при $\lambda=103.92$: 1 – при $t=0$ сут.; 2 - при $t=81$ сут.; 3 - при $t=171$ сут.

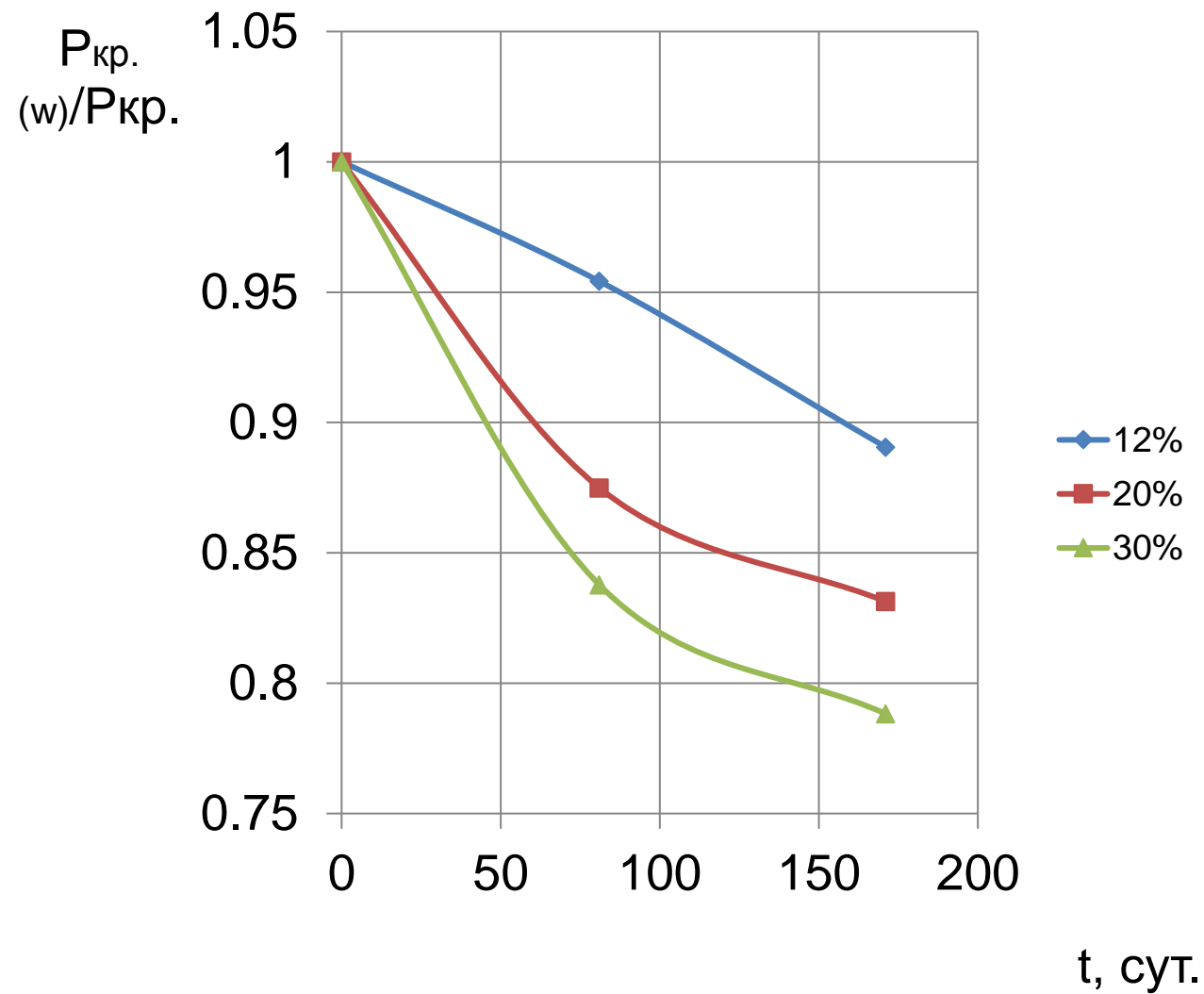


Рисунок 3.9 – График изменения критической силы ($P_{кр.}$) во времени при $\lambda=103.92$ при различной влажности

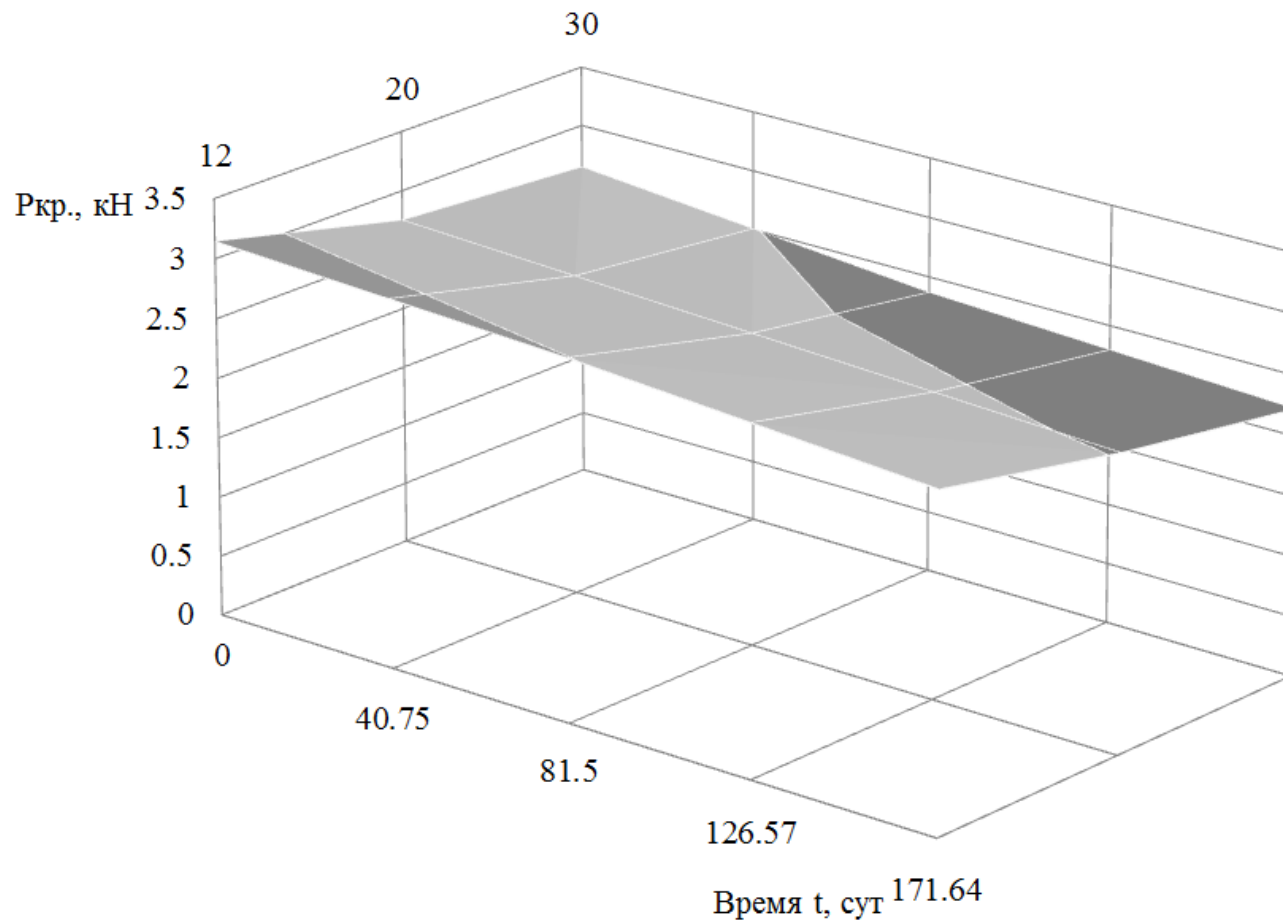


Рисунок 3.10 – График изменения критической силы центрально-сжатого стержня из древесины при варьировании влажности и времени при $\lambda=103.92$

Так, центрально сжатый опытный образец серии Д-30 с влажностью $w=10\%$ теряет устойчивость при значении сжимающей силы $P_{кр.} = 3,14$ кН, а при влажности 30% значение критической силы составляет 2,80 кН при $t=0$ сут. При значении времени $t=81$ сут центрально сжатый опытный образец серии Д-30 с влажностью $w=10\%$ теряет устойчивость при значении сжимающей силы $P_{кр.} = 2,98$ кН, а при влажности 30% значение критической силы составляет 2,48 кН. Через время $t=171$ сут указанный опытный образец с влажностью $w=10\%$ теряет устойчивость при значении сжимающей силы $P_{кр.} = 2,83$ кН, а при влажности 30% значение критической силы составляет 2,23 кН.

3.5 Выводы по главе 3

Построен экспериментальный график изменения критической силы $P_{кр}$ в зависимости от гибкости деревянного стержня λ .

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.

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.

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.

Определена зависимость в виде графика критической силы деревянных стержней гибкостью $\lambda=103.92$ при переменной влажности через различные промежутки времени $t=0$ сут, $t=81$ сут, $t=171$ сут .

По результатам экспериментальных исследований выявлена зависимость в виде графика изменения критической силы деревянных стержней гибкостью $\lambda=103.92$ в координатах времени и влажности « $P_{кр}-t-w$ ».

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

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМАХ, ИХ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

4.1 Интегральный критерий определения форм потери устойчивости центрально сжатых стержней в конструктивной системе

Перейдем к рассмотрению устойчивости элементов конструктивных систем, деформирующихся в составе всей системы. Известно, что причиной потери устойчивости всей конструктивной системы такой, как ферма, рама, структура (рис. 4.1), часто является один элемент или их небольшая группа.

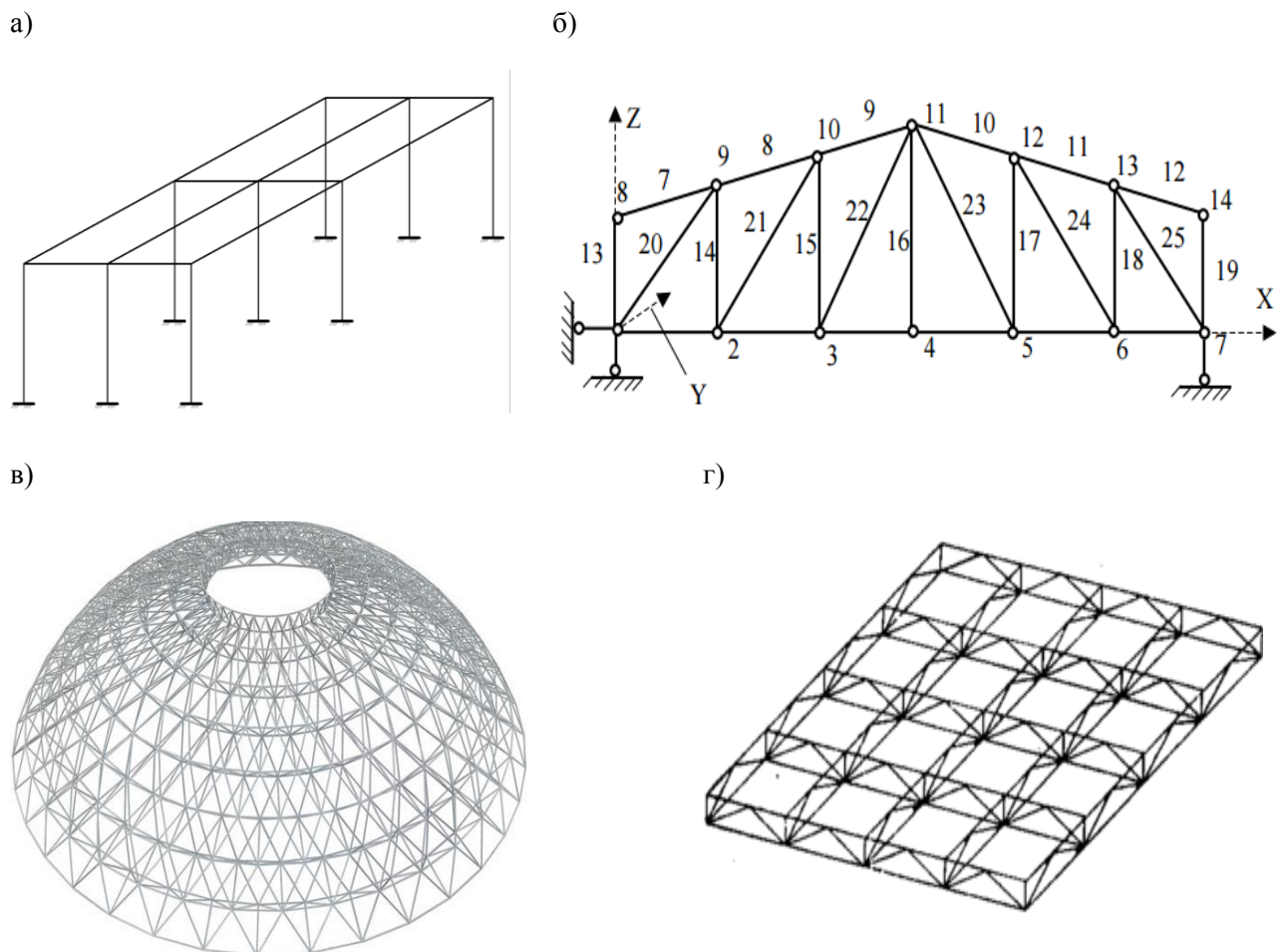


Рисунок 4.1 – Примеры расчетных схем стержневых конструктивных систем из древесины

В связи с этим, важным вопросом в решении задач устойчивости конструктивных систем является выявление наиболее опасных элементов или частей конструкции с низкой сопротивляемостью потере устойчивости. Н.В. Корноухов и А.Ф. Смирнов [138] ввели понятия стесненной и принужденной потери устойчивости отдельных элементов всей конструктивной системы, отражающее то физическое явление, что более нагруженный стержень может иметь большую критическую силу за счет «поддержки» менее загруженных стержней, которые в результате будут иметь меньшую критическую силу.

В случае стесненной деформации стержневого элемента его внутренней продольной силы достаточно, чтобы держать стержень в отклоненном состоянии, при этом, его соединение на концах с остальными частями конструктивной системы оказывает стесняющее воздействие на него.

В случае принужденной потери устойчивости, наоборот, изгиб стержня происходит, главным образом, за счет влияния со стороны окружающих частей конструкции в силу совокупности деформаций в структуре общей деформируемой системы. При этом воздействие продольной сжимающей силы рассматриваемого стержня может оказаться второстепенной.

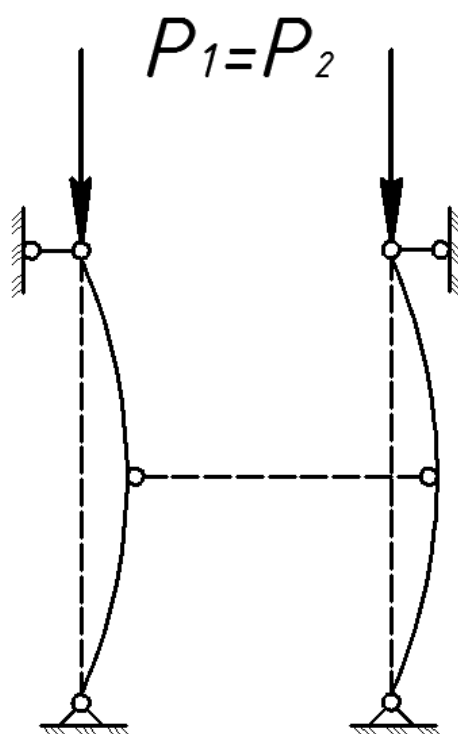
Рассмотрим простой пример (рис. 4.2). К двум соединенным распоркой стержням приложены сжимающие силы. В случае равенства этих сил, оба стержня теряют устойчивость одновременно, и в распорке усилия не появляются. В этом случае возникает ситуация, когда оба стержня равноустойчивы относительно друг друга. Если к левому стержню приложить большую силу, чем к правому, то он начнет терять устойчивость раньше, и будет подталкивать правый через распорку, а правый наоборот будет сдерживать левый от потери устойчивости (рис. 4.2, б). Если сжимающая сила в правом стержне будет равна нулю, то изгиб его будет происходить только за счет воздействия распорки.

Очевидно, что характер деформирования этих стержней по своей природе различен. Левый стержень испытывает стесненную потерю устойчивости, поскольку ему «мешает» правый стержень. Но он подталкивает всю систему к

потере устойчивости, поэтому правый стержень испытывает принужденную потерю устойчивости, он старается удержать систему от потери устойчивости.

В практике проектирования согласно нормам расчет системы на устойчивость во многих случаях сводится к проверке состояния устойчивости отдельных сжатых или сжато-изогнутых стержней. При этом основное значение во всех случаях имеет величина силы, сжимающей рассматриваемый стержень, а также его свободная длина. Но в случае принужденной бифуркации стержня это противоречит существованию явления и может привести к большой свободной длине соседнего стержня и тем самым к неучету его потери устойчивости.

а)



б)

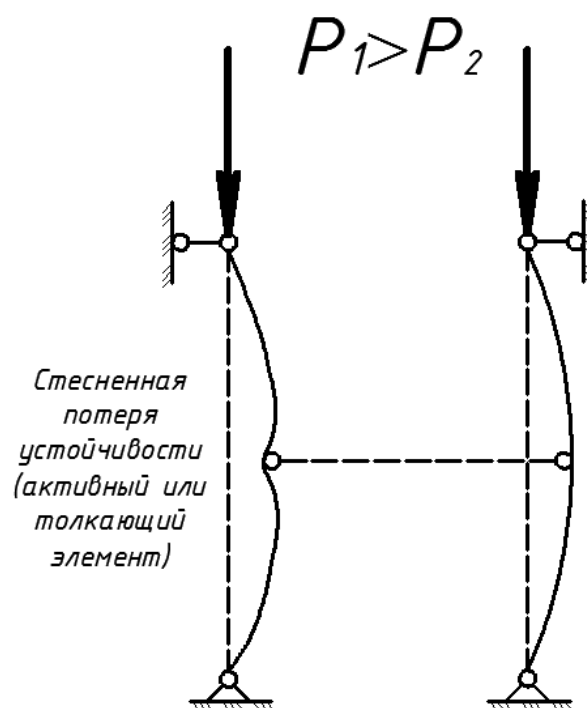


Рисунок 4.2 - Стесненная и принужденная потеря устойчивости

Теперь остановимся на проблеме определения вида потери устойчивости стержней, входящих в конструктивную систему. В работе [5] А.В. Александров назвал стесненную потерю устойчивости «активной», а принужденную – «пассивной». Эти названия раскрывают суть явления, состоящего в том, что стержень с «активной» потерей толкает стержень с «пассивной» потерей и

увеличивает его потенциальную энергию, сам теряя ее. Отсюда возникает критерий определения этих двух состояний.

Пусть выделенный из системы стержень (рис. 4.3) при некотором критическом значении нагрузки $P_{кр.}(w, t)$ теряет устойчивость.

Его энергия деформации U_i , добавляющаяся при начале потери устойчивости будет равна сумме работ продольной силы в стержне, а также опорных изгибающих моментов и сил согласно [3]:

$$U_i = A_i(N_i) + A_i(M_i, Q_i), \quad (4.1)$$

где $A_i(N_i) = N_i \cdot \Delta_i$ - работа продольных сжимающих сил на сближении Δ_i точек от изгиба,

$A_i(M_i, Q_i)$ - работа опорных изгибающих моментов и сил i -го стержня в процессе изгиба

$$A_i(M_i, Q_i) = \frac{1}{2} \cdot (M_1 \cdot Z_{1i} + Q_2 \cdot Z_{2i} + M_3 \cdot Z_{3i} + Q_4 \cdot Z_{4i}) \quad (4.2)$$

Усилия и концевые перемещения берутся из решения задачи устойчивости системы.

Так как потенциальная энергия величина всегда положительная, т.е. $U_i > 0$, то сумма работ (4.1) также всегда больше нуля. Но знаки слагаемых $A_i(N_i)$ и $A_i(M_i, Q_i)$ могут быть либо одинаковы, либо различны. Для сжимающей силы ее работа всегда положительная, т.е. $A_i(N_i) > 0$ и это значит, что она способствует бифуркации стержня, т.е. его активной потере устойчивости. Работа реакций $A_i(M_i, Q_i)$ при данной схеме нагружения рамы может быть меньше 0, больше 0 или равна нулю.

Случай, когда $A_i(M_i, Q_i) < 0$ значит, что окружение стержня сопротивляется его бифуркации и, следовательно, сам стержень испытывает "активный" тип потери устойчивости, вовлекая в общую бифуркацию всю систему. Поскольку окружение стесняет потерю устойчивости рассматриваемого стержня при $A_i(M_i, Q_i) < 0$, этот тип его бифуркации называют также "стесненной" потерей

устойчивости. Если $A_i(M_i, Q_i) > 0$, то это означает, что работа опорных изгибающих моментов и сил увеличивает работу от продольной силы и окружение стержня (в виде опорных реакций) помогает его потере устойчивости. Это случай "пассивной" или "принужденной" потери устойчивости. В случае $A_i(M_i, Q_i) = 0$ будет наблюдаться равноустойчивость i -го стержня и всей рамы.

Итак, можно заключить, что работа (4.2) может служить искомым критерием. При этом неравенство:

$$A_i(M_i, Q_i) < 0, \quad (4.3)$$

является признаком "активной" потери устойчивости данного стержня при данной схеме нагружения рамы, а неравенство:

$$A_i(M_i, Q_i) > 0, \quad (4.4)$$

служит признаком "пассивной" бифуркации этого стержня. Равенство:

$$A_i(M_i, Q_i) = 0, \quad (4.5)$$

является признаком равноустойчивости стержня и рамы. Сами числовые значения работы $A_i(M_i, Q_i)$, определяемой по формуле (4.2) и представляющие энергетические вклады окружения в бифуркацию каждого i -го стержня, дают количественную меру активности либо пассивности рассматриваемого стержня (или некоторой выделенной части системы).

Вычисление работы (4.2) делается либо с помощью специальных функций метода перемещений для реакций сжато-изогнутых стержней, либо, при использовании МКЭ, непосредственно по реакциям и узловым перемещениям Z_1 , получаемым в процессе определения критического параметра нагрузки и формы потери устойчивости рамы.

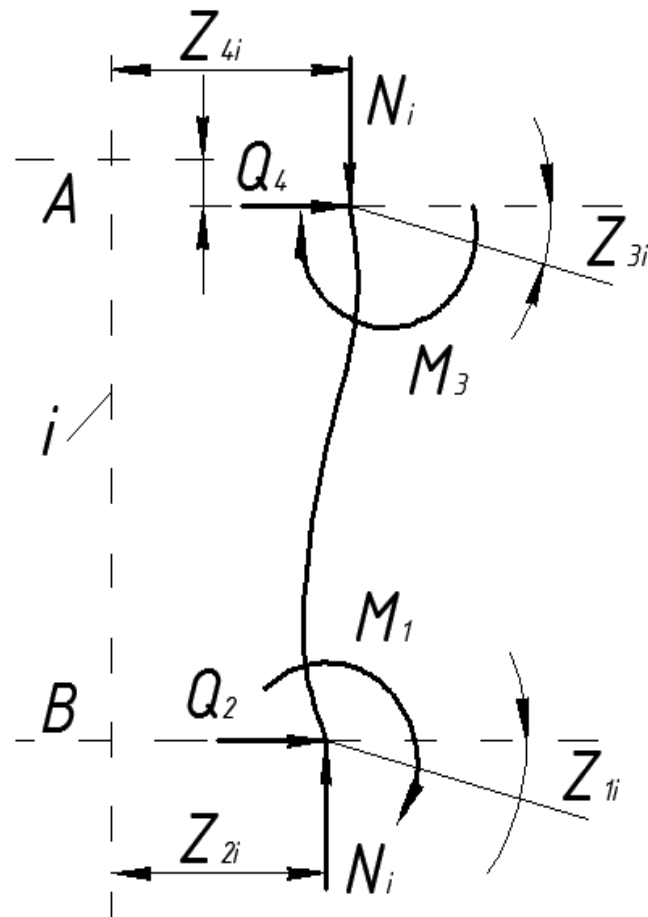


Рисунок 4.3 - Стержень, выделенный из системы

Как известно, элементы строительных конструкций наряду с действием продольных сил подвергаются действию изгибающих моментов, вызванных либо действием внешней нагрузки, либо возникающих вследствие неизбежных случайных эксцентриситетов. Поэтому при определении перемещений сжато – изогнутых или растянуто – изогнутых стержней необходимо учитывать совместное действие поперечной и продольной нагрузок, т.е. рассчитывать стержни с учетом их геометрической нелинейности. Для анализа устойчивости различных систем строительных конструкций удобно использовать метод перемещений.

При решении задач по определению устойчивости конструктивных систем методом перемещений, принимая за неизвестные углы поворота и смещения узлов Z_1, Z_2, Z_n , получаем однородную систему уравнений относительно неизвестных углов поворота и смещений узлов Z_1, Z_2, Z_n :

$$\left. \begin{aligned} r_{11} \cdot Z_1 + r_{12} \cdot Z_1 + \dots + r_{1n} \cdot Z_n &= 0 \\ r_{21} \cdot Z_1 + r_{22} \cdot Z_1 + \dots + r_{2n} \cdot Z_n &= 0 \\ &\dots \\ r_{n1} \cdot Z_1 + r_{n2} \cdot Z_1 + \dots + r_{nn} \cdot Z_n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

где Z_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – неизвестные угловые и линейные перемещения; $r_{i,j}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$) – коэффициенты метода перемещений, которые зависят от величин продольных сил в стержнях.

$$v_i = l \cdot \sqrt{\frac{P_i}{B_{red}(w,t)}}, \quad (i = 1, 2, 3 \dots n). \quad (4.7)$$

В формуле (4.7) $B_{red}(w,t)$ – приведенная жесткость сечения стержня, переменная во времени (t) и влажности древесины (w); v_i – безразмерный параметр, зависящий от величины продольной силы.

Используя приведенные уравнения, найдем критические параметры и формы потери устойчивости рассматриваемой конструктивной системы.

Значения критических сил определим, приравнявая детерминант системы (4.6) к нулю:

$$Det = 0. \quad (4.8)$$

Для определения напряжений в элементах конструктивных систем по строительным нормам необходимо знать коэффициент свободной длины элемента, который можно определить по формуле $\mu_i = \frac{\pi}{v_i}$.

Интерес представляет также оценка влияния времени приложения нагрузки и изменения влажности древесины на характер бифуркации стержней в конструктивной системе.

4.2 Влияние различных факторов на характер бифуркации стержней в конструктивной системе

В процессе эксплуатации сооружений происходит изменение величин нагрузок, действующих на конструктивные элементы, а также изменение размеров сечений, изменение природных факторов и т.п. Для сооружений с несущими конструкциями из древесины характер бифуркации стержней в конструктивной системе зависит от времени приложения нагрузки и изменения влажности древесины. В этой связи необходимо исследовать деформирование стержней при изменении отмеченных факторов в условиях стесненной бифуркации и установить критерии вида бифуркации стержня (стесненной или принужденной).

В действительности можно ожидать, что под воздействием силовых и средовых факторов отдельные стержни конструкции могут перейти из пассивного вида потери устойчивости в активный и наоборот, т.е. неравенство $A_i < 0$ изменит свой знак.

Рассмотрим деревянную двухпролетную раму, в которой центральная стойка нагружена сосредоточенной силой $P_{кр}$, а крайние стойки нагружены силами $\alpha P_{кр}$ (рис. 4.4). Определим вид бифуркации стержня (стесненной или принужденной). Расчет рамы выполним квазистатическим методом перемещений с использованием шагово-итерационной процедуры и алгоритма, приведенного в п. 4.4.

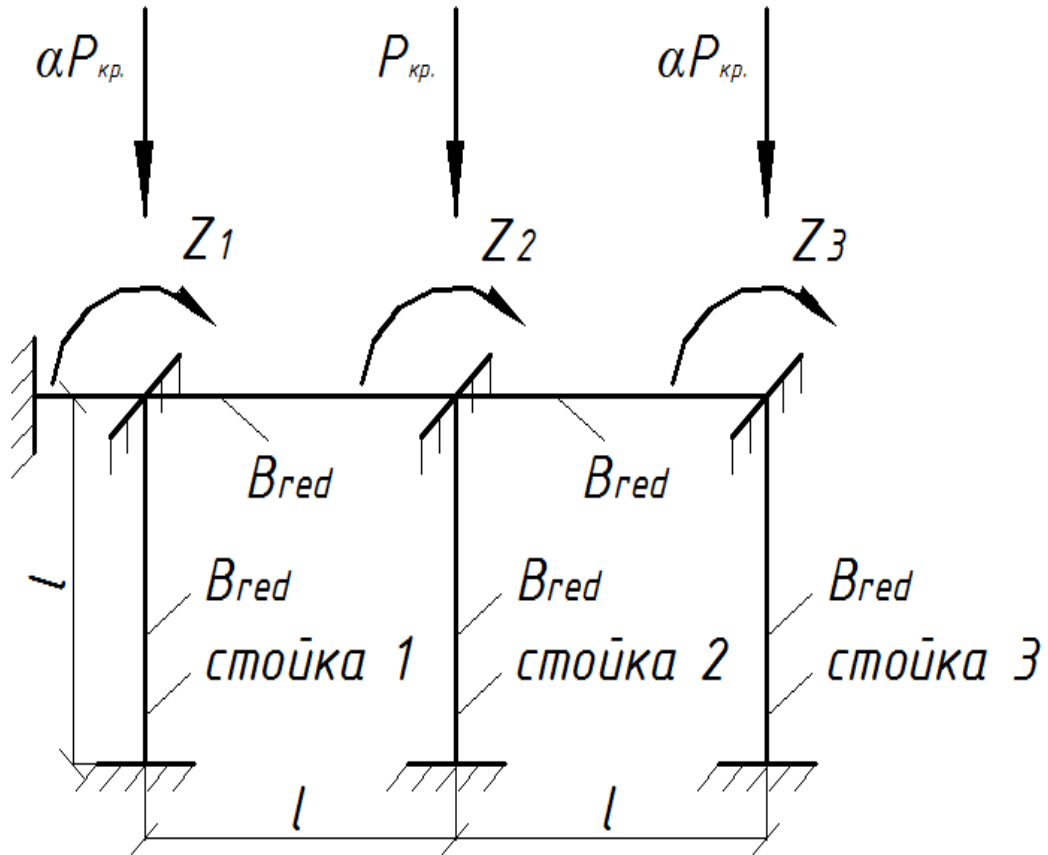


Рисунок 4.6 - Эквивалентная системы метода перемещений

Вычисление работ концевых моментов и поперечных сил выполним с помощью специальных функций метода перемещений. Если принять за неизвестные углы поворота узлов Z_1, Z_2, Z_3 (рис. 4.6), однородная система уравнений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} r_{11} \cdot Z_1 + r_{12} \cdot Z_2 + r_{13} \cdot Z_3 &= 0 \\ r_{21} \cdot Z_1 + r_{22} \cdot Z_2 + r_{23} \cdot Z_3 &= 0 \\ r_{31} \cdot Z_1 + r_{32} \cdot Z_2 + r_{33} \cdot Z_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

$$\text{где } r_{11} = 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1);$$

$$r_{22} = 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2);$$

$$r_{33} = 4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3);$$

$$r_{12} = r_{23} = 2 \cdot i;$$

$$r_{13} = r_{31} = 0;$$

$$v_i = l \cdot \sqrt{\frac{P_i}{B_{red}(w, t)}}, \quad (i = 1, 2, 3),$$

где $B_{red}(w, t)$ – приведенная, переменная во времени (t) и влажности древесины (w) жесткость сечения стержня; v_i – параметр векового уравнения.

Детерминант системы (4.9) определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} Det = & (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)) \cdot (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2)) \cdot (4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \\ & \cdot \varphi_2(v_3)) + 16 \cdot i^3 - (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)) \cdot 4 \cdot i^2 - 4 \cdot i^2 \cdot (4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \\ & \cdot \varphi_2(v_3)). \end{aligned} \quad (4.10)$$

После преобразования выражения (4.10) характеристическое уравнение для определения критического параметра $P_{кр}$ (w, t) примет вид:

$$\begin{aligned} 8 \cdot [(2 + \varphi_2(v_1)) \cdot (2 + \varphi_2(v_2)) \cdot (1 + \varphi_2(v_3))] - 2 \cdot [3 + \\ + \varphi_2(v_1) + \varphi_2(v_3)] = 0. \end{aligned} \quad (4.11)$$

В случае, когда значение параметра нагрузки $\alpha=1$, $v_1 = v_2 = v_3$, следовательно, уравнение (4.11) будет определяться следующим выражением:

$$\begin{aligned} 8 \cdot [(2 + \varphi_2(v_1)) \cdot (2 + \varphi_2(v_1)) \cdot (1 + \varphi_2(v_1))] - 2 \cdot [3 + \\ + \varphi_2(v_1) + \varphi_2(v_1)] = 0. \end{aligned} \quad (4.12)$$

После соответствующих сокращений и преобразований уравнение (4.12) примет вид кубического уравнения:

$$4 \cdot \varphi_2^3(v_1) + 20 \cdot \varphi_2^2(v_1) + 34 \cdot \varphi_2(v_1) = 0. \quad (4.13)$$

Решив уравнение (4.15) определим, что единственный действительный корень равен (-0,53), $\varphi_2(v_1) = -0,53$. Параметр векового уравнения устойчивости при значении параметра нагрузки $\alpha = 1$ определим по таблице функций метода перемещений для сжато-изогнутых стержней по интерполяции: $v_1 = 5,04$. Значение критической силы равно $P_{кр.} = \frac{25,4 \cdot E \cdot I}{l^2}$.

Работа любой стойки рамы равна:

$$A_i = 2 \cdot i \cdot \varphi_{2,i} \cdot Z_i \quad (4.14)$$

Следовательно, работа стоек рассматриваемой рамы равна: $A_{1,2,3} = -1,06 \cdot i \cdot Z_{1,2,3}$.

В случае, когда значение параметра нагрузки $\alpha=0,7$, $v_1 = 0,837$, $v_2 = v_3$, следовательно, уравнение (4.10) будет определяться следующим выражением:

$$8 \cdot [(2 + \varphi_2(0,837 \cdot v_2)) \cdot (2 + \varphi_2(v_2)) \cdot (1 + \varphi_2(0,837 \cdot v_2))] - 2 \cdot [3 + \varphi_2(0,837 \cdot v_2) + \varphi_2(0,837 \cdot v_2)] = 0. \quad (4.15)$$

Решив уравнение (4.15) методом итераций, определим $\varphi_2(v_2) = -1,2831$, $\varphi_2(v_{1,3}) = -0,1227$, что дает для стоек рамы 1 и 3 $v_{1,3} = 4,65$, а для стойки 2 параметр $v_2 = 5,55$. Значения критических сил для стойки 2 составит $P_{кр.,2} = \frac{30,8 \cdot E \cdot I}{l^2}$, а для стоек 1 и 3 $P_{кр.,1,3} = \frac{21,63 \cdot E \cdot I}{l^2}$. Работа всех стоек рамы равна: $A_{1,3} = 0,245 \cdot i \cdot Z_i$, $A_{1,3} = -2,57 \cdot i \cdot Z_i$. Анализируя работу стоек рамы, можно сделать вывод о том, что при нормальных условиях эксплуатации в начальный момент времени нагружения ($t=0$ сут) крайние стойки рамы теряют устойчивость активно, а центральная пассивно.

При значении параметра векового уравнения $v_{1,3} = 4,4$, работа стоек рамы 1, 3 изменит знак и станет равна $A_{1,3} = 0,1296 \cdot i \cdot Z_i$, т.е. стержни 1, 3 перейдут к активной бифуркации.

Приведенный пример показывает, что при изменении жесткостей стоек они могут изменять характер потери устойчивости, т.е. переходить от активной формы к пассивной и наоборот.

Кроме того, для стоек 1 и 3 свободная длина, которую следует использовать при расчете стоек по СП [140] составит $0,676 \cdot l$, а для стойки 2 составит $0,566 \cdot l$ и для данного примера учет взаимного влияния стоек дает для более нагруженной стойки большую критическую силу, чем для менее нагруженных стоек.

Следовательно, свободную длину стоек рам, которая согласно СП [140] используется при проверке прочности их сечений, следует определять, учитывая возможность активного и пассивного характера потери устойчивости.

Обозначим начальный параметр векового уравнения при заданном постоянном значении нагрузки и фиксированном значении влажности древесины ($w=12\%$):

$$v_{i_0} = l \cdot \sqrt{\frac{P}{B_0}}. \quad (4.16)$$

Тогда критический параметр векового уравнения $v_{i_{кр}}$, при котором возможен переход, например, от пассивной бифуркации к активной:

$$v_{i_{кр}} = l \cdot \sqrt{\frac{P}{B_{red}(w,t)}}. \quad (4.17)$$

Используя формулу (4.14) определяем значения $v_{i_{кр}}$, при котором работа меняет знак, эти значения и определяют переход от активной потери формы потери устойчивости к пассивной и наоборот.

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

$$\frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2} = \frac{B_0}{B_{red}(w,t)}. \quad (4.18)$$

Пользуясь соотношением (4.18), выразим значение приведенной, переменной во времени (t) и влажности древесины (w) жесткости сечения стержня, при котором возможен переход от пассивной бифуркации к активной:

$$B_{red}(w,t) = \frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2} \cdot B_0. \quad (4.19)$$

Приведенная переменная во времени при заданной влажности древесины жесткость сечения стержня в соответствии с главой 2 определяется по формуле:

$$B_{red}(w,t) = \frac{2 \cdot I \cdot \sqrt{6 \cdot (1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 + 2.25} - 1.5}{(1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 \cdot \varepsilon(t_0) \cdot (1 + b \cdot t^{0.21})}, \quad (4.20)$$

где $\varepsilon(t_0, t)$ - относительная деформация к моменту наблюдения t_0 , устанавливаемая с учетом влияния возраста материала, его свойств старения, режима и длительности загрузки (для рассматриваемой рамы принято $\varepsilon(t_0) = \frac{P}{E \cdot A}$; b - параметр, зависящий от влажности древесины (w)).

Для рамы, приведенной на рис. 4.2 при значении параметра нагрузки $\alpha=0,7$:

$$\frac{2 \cdot l \cdot \sqrt{6 \cdot (1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 + 2.25} - 1.5}{(1 - 0.913 \cdot t^{0.38})^2 \cdot \varepsilon(t_0) \cdot (1 + b \cdot t^{0.21})} = \frac{4,4^2}{4,65^2} \cdot B_0 = 0,8954 \cdot B_0. \quad (4.21)$$

Решив уравнение (4.21), приняв влажность $w=12\%$, определим время $t=63$ сут, через которое стойка рамы 1 перейдет к активной бифуркации. Можно сказать, что через время $t=63$ сут. критическая сила для крайней стойки рамы (см. рис. 4.2) будет равна $P_{кр,1} = \frac{19,36 \cdot E \cdot I}{l^2}$.

4.3 Определения жесткости стержня в условиях длительного силового нагружения и переменной влажности

Для учета изменения влажности древесины по глубине образца рассмотрим процесс диффузии паров из атмосферы в тело стержневого элемента из древесины. Коэффициент влагопроводности:

$$q_{m,t} = -\alpha_m \cdot p_0 \cdot \frac{du}{dx}. \quad (4.22)$$

где $u_v = u \cdot p_0$.

На движение влаги влияет действие градиента температуры ∇t . Интенсивность этого движения характеризуется уравнением:

$$q_{m,t} = -\alpha_m \cdot p_0 \cdot \delta \cdot \nabla t, \quad (4.23)$$

где d – коэффициент термовлагопроводности; ∇t – температурный градиент в древесине, представляющий собой перепад температуры, приходящийся на единицу длины, $^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Уравнение (4.23) определяет плотность потока влаги в древесине только под действием градиента температуры при постоянном влагосодержании и давлении. При термовлагопроводности движение влаги всегда направлено в сторону понижения температуры.

В общем случае, когда действуют обе движущие силы влагопереноса, их эффект суммируется и обобщенное уравнение влагопереноса имеет вид:

$$q_{m,t} = -\alpha_m \cdot p_0 \cdot (\delta \cdot \nabla t + \nabla u). \quad (4.24)$$

На рисунке 4.7 представлено распределение влаги по сечению стержневого элемента из древесины.

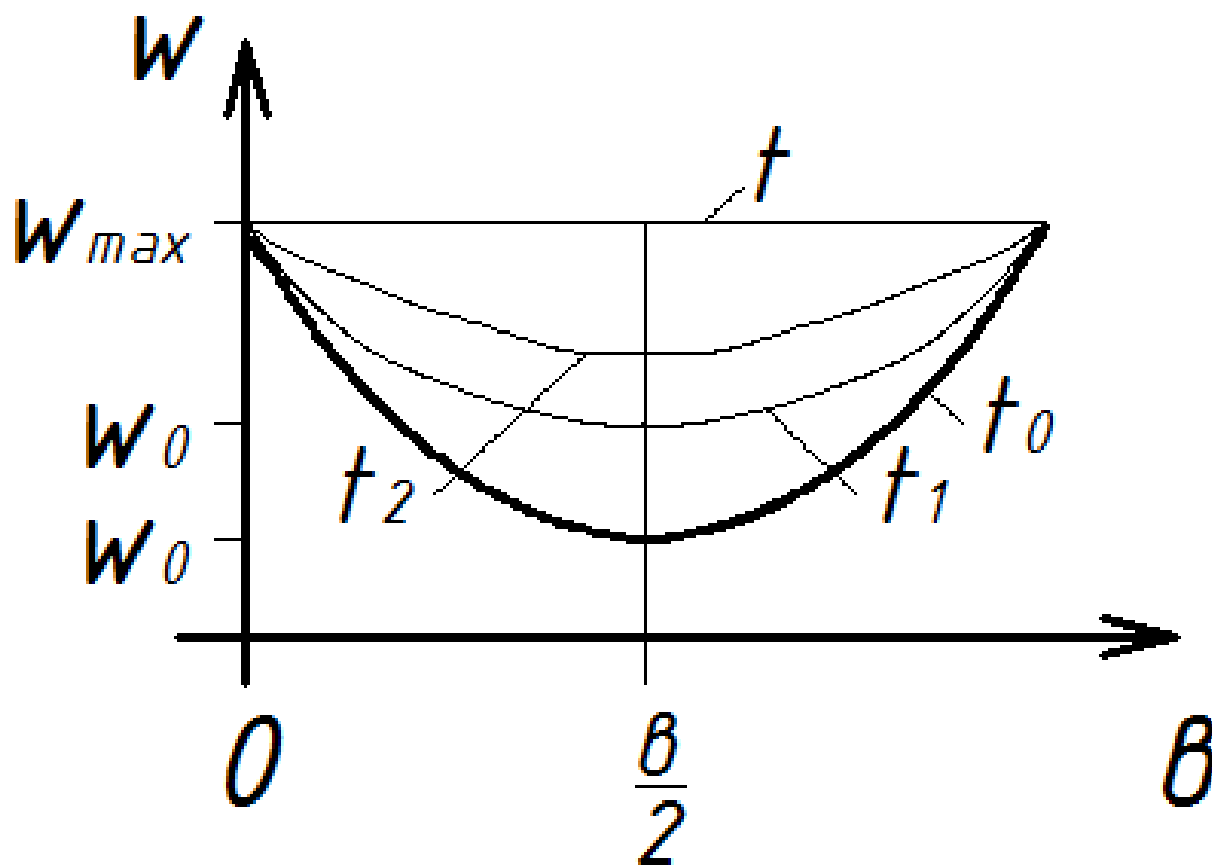


Рисунок 4.7 - Распределение влаги по образцу из древесины во времени

Из рисунка видно, что распределение влаги по образцу из древесины изменяется во времени. В начальный момент увлажнения при $t=t_0$ максимально увлажняется поверхность, контактирующая с окружающей средой приобретает влажность w_{max} , которая зависит от влажности и окружающей среды и свойств древесины (для большинства видов древесины $w_{max} \leq 30\%$). В указанный момент времени в геометрическом центре сечения влажность не изменяется. Со временем влажность распределяется по сечению равномерно и к моменту времени t составляет w_{max} для всех слоев стержневого элемента из древесины.

Непосредственное применение уравнений механического состояния для описания напряженно-деформированного состояния тел, материалы которых деформируются нелинейно и с запозданием, встречает в общем случае математические трудности.

Математические трудности значительно снижаются при решении поставленных задач, если применить метод интегральных оценок, в основу которого положено использование интегрального модуля деформаций.

Для определения значений интегрального модуля деформации рассматриваем сжато-изгибаемый деревянный элемент. Такой элемент имеет неоднородное напряженно-деформированное состояние. Нормальные напряжения меняются по высоте сечения. В случае сжатого по всей высоте сечения элемента напряжения меняются от определенного σ_{min} до максимального σ_{max} одинакового знака, при наличии растянутой зоны напряжения меняются от какого-то отрицательного значения растягивающих напряжений σ_{min} до какого-то положительного значения сжимающих напряжений σ_{max} , переходя через нулевое значение напряжений (см. рис. 4.7).

Оценивая реальную деформативность элементов в каждом дискретном слое, уравнение механического состояния материалов $\varepsilon(\sigma, t_0, t)$, независимо от характера нелинейности и термодинамического содержания, записывается в виде [30]:

$$\varepsilon_{ин}(x, z, t) = \frac{\sigma(x, z, t)}{E_{ин}(x, z, t)}, \quad (4.25)$$

$E_{ин}(x, t)$ – искомый интегральный модуль деформаций для сечения с абсциссой x .

Записываем отклонение значений реальных деформаций ε и деформаций $\varepsilon_{ин}$, определенных с помощью $E_{ин}(x, t)$:

$$\Delta = \varepsilon \cdot [\sigma(z, x, t), t_0, t] - \varepsilon_{ин} \cdot [\sigma(z, x, t), t_0, t] \neq 0. \quad (4.26)$$

Принимая нелинейную зависимость σ от ε , получим:

$$E_{ин}(x, t) = \frac{\int_p^q (E_0 \varepsilon^a(x, z, t) - \frac{E_0^2}{4 \cdot \sigma_{ПП}} \cdot \varepsilon^{a^2}(x, z, t))^2 dz}{\int_p^q \varepsilon^a(x, z, t) (E_0 \varepsilon^a(x, z, t) - \frac{E_0^2}{4 \cdot \sigma_{ПП}} \varepsilon^{a^2}(x, z, t)) dz}. \quad (4.27)$$

Суть интегральной оценки состоит в минимизации отклонения, которая осуществляется для сечения в целом.

4.4 Исследование устойчивости деревянных элементов конструктивной системы с центрально сжатыми стойками из древесины

Используя критерий (4.19), для рассматриваемой рамы было определено изменение характера потери устойчивости стоек при различных значениях параметра нагрузки $\alpha=0,5$; $\alpha=0,6$; $\alpha=0,7$; $\alpha=0,8$; $\alpha=0,9$ (рис.4.2) и при изменении жесткости стоек. Жесткость $B_{red}(w, t)$ определялась по формуле (4.20). Результаты такого расчета представлены на рис. 4.8 – 4.11. Из рисунков видно, что увеличение нагрузок на крайние стойки 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.

Сопоставляя графики « $\alpha - t$ » и « $\alpha - w$ » при влажности 12%, 20% и 30% (соответственно кривые 1, 2, 3) можно сделать вывод о том, что учет влажности древесины вносит существенные коррективы в оценку устойчивости стержневых элементов из древесины и конструктивных систем в целом.

Численными исследованиями устойчивости элементов из древесины при силовом и средовом нагружении установлено существенное (до 20%) влияние на время t перехода от пассивной бифуркации к активной сжатых стержневых элементов конструктивных систем из древесины.

Далее с использованием критерия (4.19) для рассматриваемой рамы было определено изменение характера потери устойчивости стоек при различных значениях параметра нагрузки ($\alpha=0,5$; $\alpha=0,6$; $\alpha=0,7$; $\alpha=0,8$; $\alpha=0,9$) в условиях повышенной влажности для элементов из различных пород древесины. Результаты такого расчета представлены на рис. 4.16.

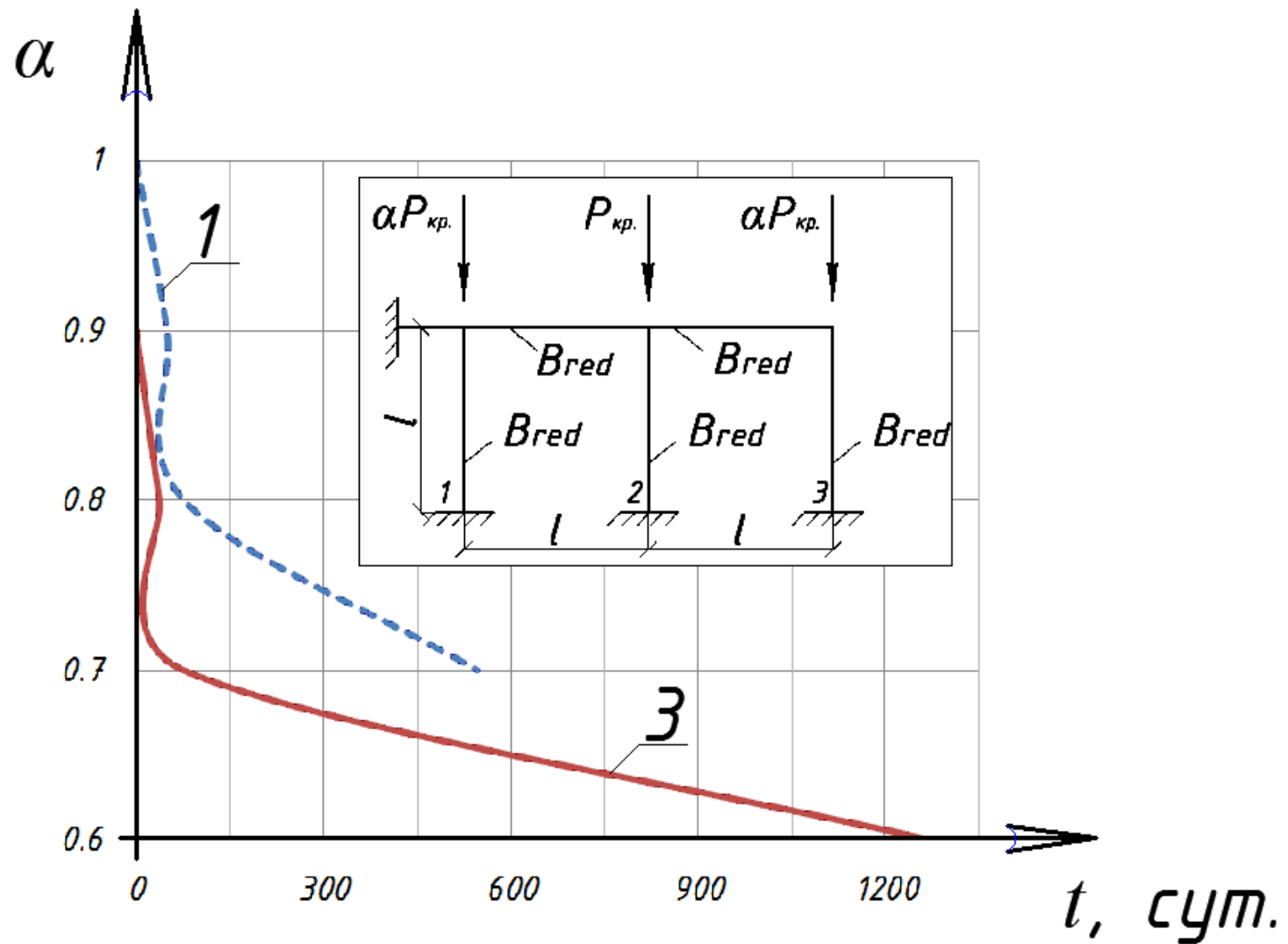


Рисунок 4.8 - Изменение характера потери устойчивости крайних стоек(1,3) во времени при различных значениях параметра α

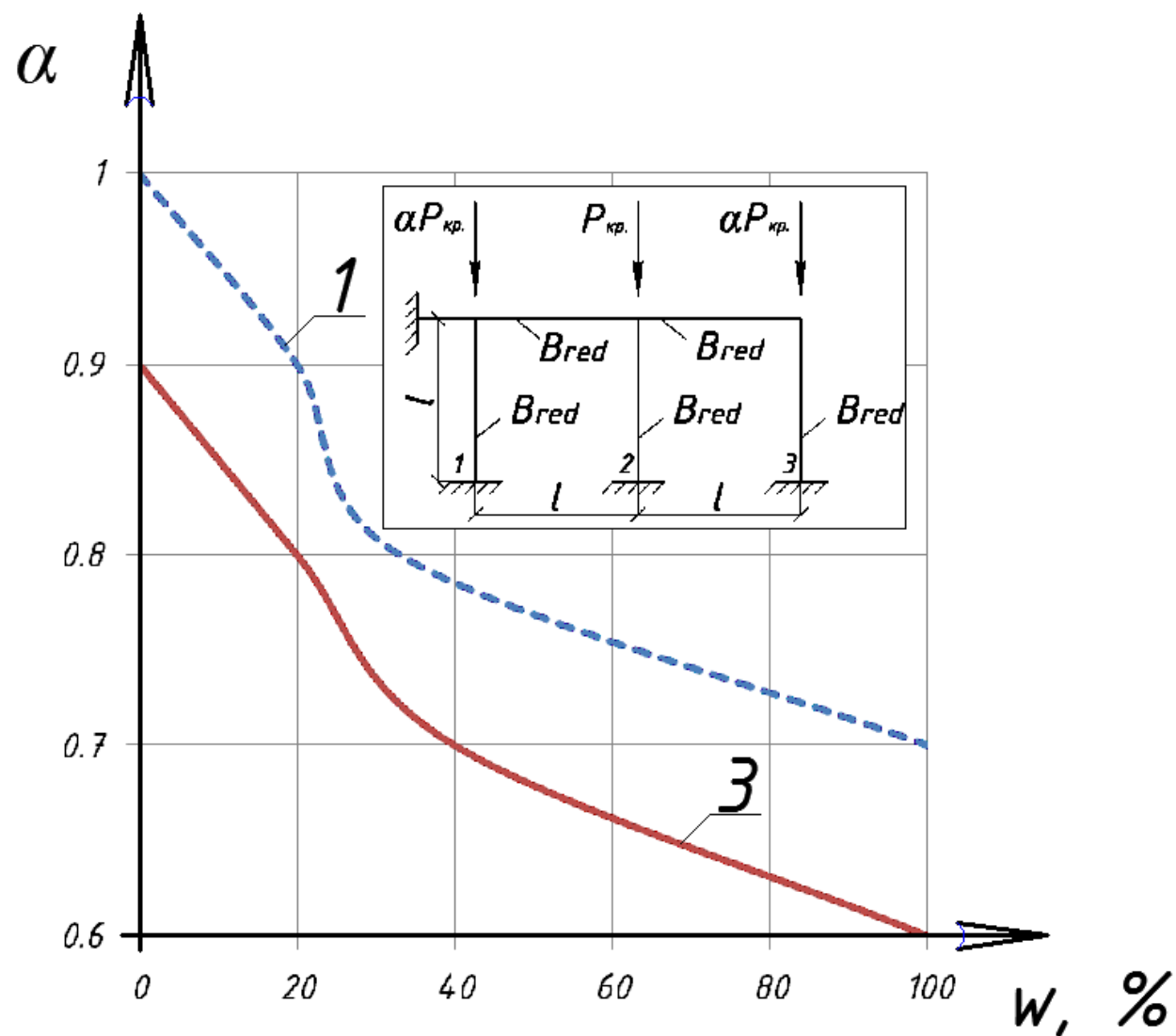


Рисунок 4.9 - Изменение характера потери устойчивости крайних стоек при изменении их влажности при различных значениях параметра α

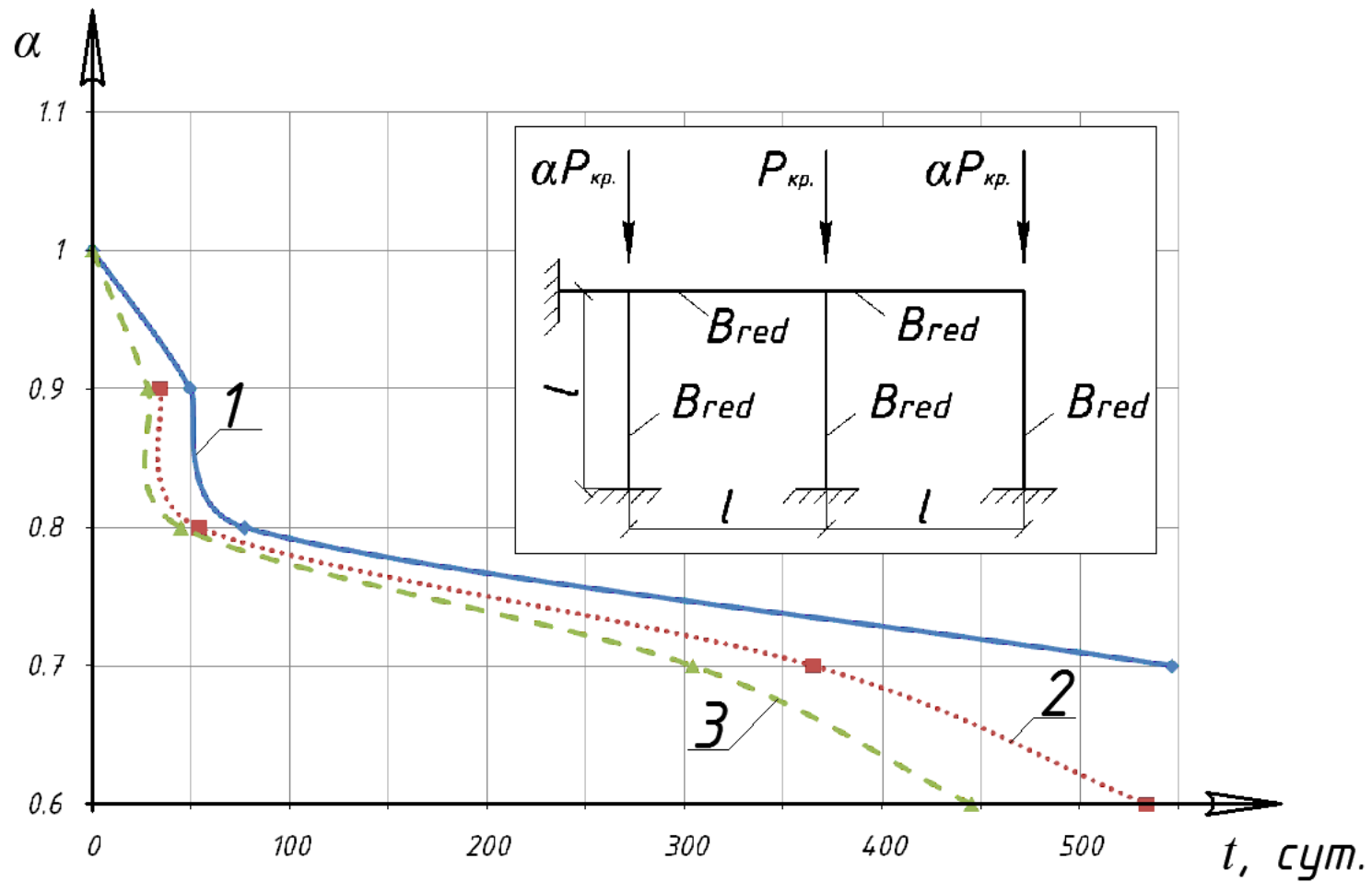


Рисунок 4.10 - Изменение характера потери устойчивости крайней левой стойки рамы при различных значениях параметра α во времени в зависимости от влажности образца w : 1 - $w = 12\%$; 2- $w = 20\%$; 3 - $w = 30\%$

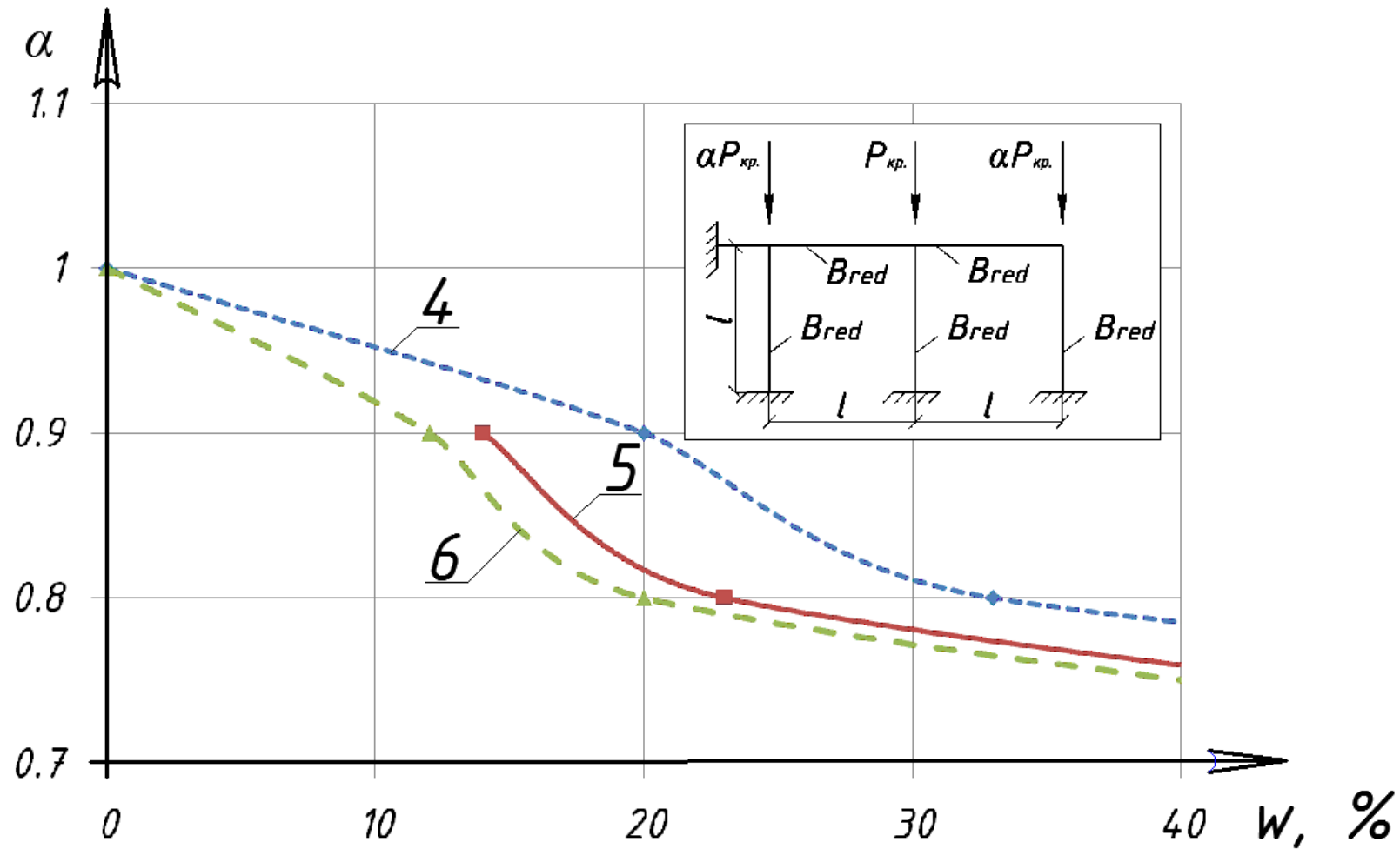


Рисунок 4.11 - Изменение характера потери устойчивости крайней левой стойки рамы при различных значениях параметра α при изменении влажности в зависимости от времени нагружения t : 4 – $t=0$ сут; 5 – $t=200$ сут; 6 – $t=2200$ сут

Для анализа представленных выше графиков рассмотрим изменение формы потери устойчивости стоек рамы во времени при $\alpha=0,8$ (рис. 4.12-4.14).

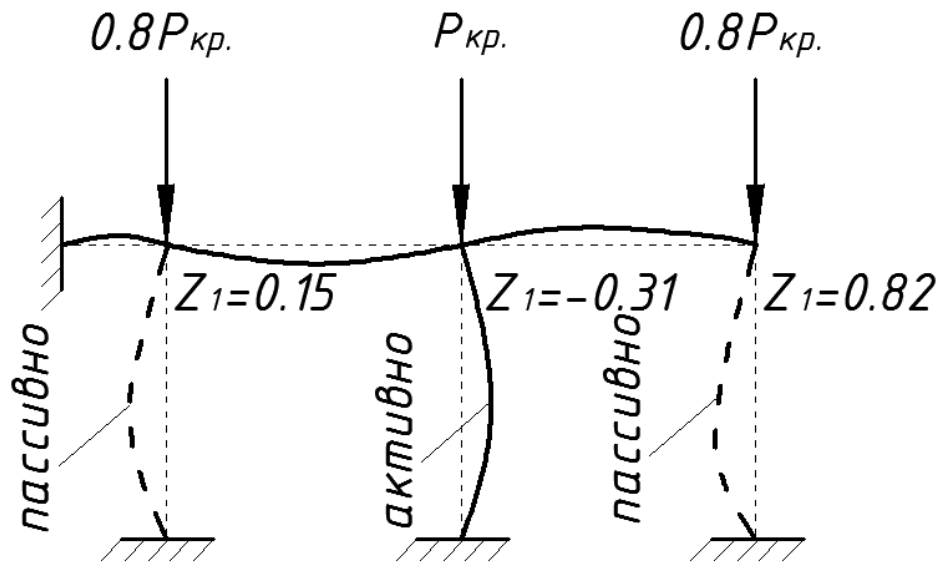


Рисунок 4.12 - Изменение формы потери устойчивости крайних стоек рамы при значении параметра $\alpha=0,8$ и влажности 12% во времени от $t = 0$ до $t = 36$ сут

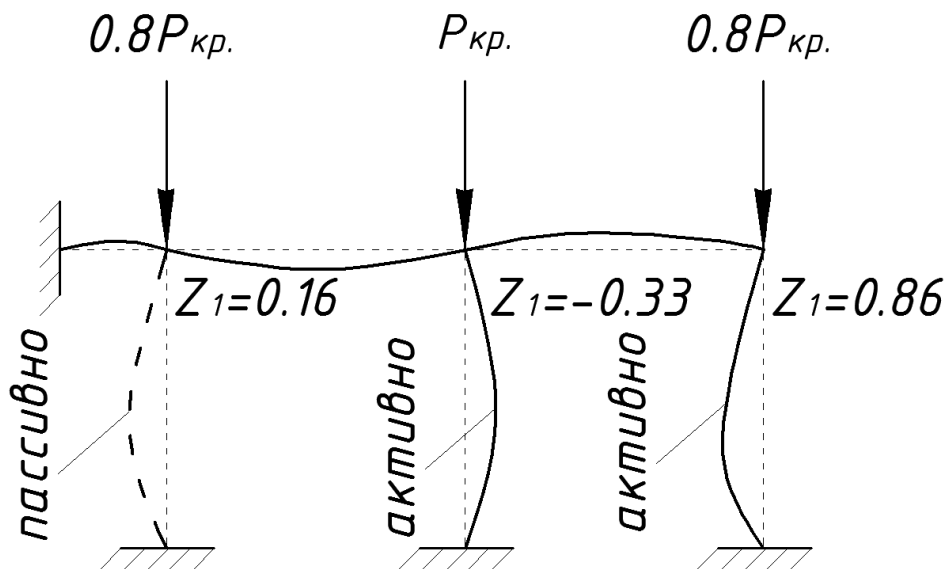


Рисунок 4.13 - Изменение формы потери устойчивости крайних стоек рамы при значении параметра $\alpha=0,8$ и влажности 12% во времени от $t = 36$ сут. до $t = 132$ суток

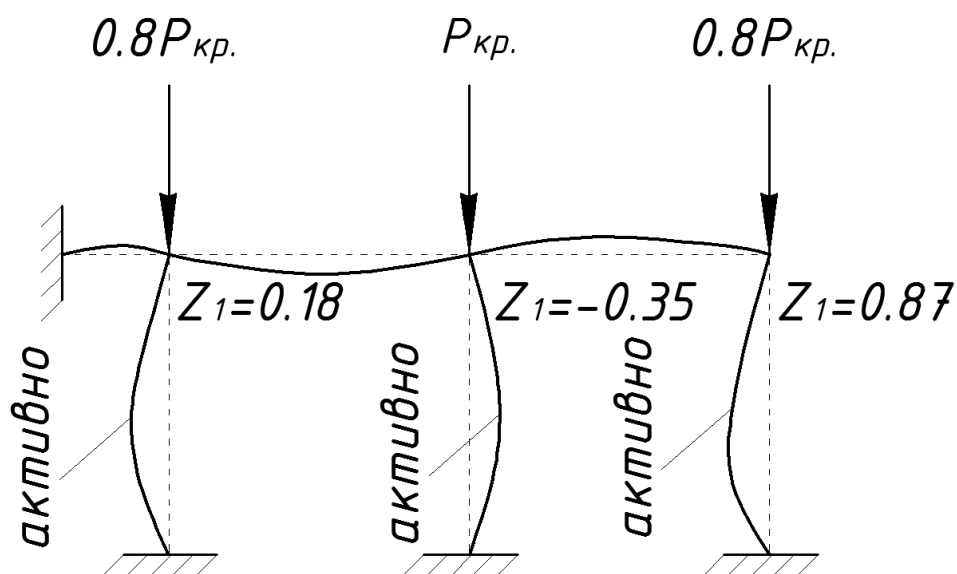


Рисунок 4.14 - Изменение формы потери устойчивости крайних стоек рамы при значении параметра $\alpha=0,8$ и влажности 12% во времени при $t > 132$ суток

Аналогичный анализ изменения формы потери устойчивости при более высокой влажности $w=25\%$, $w=40\%$ показан на рис. 4.13.

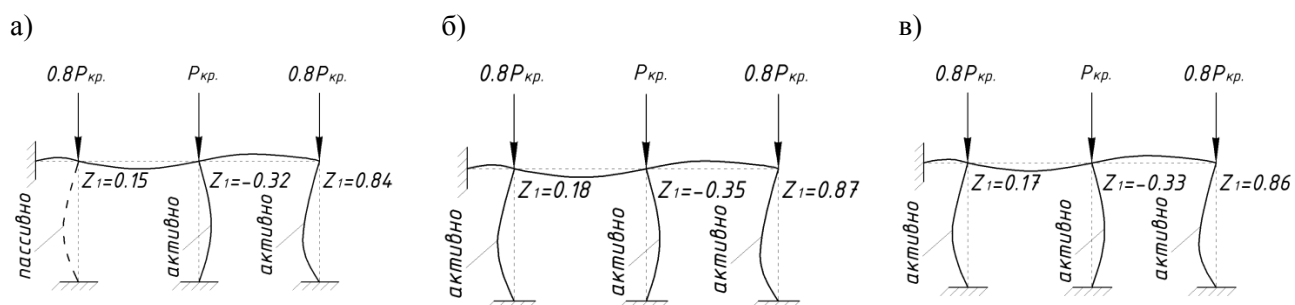


Рисунок 4.15 -Изменение формы потери устойчивости крайних стоек рамы при значении параметра $\alpha=0,8$ и влажности 25% во времени: а) от $t = 0$ до $t = 94$ сут; б) при $t > 94$ сут.; в) при влажности более 30%

Механизм возникновения активной и пассивной бифуркации во времени наглядно можно проследить по рис. 4.12-4.15, 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 $A_1(M_i, Q_i) > 0$, $A_2(M_i, Q_i) < 0$, $A_3(M_i, Q_i) > 0$. 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.

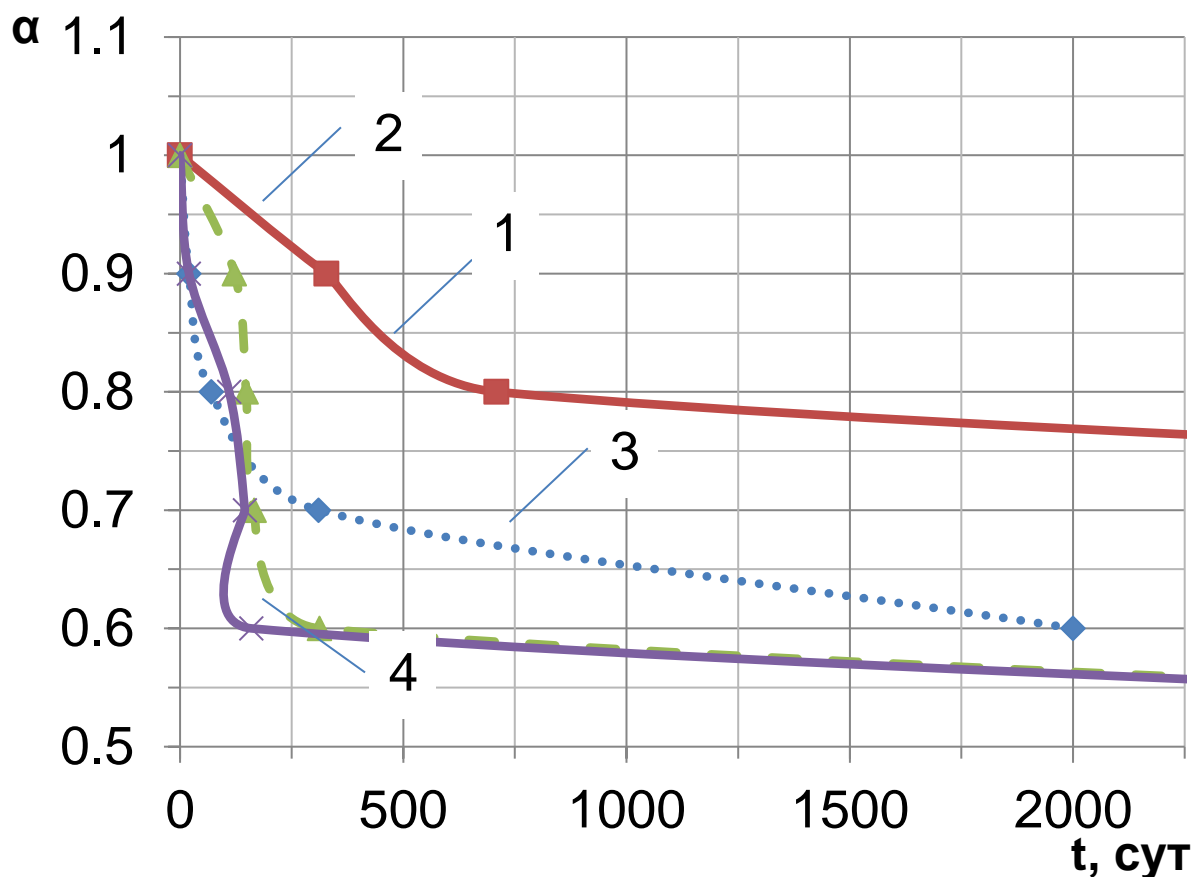


Рисунок 4.16 - Изменение характера потери устойчивости крайней левой стойки рамы при различных значениях параметра α в зависимости от времени нагружения в условиях повышенной влажности для различных пород древесины: 1 – сосна, 2 – дуб, 3 – береза, 4 – ясень

На основе численного исследования (см. рис. 4.16) можно сделать следующий вывод: не смотря на то, что из проанализированных центрально сжатых элементов из древесины наиболее прочными являются элементы из ясеня,

для применения в условиях повышенной влажности наиболее эффективны элементы из хвойных пород деревьев (например, из сосны). Это связано с тем, что силовое и средовое нагружение влияет в большей степени на центрально сжатые элементы из древесины с более высокими показателями физико-механических свойств.

4.5 Особенности алгоритмизации задач расчета устойчивости стержней в конструктивных системах

1. Определяем основную и эквивалентную систему метода перемещений.
2. Записываем однородную систему уравнений.
3. Определяем детерминант системы.
4. Определяем неизвестные углы поворота и смещения узлов Z_1, Z_2, Z_n . В исследуемой стержневой системе выполняем построение эпюр внутренних усилий: изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.
5. Методом итераций для каждого стержневого элемента конструктивной системы определяем начальный параметр векового уравнения ν_{i0} , при котором детерминант устойчивости равен 0.
6. Выражаем начальный параметр векового уравнения при заданном постоянном значении нагрузки ($t=0$) и фиксированном значении влажности древесины ($w=12\%$) через сжимающую силу, длину и жесткость стержня.
7. Вычисляем работу всех сжатых стержней в процессе изгиба $A_i(M_i, Q_i)$, определяем вид бифуркации отдельных элементов и всей системы в целом.
8. Критерий $A_i(M_i, Q_i) < 0$ определяет *активную* потерю устойчивости стержня в конструктивной системе. Критерий $A_i(M_i, Q_i) > 0$ становится признаком *пассивной* потери устойчивости.
9. Определяем значение параметра векового уравнения ν_i , при котором каждый отдельный стержень системы перейдет к активной бифуркации, из выражения:

$$A_i(M_i, Q_i) = 0. \quad (4.28)$$

10. Записываем значение параметра векового уравнения v_i при варьировании влажности и времени:

$$v_i = 1 \cdot \sqrt{\frac{P_i}{B_{red}(w,t)}}, \quad (i = 1, 2, 3 \dots n), \quad (4.29)$$

где $B_{red}(w, t)$ – приведенная, переменная во времени (t) и влажности древесины (w) жесткость сечения стержня; v_i – параметр векового уравнения.

11. Определяем приведенную переменную при деградиционных свойствах среды жесткость сечения стержня по экспериментальным или теоретическим данным, например, по формуле (2.38).

12. Записываем критерий устойчивости отдельного стержня конструктивной системы при силовом нагружении и варьировании влажности:

$$\frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2} = \frac{B_0}{B_{red}(w, t)}. \quad (4.30)$$

13. В случаях, когда уравнение (4.6) имеет действительные корни, вследствие изменения жесткости стержня во времени, соответствующий элемент конструктивной системы может перейти от пассивного типа бифуркации к активному.

4.6 Выводы по главе 4

Приведены результаты исследований анализа живучести конструктивных систем вследствие выключения из работы одного из несущих элементов, вызванное потерей его устойчивости.

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.

Свободную длину стоек рам, которая согласно СП[140] используется при проверке прочности их сечений, следует определять, учитывая возможность активного и пассивного характера потери устойчивости.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аистов, Н.Н. Испытание статической нагрузкой строительных конструкций, их элементов и моделей / Н.Н.Аистов.- М.; Л.: Наркомхоз РСФСР, 1938.– 240 с.
2. Александров, А.В., Потапов В.Д. Сопротивление материалов. М.: Высш. Шк., 2000-560 с.
3. Александров, А. В. О расчете стержневых конструкций на устойчивость [Текст]/ Александров А. В., Травуш В. И., Матвеев А. В.//Промышленное и гражданское строительство, 2002. - №3. – С.16-20.
4. Александров, А.В. Исследование устойчивости конструкций арочного покрытия зала с использованием критериев выявления наиболее опасных элементов/ А.В. Александров, А.В., В.И.Травуш, А.В. Матвеев// Российская академия архитектуры и строительных наук РААСН. Выпуск 8. – М.: 2004, с.14-21.
5. Александров, А.В., Лашеников Б.Я., Шапошников Н.Н. Строительная механика. М.: Высш.шк., 1986.
6. Александров, А.В., Матвеев А.В. Критерии выявления наиболее опасных элементов и их использование в задачах устойчивости конструкций. Четвертая научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». Труды. М.: МИИТ, 2003, с. III-1 - III-2.
7. Александров, А.В., Матвеев А.В. Предельная нагрузка для сжатых и сжато-изогнутых стержней в упруго-пластической стадии. Вестник МИИТа, №3. М.: МИИТ, 2000, с. 103-110
8. Александров, А.В., Потапов В.Д. Сопротивление материалов. Основы теории упругости и пластичности, М.: Высшая школа, 2002 — 400 с.
9. Арленинов, Д.К. Влияние ползучести древесины на напряженное состояние деревянной рамы/ Д.К. Арленинов, М.М. Борисова, Р.В. Крылов. – Приволжский научный журнал, 2014. - №2. – С. 71-74.
10. Арленинов, Д.К. Влияние ползучести древесины на напряженное

состояние деревянных ферм/ Д.К. Арленинов, Э.Н. Мингазова. – Приволжский научный журнал, 2013. - №2(26). – С. 13-16.

11. Арленинов, Д.К. Влияние уровня напряжении на ползучесть древесины/ Д.К. Арленинов, Д.А. Беккер. – Известие высших учебных заведений. Лесной журнал, 2015. Т.6. - №6(348). – С. 128-137.

12. Арленинов, Д.К. Инженерный метод учета ползучести древесины при определении прогибов/ Д.К. Арленинов// Вестник МГСУ, 2011. - №1-2. – С. 147-149.

13. Арленинов, Д.К. О новом нормативном значении модуля упругости древесины/ Д.К. Арленинов// Промышленное и гражданское строительство, 2013. - №3. – С. 19-20.

14. Арленинов, Д.К. О расчете деревянных конструкций по деформированной схеме/ Д.К. Арленинов// Промышленное и гражданское строительство. - 2016. - №1. – С. 43-46.

15. Арленинов, Д.К. Переменный модуль упругости древесины/ Д.К. Арленинов, П.Д. Арленинов// Вестник МГСУ. - 2011. - №1-2. – С. 150-152.

16. Арленинов, Д.К. Расчетная оценка прогибов деревянных балок при длительно йнагрузке/ Д.К. Арленинов// Промышленное и гражданское строительство, 2012. - №11. – С. 40-41.

17. Арленинов, Д.К. Учет ползучести древесины при расчете деревянных конструкций/ Д.К. Арленинов// Деревообрабатывающая промышленность. - 2008. - №2. – С. 10-11.

18. Арутюнян, Н.Х. Теория ползучести неоднородных тел / Н.Х.Арутюнян, В.Б.Колмановский.- М.: Наука, 1983.– 336 с.

19. Ашкенази, Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. - М.:Стройиздат, 1978. -220с.

20. Базаров, С.М. Движение материала древесины в вязкотекучем состоянии / С.М.Базаров, Н.И.Семенова.- СПб.: СПбГЛТА, 2007.– 68 с.

21. Бельский, Г.Е. Устойчивость центрально сжатых стержней и рам в упругопластической стадии / Г.Е.Бельский // Расчет конструкций работающих в упругопластической стадии: Сб. тр. ЦНИИСК.-М.: Госстройиздат, 1961.- Вып. 7.- С. 239-267.
22. Белянкин, Ф.П. Длительное сопротивление дерева / Ф.П. Белянкин.- М.: Госстройиздат, 1934.- 218 с.
23. Белянкин, Ф.П. Прочность и деформативность деревянных стержней при центральном, внецентренном сжатии и чистом изгибе / Ф.П.Белянкин, В.Ф.Яценко.- Киев.: АН УССР, 1960.- 86 с.
24. Бойтемиров, Ф.А, Головина В. М., Улицкая Э. М. Расчет конструкций из дерева и пластмасс: учебное пособие. – М.: Издательство Академия, 2007. – 267 с.
25. Бойтемиров, Ф.А. Исследование работы деревянных армированных балок в условиях Чукотки/ Ф.А. Бойтемиров. Естественные и технические науки, 2015. - №4(82). – С. 243-244.
26. Бойтемиров, Ф.А. Конструкции из дерева и пластмасс: учебное пособие. – М.: Издательство Академия, 2013. – 288 с.
27. Бойтемиров, Ф.А. Экспериментальное исследование несущей способности и деформативности конструкции повышенной коррозионной стойкости и предела огнестойкости/ Ф.А. Бойтемиров. Естественные и технические науки, 2015. - №2(80). – С. 133-135.
28. Бойтемиров, Ф.А. Экспериментальное исследование совместной работы вклеенных стальных стержней в деревянных конструкциях/ Ф.А. Бойтемиров. Научное обозрение, 2014. - №7-1. – С. 214-218.
29. Болотин, В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. - М.: Физматизм, 1961.
30. Бондаренко В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетон / В.М.Бондаренко, С.В.Бондаренко.– М.: Стройиздат, 1982.– 287 с.
31. Боровиков, А.М. Справочник по древесине / А.М.Боровиков, Боровиков, А.М. Влияние температуры и влажности на

- упругость, вязкость и пластичность древесины: дис. канд. техн. наук: 05.21.05 / А.М. Боровиков.- Воронеж, 1970.-310 с.
32. Бронский, А.П. Явление последействия в твердом теле / А.П.Бронский // Прикладная математика и механика, т.5, вып.1, М.: АН СССР, 1941.– С. 31-56.
33. Бунатян, Л.Б. Устойчивость тонкостенных стержней с учетом ползучести материала // Л.Б.Бунатян / Изв. Академии Наук АССР. Физ.-мат, ест. и техн. науки.- Т.6.- №2.- С. 43-53.
34. Ванюшенков, М.Г. Определение критической сжимающей нагрузки упругих тонких пластинок методом начальных функций/ М.Г. Ванюшенков, А.Ю. Ушаков. Промышленное и гражданское строительство, 2010. - №11. – С. 71-73.
35. Ванюшенков, М.Г. Соотношение обобщенной ортогональности и их использование при расчете сжато-изогнутых пластинок/ М.Г. Ванюшенков, А.Ю. Ушаков. Строительная механика и расчет сооружений, 2006. - №6. – С. 23-26.
36. Вареник, А.С. Устойчивость сжатых элементов деревянных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.С.Вареник.- СПб, 1994.- 22 с.
37. Вареник, К.А. Аппроксимация диаграммы деформирования древесины / К.А.Вареник // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер.: Технические науки. 2013.- №75.- С. 60-64.
38. Вареник, К.А. Длительная несущая способность деревянных конструкций / К.А.Вареник, А.С.Вареник // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.- 2014.- №2.- С. 23-31.
39. Вареник, К.А. Нелинейная ползучесть древесины / К.А.Вареник // Фундаментальные исследования. – 2014. – №9 (часть 8).– С. 1653-1657.
40. Вареник, К.А. О ползучести древесины / К.А.Вареник, А.С.Вареник // Современные проблемы науки и образования- 2014- №2 .- С. 47-51.
41. Вареник, К.А. Теоретический анализ нормативного метода расчета 20 сжато-изогнутых деревянных конструкций / К.А.Вареник // Вестник гражданских инженеров № 5 (34) СПбГАСУ Санкт-Петербург. 2012.- С. 55-58.

42. Вареник, К.А. Устойчивость деревянных стержней при сжатии силами, приложенными с неравными эксцентриситетами / К.А.Вареник, А.С.Вареник // Вестник НовГУ.- 2014,- №81.- С. 31-35.
43. Вареник, К.А. Устойчивость сжатых деревянных конструкций с учетом мгновенной нелинейности и нелинейной ползучести / К.А.Вареник, А.С.Вареник, Р.С. Санжаровский // Научное обозрение.- 2014,- №8(2).- С. 572575.
44. Ведяков, И.И. Перспективы совершенствования норм проектирования деревянных конструкций [Текст]/ И.И. Ведяков, А.А. Погорельцев, К.П. Пятикрестовский// Промышленное и гражданское строительство. - 2015. - № 4. - С. 28-32.
45. Верюжский Ю.В., Голышев А.Б., Колчунов Вл.И., Ключева Н.В., Лисицын Б.М., Машков И.Л., Яковенко И.А. Справочное пособие по строительной механике. В двух томах. Том I: Учебное пособие. - М.: Издательство АСВ, 2014. – 640 с.
46. Волынский, В.Н. Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины / В.Н.Волынский.– Архангельск: АГТУ, 2000.– 196 с.
47. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С.Вольмир.-М.: Наука, 1967.– 984 с.
48. Гвоздев, А.А. Ползучесть бетона и пути ее исследования / А.А.Гвоздев. // В кн.: Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов.– М., 1955.– С. 126-137.
49. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях.: Научное издание. -М.: Изд-во Ассоциации строительных ВУЗов. 2004. 216с.
50. Гениев Г.А., Мамаева Г.В., Пятикрестовский К.П. Моделирование процесса деформирования и расчет прочности деревянных элементов при циклических нагружениях. Журнал «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» ВНИИТПИ 2004г., №3 с. 11-14.

51. Гениев Г.А., Пятикрестовский К.П. Вопросы длительной и динамической прочности анизотропных конструкционных материалов (брошюра). ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, М. 2000г. 38с.
52. Гениев Г.А., Пятикрестовский К.П. Вопросы длительной прочности сборных железобетонных оболочек / Труды международной научной конференции «Архитектура оболочек и прочностной расчет тонкостенных стержневых конструкций и машиностроительных конструкций сложной формы» - М.- 2001. 70-78с.
53. Горячевский О.С. Исследование устойчивости прямоугольных пластин с использованием программного комплекса ANSYS MECHANICAL 14.5/ О.С. Горячевский, А.Ю. Ушаков. Научное обозрение, 2015. - №8. – С. 51-55.
54. Громацкий, В.А. Об оценке надежности элементов деревянных конструкций/ В.А. Громацкий, С.Б. Турковский, М.А. Филимонов. Строительная механика и расчет сооружений, 2011. - №6. – С. 66-73.
55. Губенко, А.Б. Продольный изгиб сплошных деревянных стержней / А.Б.Губенко, В.П. Бусыгин // Проект и стандарт, 1935.– № 11.- С. 20-24.
56. Гурьев А.Ю. Совершенствование расчета геодезических куполов из клееных деревянных элементов/ А.Ю. Гурьев, Б.В. Лабудин, Н. Ждралович// Строительная наука-XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону сборник трудов международной научно-технической конференции (Посвящается 55-летию кафедры инженерных конструкций и архитектуры ИСиА, 20-летию российско-норвежского проекта по подготовке специалистов для операций с недвижимостью и 5-летию образования САФУ), 2015. - С. 103-110.
57. Дмитриев, И.К. Исследование деформации стержне-вантовой арки/ И.К. Дмитриев. – Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2015. - №5. – С. 72-77.
58. Дмитриев, И.К. К вопросу возведения экспериментального стержне-вантового купола/ И.К. Дмитриев, К.Г. Петухова. – Промышленное и гражданское

строительство, 2012. - №12. – С. 26-27.

59. Дмитриев, И.К. Результаты исследования несущей способности стержне-вантовой гирлянды и формы оболочек на ее основе/ И.К. Дмитриев. – Промышленное и гражданское строительство, 2013. - №9. – С. 9-11.

60. Дмитриев, И.К. Экспериментальное исследование арочной гирлянды/ И.К. Дмитриев. – Промышленное и гражданское строительство, 2014. - №10. – С. 58-61.

61. Дроздова, Л.П. Устойчивость цельных центрально-сжатых элементов деревянных конструкций при длительной нагрузке: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.01 / Л.П.Дроздова.- М., 1978.- 18 с.

62. Зобачева А.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование устойчивости большепролетных деревянных арочных конструкций[Текст]/ А.Ю. Зобачева, Г.Г. Кашеварова, И.Н. Фаизов.// International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, -2012. Т. 8. № 2. - С. 69-81.

63. Зубчанинов В.Г., Колтунов М.А., Майборода В.П. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов. -М.: Машиностроение, 1983. -239 с.

64. Иванов Г.В. Об устойчивости равновесия сжато-изогнутых тонких стержней при неупругих деформациях// ПМТФ. -1961 -№ 3. -С. 74-84.

65. Иванов Ю.М. Современное состояние исследований длительного сопротивления древесины. - В кн.: Исследования прочности и деформативности древесины. М.: Госстройиздат, 1956 - 42-55с.

66. Иванов Ю.М., Баженов В.А. Исследования физических свойств древесины (эластичность, воздухопроницаемость, давление набухания). - М.: Изд. Ак. наук СССР, 1959-75с.

67. Иванов, А.М. Ползучесть древесины: автореф. дис ... д-ра техн. наук / А.М.Иванов.– Москва, 1960.– 49 с.

68. Иванов, Ю.М. Предел пластического течения древесины / Ю.М.Иванов.- 152 2-е изд., перераб. и доп.- М., 1948.- 198 с.

69. Ишлинский, А.Ю. Прикладные задачи механики. В 2-х томах. Том 2. Механика упругих и абсолютно твердых тел / А.Ю.Ишлинский.- М.: Наука, 1986. – 415 с.
70. Каган, М.Е. Экспериментальные исследования работы деревянных стержней на продольный удар / М.Е.Каган, Н.Д.Геня // Изв. вузов. Строительство и архитектура.- 1961.- №3.- С. 33-38.
71. Карельский, А.В. Влияние трещин на напряженно-деформированное состояние клееных деревянных балок/ Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В., Мелехов В.И.//В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения Материалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. 2015.- С. 153-158.
72. Кашеварова, Г.Г. Экспериментально-теоретическое исследование устойчивости и верификация расчетных моделей большепролетных деревянных арок [Текст]/ А.Ю. Зобачева, Г.Г. Кашеварова, И.Н. Фаизов// International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, -2012. Т. 8. № 2. - С. 69-81.
73. Качанов, Л.М. Некоторые вопросы теории ползучести / Л.М.Качанов.– М.– Л.: Гостехиздат, 1949.– 164 с.
74. Квасников, Е.Н. Вопросы длительного сопротивления древесины и конструктивных элементов из дерева и слоистых пластиков: дис.... д-ра техн. наук / Е.Н. Квасников.- Л., 1972.- 329 с.
75. Клименко В.З. Феноменологический подход к расчету сжато-изгибаемых деревянных элементов//Строительная механика и расчет сооружений. 2011. - № 1. - С. 7–11.
76. Ключева, Н.В. Некоторые предложения для конструктивной защиты зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения/ Н.В. Ключева, Н.Б.Андросова // Строительство и реконструкция, 2015.- №4(60). С.72-78.
77. Ключева, Н.В. Влияние коррозионных повреждений элементов на живучесть железобетонных рамно-стержневых систем / Н.В.

Клюева, Н.О. Прасолов, В.И. Колчунов // Успехи строительной механики и теории сооружений. 2010. С. 117-122.

78. Клюева, Н.В. Исследование живучести железобетонных рам при варьировании их топологии / Н.В. Клюева, Н.О. Прасолов // Вестник центрального регионального отделения РААСН.– Воронеж-Липецк. 2008. Вып. 7. С. 205-208.

79. Колтунов, М.А. Ползучесть и релаксация: учеб. пособие для втузов / М.А. Колтунов.- М.: Высшая школа, 1976.- 277 с.

80. Колчунов В.И., Андросова Н.Б., Клюева Н.В., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружения при запроектных воздействиях: Научное издание. - М.: Издательство АСВ, 2014. – 208 с.

81. Колчунов В.И., Андросова Н.Б., Клюева Н.В., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружения при запроектных воздействиях: Научное издание. - М.: Издательство АСВ, 2014. – 208 с.

82. Колчунов В.И., К.П. Пятикрестовский. Особенности расчета деревянных конструкций на прочность по деформациям [Текст]/ В.И. Колчунов, К.П. Пятикрестовский//Строительство и реконструкция, 2013. - №2. С. 25-34.

83. Колчунов В.И., Пятикрестовский К.П., Клюева Н.В. Пространственные конструкции покрытий. Курсовое и дипломное проектирование. Учебное пособие. М.: изд-во АСВ, 2008. 352 с, 122 ил.

84. Колчунов, В.И. Влияние коррозионных повреждений отдельных элементов на устойчивость железобетонных рамно-стержневых систем / В.И. Колчунов, Л.В. Кожаринова, Н.О. Прасолов, Г.А. Добриков // Вестник отделения строительных наук. 2010. Том 1. С. 107-112.

85. Колчунов, В.И. К алгоритмизации задач расчета живучести железобетонных рам при потере устойчивости / В.И. Колчунов, Н.О. Прасолов, Л.В. Кожаринова, О.А. Ветрова // Строительство и реконструкция. 2012. № 6. С. 28-35.

86. Колчунов, В.И. К вопросу алгоритмизации задачи расчета живучести железобетонных конструкций при потере устойчивости / В.И. Колчунов, М.В. Моргунов, Л.В. Кожаринова, Н.О. Прасолов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 12. С. 77-79.
87. Колчунов, В.И. К оценке живучести железобетонных рам при потере устойчивости отдельных элементов / В.И. Колчунов, Н.О. Прасолов, М.В. Моргунов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. №4. С. 40-44.
88. Колчунов, В.И. Метод физических моделей сопротивления железобетона [Текст] / В.И. Колчунов, И.А. Яковенко, Н.В. Ключева // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 51-55.
89. Колчунов, В.И. Экспериментально-теоретические исследования живучести железобетонных рам при потере устойчивости отдельного элемента / В.И. Колчунов, Л.В. Кожаринова, Н.О. Прасолов // Вестник МГСУ. 2011. Том 2, 3. С. 109-115.
90. Колчунов, В.И.. Особенности расчета деревянных конструкций на прочность по деформациям [Текст]/ В.И. Колчунов, К.П. Пятикрестовский//Строительство и реконструкция, 2013. - №2. С. 25-34.
91. Корноухов, Н.В. Прочность и устойчивость стержневых систем /Н.В.Корноухов.– М.: Стройиздат, 1949.- 212 с.
92. Коченов, В.М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций / В.М.Коченов.- М.: Стройиздат, 1953.- 320 с.
93. Кочетков, Д.А. Продольный изгиб цельных деревянных стержней за пределом упругости / Д.А.Кочетков // Проект и стандарт.- 1937.- №3.- С. 26-34.
94. Лабудин, Б.В. Совершенствование методов расчета геодезических куполов из клееной древесины/ Лабудин, Б.В. Губенко Л.А., Гурьев А.Ю// Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

"Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова".
Архангельск, 2016. – 176 с.

95. Леннов, В.Г. Экспериментальное исследование древесины сосны на сжатие и растяжение вдоль волокон с учетом длительного воздействия нагрузок / В.Г.Леннов // Известия вузов. Строительство и архитектура.- 1958.- №2.- С. 147-157.

96. Леонтьев, Н.Л. Техника испытаний древесины / Н.Л.Леонтьев.- М.: Лесная промышленность, 1970.- 160 с.

97. Линьков, В.И. Деформативность соединении деревянных элементов на наклонных ввинченных связях/ В.И. Линьков. – Научно-технический вестник Поволжья, 2013. - №5. – С. 247-250.

98. Линьков, В.И. К вопросу оценки прочности древесины длинномерных элементов/ В.И. Линьков. – Научное обозрение, 2015. - №14. – С. 117-121.

99. Линьков, В.И. Конструкции на основе деревянных элементов составного сечения с соединениями на наклонных металлических стержнях без применения клея/ В.И. Линьков. – Промышленное и гражданское строительство, 2012. - №11. – С. 29-31.

100. Ляхович Л.С. Особые свойства форм потери устойчивости стержней минимальной материалоемкости при ограничении величины критической нагрузки для случаев линейной зависимости моментов инерции сечения и функции цели от варьируемого параметра/ Л.С. Ляхович.//Вестник томского государственного архитектурно-строительного университета, 2011. - №4. – С.106-112.

101. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики / П.А.Лукаш.- М.: Стройиздат, 1978.- 204 с.

102. Макаров, А.А. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане с различными размерами ячеек с учетом податливости узловых соединений/ А.А. Макаров, А.В. Турков. Промышленное и гражданское строительство, 2014. - №10. – С. 27-29.

103. Манченко, М.М. Аналитический расчет сжато-изогнутых стержней в упругопластической стадии при импульсивном нагружении: дис. канд. техн. наук / М.М.Манченко.– С.-Пб.- 2013.- 141 с.
104. Матвеев А.В. Возможности реализации в программных комплексах алгоритмов анализа устойчивости сложных конструкций на основе критериев поиска опасных элементов. Вестник МИИТа. Научно-технический журнал. Выпуск 8.-М.: 2003, с. 103-109.
105. Матвеев А.В. Матрица жесткости элемента естественно закрученного стержня. Вестник МИИТа. Научно-технический журнал. Выпуск 7.-М.: 2002, с. 94-99.
106. Матвеев А.В. Некоторые вопросы создания специализированного программного комплекса для анализа мостовых конструкций. Вестник МИИТа. Научно-технический журнал. Выпуск 7.-М.: 2002, с. 76-83.
107. Назаров, Ю.П. Эффективность несущих клееных деревянных конструкций в сейсмических районах строительства/ Ю.П. Назаров, С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев. Промышленное и гражданское строительство, 2009. - №10. – С.10-13.
108. Орлович, Р.Б. Длительная прочность и деформативность конструкций из современных древесных материалов при основных эксплуатационных воздействиях: автореф. дисс. ... д-ра. техн. наук / Р.Б.Орлович.– Л., 1991.– 50 с.
109. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. Т.1., Т.». - М.: Издательство СКАД СОФТ 2010 - 704с, 672с.
110. Перельмутер, А.В., Сливкер, В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев, ВПП «Компас», 2001, 364-369 с.
111. Погорельцев, А.А. Обоснование нормируемых значений модулей упругости при расчетах деревянных конструкций/ А.А. Погорельцев, К.П. Пятикрестовский// Промышленное и гражданское строительство. - 2013. - № 10. - С. 33-35.

112. Прокопович, И.Е. Прикладная теория ползучести / И.Е.Прокопович, В.А.Зедгенидзе.– М., 1980.– 239 с.
113. Пятикрестовский К.П. Экспериментально-теоретический анализ длительного силового сопротивления цилиндрических оболочек покрытия из древесины с использованием результатов натурных испытаний. В сб. Пространственные конструкции зданий и сооружений. Вып. 12, М: 2009, ООО «Девятка Принт», с.97-105.
114. Пятикрестовский, К.П. Исследование сопоставительных расчетов внецентренно сжатых и сжатого-изгибаемых элементов из древесины (по нормам СНиП II-25-80 и по теории сопротивления материалов)/ К.П. Пятикрестовский// Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. -2014. - № 3 (339). - С. 114-124.
115. Пятикрестовский, К.П. Исследования локальной устойчивости элементов сетчатых оболочек их различных материалов при циклических нагружениях/ К.П. Пятикрестовский, Б.С. Соколов//Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. - 2007. - № 2-14. - С. 114-121.
116. Пятикрестовский, К.П. К вопросу о выборе моделей упругости при расчете деревянных конструкций на прочность и устойчивость и по деформациям. [Текст]/ К.П. Пятикрестовский //Строительная механика и расчет сооружений, 2012. - №6. – С.73-79.
117. Пятикрестовский, К.П.Экспериментальные исследования характера НДС фанерных обшивок в составе пространственных конструкций [Текст]/ К.П. Пятикрестовский, В.И.Травуш//Строительство и реконструкция, 2016. - №1(63). – С.33-39.
118. Пятикрестовский, К.П.Развитие методов расчета деревянных конструкций при сложном напряженном состоянии (часть I)/ К.П. Пятикрестовский// Строительная механика и расчет сооружений. - 2014. - № 6 (257). - С. 6-12.

119. Пятикрестовский, К.П. Нелинейные деформации статически неопределимых деревянных конструкций / К.П.Пятикрестовский, Х.С.Хунагов // Известия вузов. Строительство.- 2013.- №11-12.- С. 21-30.
120. Пятикрестовский, К.П. Нелинейные деформации статически неопределимых деревянных конструкций/ К.П. Пятикрестовский, Х.С. Хунагов// Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2013. - № 11-12 (659-660). - С. 21-30.
121. Пятикрестовский, К.П. О программировании нелинейного метода расчета деревянных конструкций [Текст]/ К.П. Пятикрестовский, В.И.Травуш//Academia. Архитектура и строительство. - 2015. - № 2. - С. 115-119.
122. Пятикрестовский, К.П. О расчете внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов из клееной и цельной древесины/ К.П. Пятикрестовский// Строительная механика и расчет сооружений. - 2013. - № 3 (248). - С. 62-68.
123. Пятикрестовский, К.П. О расчете пространственных конструкций с учетом физической нелинейности / К.П.Пятикрестовский // Современные пространственные конструкции: Справочник.- М.: Высшая школа, 1991.- С. 453-458.
124. Пятикрестовский, К.П. Обоснование зависимостей между интенсивностями напряжений и деформаций для нелинейного расчета деревянных конструкций [Текст]/ К.П. Пятикрестовский //Строительная механика и расчет сооружений, 2011. - №1. – С.62-69.
125. Пятикрестовский, К.П. Обоснование нормируемых значений модулей упругости при расчетах деревянных конструкций. [Текст]/ К.П. Пятикрестовский, А.А. Погорельцев //Промышленное и гражданское строительство, 2013. - №10. – С.33-35.
126. Пятикрестовский, К.П. Развитие методов расчета деревянных конструкций при сложном напряженном состоянии (часть II)/ К.П. Пятикрестовский// Строительная механика и расчет сооружений. - 2015. - № 2 (259). - С. 12-18.

127. Пятикрестовский, К.П. Силовое сопротивление пространственных деревянных конструкций при кратковременных и длительных нагрузках: дис. д-ра техн. наук.- М., 2011.- 320 с.
128. Рабинович, А.И. Поперечный изгиб цельных деревянных стержней / А.И.Рабинович // Исследование прочности и устойчивости деревянных стержней: Сб. ЦНИПС.- М.: Стройиздат, 1940.- С. 57-103.
129. Работнов Ю.Н., Шестериков С.А. Устойчивость стержней и пластинок в условиях ползучести// ПММ. -1957. -Т. 21. -№ 3. -С. 406-412.
130. Ржаницын А.Р. Строительная механика. - М.: Высшая школа. 1982 - 400с.
131. Ржаницын, А.Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени / А.Р.Ржаницын.- М.: Гостехиздат, 1949.- 252 с.
132. Ржаницын, А.Р. Теоретические предпосылки к построению методов расчета деревянных конструкций во времени / А.Р.Ржаницын // Исследования прочности и деформативности древесины: сб. ст.- М., 1956.- С. 21-31.
133. Рощина, С.И. Прочность и деформативность клееных армированных деревянных конструкций при длительном действии нагрузки: дисс. д-ра техн. наук / С.И.Рощина.- М., 2009.- 330 с.
134. Санжаровский, Р.С. Вареник А.С., Вареник К.А. Устойчивость сжатых деревянных конструкций с учетом мгновенной нелинейности и нелинейной ползучести [Текст]//Научное обозрение, 2014. - №8(2). С.572-575.
135. Санжаровский, Р.С. Нелинейная наследственная теория ползучести / Р.С.Санжаровский // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.- 2014.- №1.- С. 63-68.
136. Семенова Н.И. Вязкотекучее состояние материала древесины в тепловом поле тонкого инструмента / Н.И.Семенова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Сборник молодых ученых: вып. II. СПб.: СПбГЛТА, 2007.- С. 103-109.
137. Слицкоухов, Ю.В. Экспериментальные исследования устойчивости внецентренно сжатых деревянных стержней переменного сечения / Ю.В.Слицкоухов,

Л.И.Офицерова // Известия вузов. Строительство и архитектура.- 1976.- №12.- С. 29-32.

138. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лащенников Б.Я., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы. - М.: Стройиздат, 1983-488с.

139. Сморгачев А.А. Безопасность конструкций из клееной древесины на стадии изготовления/ А.А. Сморгачев, С.А. Кереб, К.О. Барановская// Промышленное и гражданское строительство, 2013. - №12, - С.74-75.

140. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.- М., 2011.- 88 с.

141. Способ определения критической силы при потере устойчивости стержня [Текст]: пат. 2121665 Рос. Федерация МПК: 6G 01L 1/00 А/ Коробко В.И., Коробко А.В.; заявитель и патентообладатель Орловская государственная сельскохозяйственная академия. - № 97111503/28; заявл. 09.07.1997; опубл. 10.11.1998, Бюл. №25. – 3 с.: 2 ил.

142. Тамразян, А.Г. Механика ползучести бетона / С.Г.Есаян.- М.: МГСУ, 2012.- 490 с.

143. Тимошенко, С.П. Устойчивости упругих систем / С.П.Тимошенко.– М.-Л.:ОГИЗ, 1946.– 532 с.

144. Травуш В.И., Тимонин Е.М. Деревянные конструкции покрытия общественного центра экспериментального жилого комплекса в г.Горьком. - в сб.: Эффективное использование древесины и древесных материалов в современном строительстве. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. - М., 1980, 102-104с.

145. 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.

146. Травуш, В.И. Устойчивость сжатых стержней из древесины при одновременном проявлении силового и среднего воздействия[Текст]/

В.И.Травуш, В.И. Колчунов, К.О. Дмитриева //Строительная механика и расчет сооружений, 2011. - №1. – С.62-69.

147. Турков А.В. Исследование прогибов частот собственных колебаний составных круглых трансформных пластин/ А.В. Турков, К.В. Марфин. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2013. - №4(334). – С. 66-71.

148. Турков, А.В. Исследование коэффициента жесткости шва для треугольной составной изотропной пластины в зависимости от ее основной частоты колебаний при разной жесткости связи и сдвига/ А.В. Турков, Е.В. Карпова. Строительная механика и расчет сооружений, 2015. - №2(259). – С. 66-69.

149. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с различными размерами ячеек на треугольном плане в зависимости от схемы опирания/ А.В. Турков, А.А. Макаров, Е.С. Волобуева. Строительство и реконструкция, 2015. - №2(58). – С. 46-50.

150. Турков, А.В. Способы учета податливости жесткого защемления при проведении эксперимента/ А.В. Турков, К.В. Марфин. Строительство и реконструкция, 2015. - №1. – С. 42-46.

151. Турков, А.В. Экспериментальные исследования составных круглых пластин на динамические и статические нагрузки/ А.В. Турков, К.В. Марфин. Строительство и реконструкция, 2015. - №3(59). – С. 60-66.

152. Турковский, С.Б. Деревянные конструкции на основе наклонно клеенных стержней. Система ЦНИИСК/ С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2008. - №6. – С. 26-29.

153. Турковский, С.Б. Зависимость состояния клееных деревянных конструкций от влажности окружающего воздуха/ С.Б. Турковский, А.Д. Ломакин, А.А. Погорельцев. Промышленное и гражданское строительство, 2012. - №3. – С. 30-32.

154. Турковский, С.Б. Обобщение результатов исследования и опыта применения сборных клееных деревянных конструкций системы ЦНИИСКА/

- С.Б.Турковский. Деревообрабатывающая промышленность, 2008. - №3. – С. 12-16.
155. Турковский, С.Б. Разработка стандарта «Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Методы проектирования и расчета»/ С.Б. Турковский, И.П. Преображенская, А.А. Погорельцев. Промышленное и гражданское строительство, 2006. - №8. – С. 34-35.
156. Турковский, С.Б. Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно клеенных стержней/ С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев. Промышленное и гражданское строительство, 2007. - №3. – С. 6-7.
157. Турковский, С.Б. Физкультурно-оздоровительные комплексы Москвы с деревянными стропильными системами покрытия/ С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, В.Г. Николаев. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2008. - №8. – С. 70-72.
158. Ушаков А.Ю. Автоматизация проектирования деревянных конструкций в малоэтажном строительстве/ А.Ю. Ушаков, А.И. Долганов. Научное обозрение, 2014. - №7-1. – С. 140-143.
159. Ушаков А.Ю. Исследование влияния действия продольных сжимающих усилий на напряженно-деформированное состояние изогнутой прямоугольной пластинки/ А.Ю. Ушаков, М.Г. Ванюшенков. Научно-технический вестник Поволжья, 2012. - №6. – С. 409-412.
160. Ушаков А.Ю. Расчет тонких упругих пластинок при действии продольных сжимающих сил на устойчивость методом начальных функций/ А.Ю. Ушаков. Промышленное и гражданское строительство, 2014. - №10. – С. 55-58.
161. Фрейдин, А.С. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины / А.С.Фрейдин, К.Т.Вуба.– М.: Лесная промышленность, 1980.– 224 с.
162. Хофф, Н. Продольный изгиб и устойчивость / Н.Хофф.- М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955.- 155 с.
163. Шеховцов, А.С. Исследование напряженно деформированного состояния сжато-изогнутых несущих стержневых элементов деревянных сетчатых куполов и совершенствование их узловых соединений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 /

A.C.Шеховцов.- СПб, 2008.- 152 с.

164. Becker, P. Modellierung des zeit- und feuchteabhängigen Materialverhaltens zur Untersuchung des Langzeittragverhaltens von Druckstäben aus Holz.- Shaker, 2002.- 183 s.

165. Blaß, H.J. Holzbauwerke nach Eurocode 5. Bemessung und Baustoffe. STEP 1 / H.J.Blaß, R.Görlacher, G.Steck.- Düsseldorf: Fachverlag Holz, 1995.- 450 s.

166. Burgers, J.M. First report on viscosity and plasticity / J.M.Burgers.- Amsterdam: Noord-Hollandsche, N. V. 1935.- 256 s. Carlson R.L. Time-depended tangent modulus applied to column creep buckling// J. Appl. Mech. -1956. -Vol. 23. -No. 3. -P. 390-394

167. Carstensen, J. Beiträge zum Biegekriechverhalten von Holz bauteilen unter baupraktischen Bedingungen: diss / J. Carstensen.- Universität Hannover, 1993.- 277 s.

168. Distefano N. Nonlinear processes in engineering / N.Distefano.- N.Y.- London: Academic Press, 1974.- 380 p.

169. Fridley, K.J. Creep behavior model for structural lumber / K.J.Fridley, R.S.Tang, L.A.Solits // Journal of Structural Engineering.- 1992.- № 118.- p. 2261-2277.

170. Fuller, C.E. Applied Mechanics / C.E.Fuller, W.A.Johnston – New-York: J. Wiley, 1919. – 360 p.

171. Gerhards, C.C. Bending creep and load duration of douglas – fir 2 by 4s under constant load for up to 12-plus years / C.C.Gerhards // Wood and Fiber Science.-2000.- №32(4).- p. 489-501.

172. Glos, P. Einfluss der Belastungsdauer auf die Zug – und Druckfestigkeit von Fichten-Brettlamellen / P.Glos, B.Heimeshoff, W.Kelletshofer // Holz als Roh – und Werkstoff 45.- 1987.- S. 243-249.

173. Gressel, P. Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen - Folgerungen für den Formänderungsnachweis in DIN 1052 P.Gressel // Bauen mit Holz, 86.- 1984.- Nr. 4.- S. 216-223.

174. Gressel, P. Zur Vorhersage des langfristigen Formänderungsverhaltens aus

Kurz-Kriechversuchen / P.Gressel // Holz als Roh-und Werkstoff.- 1984.- Nr. 42.- P. 293-301.

175. Hanhijärvi, A. Modelling of creep deformation mechanisms in wood. VTT-Publications 231, VTT, Espoo: Technical Research Center of Finland, 1995

176. Hartnak, R. Langzeittragverhalten von druckbeanspruchten Bauteilen aus Holz: dissertation / R. Hartnak– Univerität Weimar, 2004.– 265 s.

177. Hodgkinson, E. Experimental Researches on the Strength of Pillars of Cast Iron and other Materials / E. Hodgkinson.– Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1840.– pp. 385-456.

178. Hoyle, R.J. Primary creep in douglas-fir beams of commercial size and quality / R.J.Hoyle, M.C.Gziffith, R.Y.Itani // Wood and Fiber Science.- 1985.– №17(3).- P.300-314.

179. Kälšner, B. Strength of a wood column in combined compression and bending with respect to creep / B.Kälšner, B.Noren // Paper 5-9-1, CIB-W18 Meeting 5.– Karlsruhe, 1975.

180. Kármán, Th. Untersuchungen über Knickfestigkeit / Th.Kármán // Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens insbesondere aus den Laboratorien der technischen Hochschulen.- Berlin: Springer.- 1910.- H.81.- P.1-44.

181. Kindereit, E. Experimentelle und analytische Untersuchung des Kriechphänomens von Bauschnittholz. Diss.– Hanover: Inst. f. Bautechnik u. Holzbau d. Univ., 1983.-S. 171.

182. Leaderman, H. Elastic and creep properties of filamentous materials and other highpolymers / H.Leamer.- Washington: The Textile foundation, 1944.– 278 p.

183. Mårtensson, A. Mechanical behavior of wood exposed to humidity variations. Thesis, Report TVBK-1006, Lund Institute of Technology, Dept. Struct. Eng., Sweden, 1992.- 189 p.

184. Ostenfeld, A. Exzentrisch beanspruchte säulen III beliebige exzentrizität versuche mit holz-und stahlsäulen / A.Ostenfeld.- Danmarks Naturvidenskabelige Samfund, 1931.- 106 s.
185. Prager, W. Ein neues Verfahren zur Bemessung auf Biegung beanspruchter Holzstäbe / W.Prager // Schweizerische Bauzeitung.- 1934.- Bd. 104, Nr.18.- S. 201-202.
186. Prager, W.Über die Querschnittbemessung zweigurtiger Holzholme / W.Prager.- Z.F.M., 1933.- Nr.19.- S. 197-201.
187. Rankine, W.J. A manual of applied machanics / W.J.Rankine.- London: C. Griffin and co.- 1877.- 652 p.
188. Rautenstrauch, K. Untersuchungen zur Beurteilung des Kriechverhaltens von Holzbiegeträgern / K.Rautenstrauch.- Diss. Univ. Hannover, 1989.- 347 s.
189. Rös, M. Die Knickfestigkeit der Bauholzen / M.Rös, I.Brunner.- Paris, 1932.
190. Schaechterle, K. Ingenieurholzbauten bei der Reichsbahndirektion Stuttgart / K.Schaechterle.- Berlin: W. Ernst & Sohn, 1925.- 118 s.
191. Schänzlin, J. Modeling the long-term behavior of structural timber for typical serviceclass-II-conditions in South-West Germany. Habilitation. Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2010-2 Institut für Konstruktion und Entwurf; Stuttgart, 2010.- 185 s.
192. Tetmajer, L. Die Gesetze der Knickungs- und der zusammengesetzten Druckfestigkeit der technisch wichtigsten Baustoffe / L.Tetmajer // Dritte vervollständigte Auflage.- Leipzig und Wien: Franz Deuticke, 1903.- 235 s.
193. Toratti, T. Creep of timber beams in a variable environment. Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology, 1992.- 182 s.
194. Ylinen, A. Über die Bestimmung der zeitbedingten elastischen und Festigkeitseigenschaften des Holzes mit Hilfe eines allgemeinen nichtlinear viskoelastischen reologischen Modelles / A.Ylinen // Holz als Roh- und Werkstoff.- 1965.- V.23.№5.- S. 193-196.
- 195.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

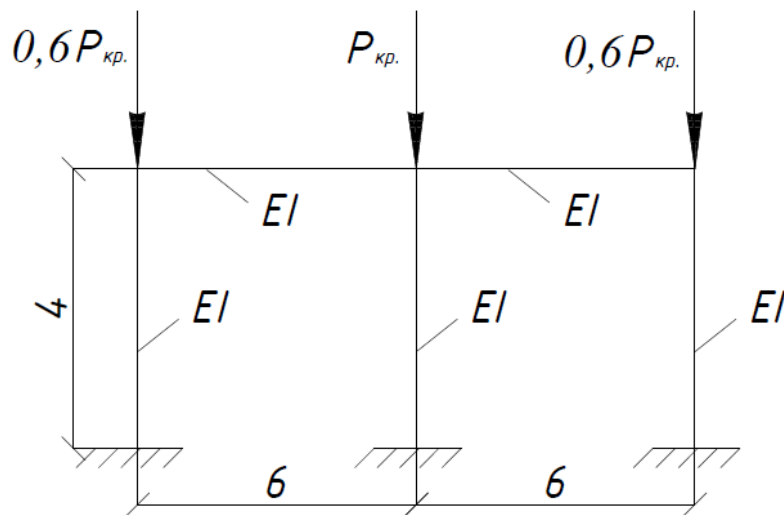
Пример расчета устойчивости сжатых элементов одноэтажной деревянной рамы в условиях силового и среднего нагружения

ПРИЛОЖЕНИЕ А

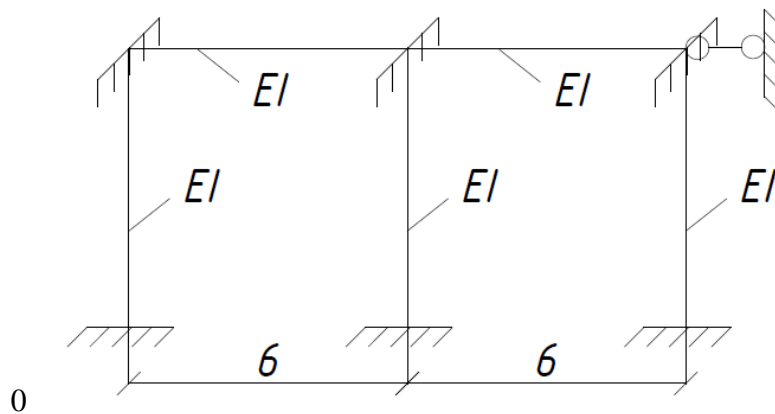
Пример расчета устойчивости сжатых элементов одноэтажной деревянной рамы в условиях силового и среднего нагружения

Рассмотрим двухпролетную раму, в которой центральна стойка нагружена нагрузкой P , а крайние нагружены $0,6P$.

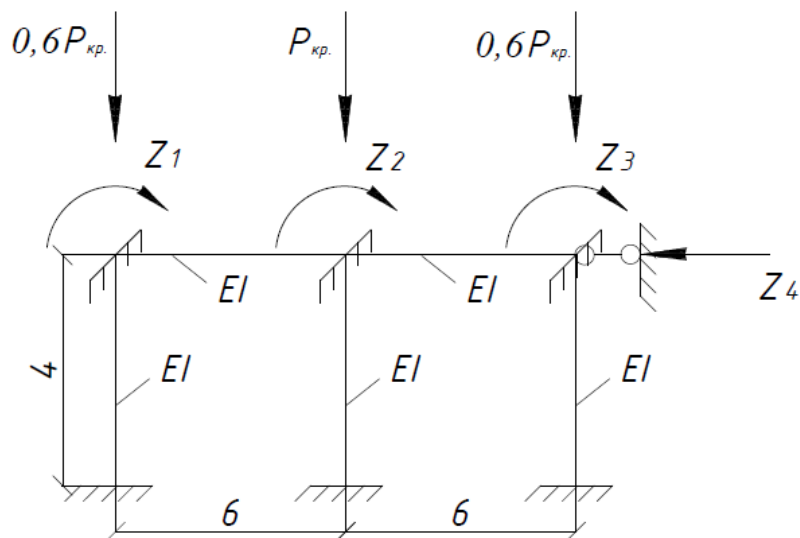
Исходная рама



Основная система



Эквивалентная система



Система уравнений:

$$\begin{aligned} r_{11} \cdot Z_1 + r_{12} \cdot Z_1 + r_{13} \cdot Z_3 + r_{14} \cdot Z_4 &= 0 \\ r_{21} \cdot Z_1 + r_{22} \cdot Z_1 + r_{23} \cdot Z_3 + r_{24} \cdot Z_4 &= 0 \\ r_{31} \cdot Z_1 + r_{32} \cdot Z_1 + r_{33} \cdot Z_3 + r_{34} \cdot Z_4 &= 0 \\ r_{41} \cdot Z_1 + r_{42} \cdot Z_2 + r_{43} \cdot Z_3 + r_{44} \cdot Z_4 &= 0 \end{aligned}$$

где $r_{11} = 4 \frac{EI}{l} \varphi_2(v_2) + 4 \frac{EI}{l}; r_{22} = 4 \frac{EI}{l} \varphi_2(v_2) + 4 \frac{EI}{l} + 4 \frac{EI}{l};$

$$r_{33} = 4 \frac{EI}{l} \varphi_2(v_5) + 4 \frac{EI}{l}; r_{44} = -12 \frac{EI}{l^3} \eta_2(v_1) - 12 \frac{EI}{l^3} \eta_2(v_3) - 12 \frac{EI}{l^3} \eta_2(v_5);$$

$$r_{12} = r_{21} = 2 \frac{EI}{l}; r_{13} = r_{31} = 0; r_{23} = r_{32} = 2 \frac{EI}{l}; r_{14} = r_{41} = 6 \frac{EI}{l^2} \varphi_4(v_1);$$

$$r_{24} = r_{42} = 6 \frac{EI}{l^2} \varphi_4(v_3); r_{34} = r_{43} = 6 \frac{EI}{l^2} \varphi_4(v_5).$$

Коэффициенты векового уравнения находим по формуле:

$$v_i = l \cdot \sqrt{\frac{P_i}{EI}}$$

где $v_1 = v_5 = h \cdot \sqrt{\frac{0,6P_{кр}}{EI}}; v_3 = h \cdot \sqrt{\frac{P_{кр}}{EI}}.$

Определитель системы:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & EI\varphi_2(v_3) + 0,67EI + 0,67EI & 10,375EI\varphi_4(v_3) - 0,33EI & 0 & 0 \\ 0 & 0,33EI & EI\varphi_2(v_5) + 0,67EI + 1 & 0 & EI\varphi_4(v_5) \\ 0 & 0,375EI\varphi_4(v_3) - 0,375EI\varphi_4(v_1) & 1 & -0,188EI\eta_2(v_1) - 0,188EI\eta_2(v_3) - 0,188EI\eta_2(v_5) - 0,375EI\varphi_4(v_1) & 0 \end{vmatrix}$$

Детерминант системы:

$$\begin{aligned} \det = & (EI\varphi_2(v_3) + 0,67EI + 0,67EI - 0,33EI \cdot EI\varphi_2(v_5) + 0,67EI + 1 \cdot \\ & (-0,188EI\eta_2(v_1) - 0,188EI\eta_2(v_3) - 0,188EI\eta_2(v_5) - 0,375EI\varphi_4(v_1)) + (1 \cdot \\ & 0,375EI\varphi_4(v_5) \cdot 0,375EI\varphi_4(v_3) - 0,375EI\varphi_4(v_1)) + (0,33EI \cdot 1 \cdot 0,375EI\varphi_4(v_3) - \\ & 0,33EI) - (0,375EI\varphi_4(v_3) - 0,33EI \cdot EI\varphi_2(v_5) + 0,67EI + 1 \cdot 0,375EI\varphi_4(v_3) - \\ & 0,375EI\varphi_4(v_1)) - (1 \cdot 0,33EI \cdot (-0,188EI\eta_2(v_1) - 0,188EI\eta_2(v_3) - \\ & 0,188EI\eta_2(v_5) - 0,375EI\varphi_4(v_1)) - (0,375EI\varphi_4(v_5) \cdot 1 \cdot EI\varphi_2(v_3) + 0,67EI + \\ & 0,67EI - 0,33EI) \end{aligned}$$

Выражаем коэффициенты векового уравнения через v_1 :

$$v_3 = 1,3v_1; v_5 = v_1.$$

Переписываем детерминант в виде:

$$\begin{aligned} \det = & (\varphi_2(1,3v_1) + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot \varphi_2(v_1) + 0,67 + 1 \cdot (-0,188\eta_2(v_1) - \\ & 0,188\eta_2(1,3v_1) - 0,188\eta_2(v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) + (1 \cdot 0,375\varphi_4(v_1) \cdot \\ & 0,375\varphi_4(1,3v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375\varphi_4(1,3v_1) - 0,33) - \\ & (0,375\varphi_4(1,3v_1) - 0,33 \cdot \varphi_2(v_1) + 0,67 + 1 \cdot 0,375\varphi_4(1,3v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) - \\ & (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188\eta_2(v_1) - 0,188\eta_2(1,3v_1) - 0,188\eta_2(v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) - \\ & (0,375\varphi_4(v_1) \cdot 1 \cdot \varphi_2(1,3v_1) + 0,67 + 0,67 - 0,33) \end{aligned}$$

Итерация: принимаем $v_1 = 3,9$.

$$\varphi_2(3,9) = -0,6100$$

$$\varphi_2(5,1) = 0,3407$$

$$\eta_2(3,9) = -0,5542$$

$$\eta_2(5,1) = -1,7155$$

$$\varphi_4(3,9) = 0,7133$$

$$\varphi_4(5,1) = 0,4520$$

Невязка:

$$\begin{aligned}
\Delta &= (-0,6100 + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot 0,3407 + 0,67 + 1 \cdot (-0,188 \cdot (-0,5542) \\
&\quad - 0,188 \cdot (-1,7155) - 0,188 \cdot (-0,5542) - 0,375 \cdot 0,7133) + (1 \\
&\quad \cdot 0,375 \cdot 0,7133 \cdot 0,375 \cdot 0,4520 - 0,375 \cdot 0,7133) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375 \\
&\quad \cdot 0,4520 - 0,33) - (0,375 \cdot 0,4520 - 0,33 \cdot 0,3407 + 0,67 + 1 \cdot 0,375 \\
&\quad \cdot 0,4520 - 0,375 \cdot 0,7133) - (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188 \cdot (-0,5542) - 0,188 \\
&\quad \cdot (-1,7155) - 0,188 \cdot (-0,5542) - 0,375 \cdot 0,7133) - (0,375 \cdot 0,7133 \\
&\quad \cdot 1 \cdot (-0,6100) + 0,67 + 0,67 - 0,33) \\
&= (0,40 \cdot 2,0107 \cdot (0,1042 + 0,3225 + 0,1042 - 0,2675)) + (0,2675 \\
&\quad \cdot 0,169 - 0,2675) + (0,33 \cdot 0,1695 - 0,33) - (0,1695 - 0,33 \cdot 1,9407 \\
&\quad \cdot 0,1695 - 0,2675) - (0,33 \cdot 0,2634) - (0,2675 \cdot 1 \cdot 0,40) \\
&= 0,2118 + (-0,0262) + (-0,0529) - 0,0305 - 0,0869 - 0,107 \\
&= -0,0917
\end{aligned}$$

Значение критической силы:

$$P_{\text{кр}} = \frac{v^2 \cdot EI}{l^2}$$

где $0,6P_{\text{кр}}^{1,5} = \frac{3,9^2 \cdot EI}{4^2} = 0,95EI$; $P_{\text{кр}}^3 = \frac{5,1^2 \cdot EI}{4^2} = 1,63EI$.

Для стержня 1 находим коэффициент v_1 , при котором $\varphi_2 = 0$.

По линейной интерполяции получаем, что при $\varphi_2 = 0$ $v_1 = 4,4931$.

$$\varphi_2(4,5) = -0,0048$$

$$\varphi_2(5,9) = -3,6678$$

$$\eta_2(4,5) = -1,0884$$

$$\eta_2(5,9) = -2,7218$$

$$\varphi_4(4,5) = 0,5991$$

$$\varphi_4(5,9) = 0,1790$$

Невязка:

$$\begin{aligned}
\Delta &= (-3,6678 + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot (-0,0048) + 0,67 + 1 \cdot (-0,188 \cdot (-1,0884) \\
&\quad - 0,188 \cdot (-2,7218) - 0,188 \cdot (-1,0884) - 0,375 \cdot 0,5991) + (1 \\
&\quad \cdot 0,375 \cdot 0,5991 \cdot 0,375 \cdot 0,1790 - 0,375 \cdot 0,5991) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375 \\
&\quad \cdot 0,1790 - 0,33) - (0,375 \cdot 0,1790 - 0,33 \cdot (-0,0048 + 0,67 + 1 \\
&\quad \cdot 0,375 \cdot 0,1790 - 0,375 \cdot 0,5991) - (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188 \cdot (-1,0884) \\
&\quad - 0,188 \cdot (-2,7218) - 0,188 \cdot (-1,0884) - 0,375 \cdot 0,5991)) - (0,375 \\
&\quad \cdot 0,5991 \cdot 1 \cdot (-3,6678) + 0,67 + 0,67 - 0,33) \\
&= (-2,6578 \cdot (-0,0080) \cdot (0,2046 + 0,5117 + 0,2046 - 0,2247)) \\
&\quad + (0,2247 \cdot 0,0671 - 0,2247) + (0,33 \cdot 0,0671 - 0,33) - (0,0671 \\
&\quad - 0,33 \cdot 1,6652 \cdot 0,0671 - 0,2247) - (0,33 \cdot 0,6962) - (0,2247 \cdot 1 \\
&\quad \cdot (-3,6678)) \\
&= 0,0148 + (-0,0354) + (-0,0868) - 0,0689 - 0,2298 + 0,8242 \\
&= 0,4181
\end{aligned}$$

Для 1 стержня:

$$v_1 = h \cdot \sqrt{\frac{0,6P_{кр}}{E(t) \cdot I}}$$

$$E(t) = \frac{l^2 \cdot P_{кр}}{v^2 \cdot I}$$

$$E(t) = \frac{4^2 \cdot 0,95EI}{3,9^2 \cdot I} = 0,99E$$

При $\alpha = 0,5$:

$$v_3 = 1,4v_1; v_5 = v_1.$$

$$\begin{aligned}
\det &= (\varphi_2(1,4v_1) + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot \varphi_2(v_1) + 0,67 + 1 \cdot (-0,188\eta_2(v_1) - \\
&\quad 0,188\eta_2(1,4v_1) - 0,188\eta_2(v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) + (1 \cdot 0,375\varphi_4(v_1) \cdot \\
&\quad 0,375\varphi_4(1,4v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375\varphi_4(1,4v_1) - 0,33) - \\
&\quad (0,375\varphi_4(1,4v_1) - 0,33 \cdot \varphi_2(v_1) + 0,67 + 1 \cdot 0,375\varphi_4(1,4v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) - \\
&\quad (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188\eta_2(v_1) - 0,188\eta_2(1,4v_1) - 0,188\eta_2(v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) - \\
&\quad (0,375\varphi_4(v_1) \cdot 1 \cdot \varphi_2(1,4v_1) + 0,67 + 0,67 - 0,33)
\end{aligned}$$

Первая итерация: Принимаем $v_1 = 4$.

$$\varphi_2(4) = 0,2933$$

$$\varphi_2(5,6) = -1,7481$$

$$\eta_2(4) = -0,6372$$

$$\eta_2(5,6) = -2,3189$$

$$\varphi_4(4) = 0,6961$$

$$\varphi_4(5,6) = 0,2944$$

Невязка:

$$\begin{aligned} \Delta &= (-1,7481 + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot 0,2933 + 0,67 + 1 \cdot (-0,188 \cdot (-0,6372)) \\ &\quad - 0,188 \cdot (-2,3189) - 0,188 \cdot (-0,6372) - 0,375 \cdot 0,6961) + (1 \\ &\quad \cdot 0,375 \cdot 0,6961 \cdot 0,375 \cdot 0,2944 - 0,375 \cdot 0,6961) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375 \\ &\quad \cdot 0,2944 - 0,33) - (0,375 \cdot 0,2944 - 0,33 \cdot 0,2933 + 0,67 + 1 \cdot 0,375 \\ &\quad \cdot 0,2944 - 0,375 \cdot 0,6961) - (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188 \cdot (-0,5542)) - 0,188 \\ &\quad \cdot (-1,7155) - 0,188 \cdot (-0,5542) - 0,375 \cdot 0,7133) - (0,375 \cdot 0,6961 \\ &\quad \cdot 1 \cdot (-1,7481) + 0,67 + 0,67 - 0,33) \\ &= (-0,7381 \cdot 1,9633 \cdot (0,1198 + 0,4359 + 0,1198 - 0,2610)) \\ &\quad + (0,2610 \cdot 0,1104 - 0,2610) + (0,33 \cdot 0,1104 - 0,33) - (0,1104 \\ &\quad - 0,33 \cdot 1,9633 \cdot 0,1104 - 0,2610) - (0,33 \cdot 0,4145) - (0,2610 \cdot 1 \\ &\quad \cdot (-0,7381)) \\ &= -0,6007 + (-0,0393) + (-0,0725) - 0,0649 - 0,1368 \\ &\quad - (-0,1926) = -0,7216 \end{aligned}$$

Вторая итерация: Принимаем $v_1 = 4,2$.

$$\varphi_2(4,2) = 0,1877$$

$$\varphi_2(5,9) = -3,6678$$

$$\eta_2(4,2) = -0,8103$$

$$\eta_2(5,9) = -2,7218$$

$$\varphi_4(4,2) = 0,6597$$

$$\varphi_4(5,9) = 0,1790$$

Невязка:

$$\begin{aligned}
\Delta &= (-3,6678 + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot 0,1877 + 0,67 + 1 \cdot (-0,188 \cdot (-0,8103) \\
&\quad - 0,188 \cdot (-2,7218) - 0,188 \cdot (-0,8103) - 0,375 \cdot 0,6597) + (1 \\
&\quad \cdot 0,375 \cdot 0,6597 \cdot 0,375 \cdot 0,1790 - 0,375 \cdot 0,6597) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375 \\
&\quad \cdot 0,1790 - 0,33) - (0,375 \cdot 0,1790 - 0,33 \cdot 0,1877 + 0,67 + 1 \cdot 0,375 \\
&\quad \cdot 0,1790 - 0,375 \cdot 0,6597) - (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188 \cdot (-0,8103) - 0,188 \\
&\quad \cdot (-2,7218) - 0,188 \cdot (-0,8103) - 0,375 \cdot 0,6597) - (0,375 \cdot 0,6597 \\
&\quad \cdot 1 \cdot (-3,6678) + 0,67 + 0,67 - 0,33) \\
&= (-2,6578 \cdot 1,8577 \cdot (0,1523 + 0,5117 + 0,1523 - 0,2474)) \\
&\quad + (0,2474 \cdot 0,0671 - 0,2474) + (0,33 \cdot 0,0671 - 0,33) - (0,0671 \\
&\quad - 0,33 \cdot 1,8577 \cdot 0,0671 - 0,2474) - (0,33 \cdot 0,5689) - (0,2474 \cdot 1 \\
&\quad \cdot (-3,6678) \\
&= -2,8089 + (-0,0446) + (-0,0867) - 0,0881 - 0,1877 \\
&\quad - (-0,9074) = -2,3086
\end{aligned}$$

Третья итерация. Принимаем $v_1 = 4,1$.

$$\varphi_2(4,1) = 0,2424$$

$$\varphi_2(5,8) = -2,7777$$

$$\eta_2(4,1) = -0,7225$$

$$\eta_2(5,8) = -2,5838$$

$$\varphi_4(4,1) = 0,6783$$

$$\varphi_4(5,8) = 0,2195$$

Невязка:

$$\begin{aligned}
\Delta &= (-2,7777 + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot 0,2424 + 0,67 + 1 \cdot (-0,188 \cdot (-0,7225) \\
&\quad - 0,188 \cdot (-2,5838) - 0,188 \cdot (-0,7225) - 0,375 \cdot 0,6783) + (1 \\
&\quad \cdot 0,375 \cdot 0,6783 \cdot 0,375 \cdot 0,2195 - 0,375 \cdot 0,6783) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375 \\
&\quad \cdot 0,2195 - 0,33) - (0,375 \cdot 0,2195 - 0,33 \cdot 0,2424 + 0,67 + 1 \cdot 0,375 \\
&\quad \cdot 0,2195 - 0,375 \cdot 0,6783) - (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188 \cdot (-0,7225) - 0,188 \\
&\quad \cdot (-2,5838) - 0,188 \cdot (-0,7225) - 0,375 \cdot 0,6783) - (0,375 \cdot 0,6783 \\
&\quad \cdot 1 \cdot (-2,7777) + 0,67 + 0,67 - 0,33) \\
&= (-1,7677 \cdot 1,9124 \cdot (0,1358 + 0,4858 + 0,1358 - 0,2544)) \\
&\quad + (0,2544 \cdot 0,0823 - 0,2544) + (0,33 \cdot 0,0823 - 0,33) - (0,0823 \\
&\quad - 0,33 \cdot 1,9124 \cdot 0,0823 - 0,2544) - (0,33 \cdot 0,503) - (0,2544 \cdot 1 \\
&\quad \cdot (-2,7777) \\
&= -1,7004 + (-0,0438) + (-0,0817) - 0,0815 - 0,1659 \\
&\quad - (-0,7067) = -1,3666
\end{aligned}$$

Критическая сила:

$$0,5P_{\text{кр}}^{1,5} = \frac{4^2 \cdot EI}{4^2} = EI; P_{\text{кр}}^3 = \frac{5,6^2 \cdot EI}{4^2} = 1,96EI.$$

Для 1 стержня:

$$\begin{aligned}
v_1 &= h \cdot \sqrt{\frac{0,5P_{\text{кр}}}{E(t) \cdot I}} \\
E(t) &= \frac{l^2 \cdot P_{\text{кр}}}{v^2 \cdot I} \\
E(t) &= \frac{4^2 \cdot EI}{4^2 \cdot I} = E
\end{aligned}$$

При $\alpha = 0,7$:

$$v_3 = 1,3v_1; v_5 = v_1$$

При $\alpha = 0,8$:

$$v_3 = 1,1v_1; v_5 = v_1.$$

$$\begin{aligned}
\det &= (\varphi_2(1,1v_1) + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot \varphi_2(v_1) + 0,67 + 1 \cdot (-0,188\eta_2(v_1) - \\
&\quad 0,188\eta_2(1,1v_1) - 0,188\eta_2(v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) + (1 \cdot 0,375\varphi_4(v_1) \cdot \\
&\quad 0,375\varphi_4(1,1v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375\varphi_4(1,1v_1) - 0,33) -
\end{aligned}$$

$$(0,375\varphi_4(1,1v_1) - 0,33 \cdot \varphi_2(v_1) + 0,67 + 1 \cdot 0,375\varphi_4(1,1v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) - \\ (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188\eta_2(v_1) - 0,188\eta_2(1,1v_1) - 0,188\eta_2(v_1) - 0,375\varphi_4(v_1)) - \\ (0,375\varphi_4(v_1) \cdot 1 \cdot \varphi_2(1,1v_1) + 0,67 + 0,67 - 0,33))$$

Первая итерация: принимаем $v_1 = 4,1$.

$$\varphi_2(4,1) = 0,2424$$

$$\varphi_2(4,5) = -0,0048$$

$$\eta_2(4,1) = -0,7225$$

$$\eta_2(4,5) = -1,0884$$

$$\varphi_4(4,1) = 0,6783$$

$$\varphi_4(4,5) = 0,5991$$

Невязка:

$$\Delta = (-0,0048 + 0,67 + 0,67 - 0,33 \cdot 0,2424 + 0,67 + 1 \cdot (-0,188 \cdot (-0,7225) \\ - 0,188 \cdot (-1,0884) - 0,188 \cdot (-0,7225) - 0,375 \cdot 0,6783) + (1 \\ \cdot 0,375 \cdot 0,6783 \cdot 0,375 \cdot 0,5991 - 0,375 \cdot 0,6783) + (0,33 \cdot 1 \cdot 0,375 \\ \cdot 0,5991 - 0,33) - (0,375 \cdot (0,5991) - 0,33 \cdot 0,2424 + 0,67 + 1 \cdot 0,375 \\ \cdot 0,5991 - 0,375 \cdot 0,6783) - (1 \cdot 0,33 \cdot (-0,188 \cdot (-0,7225) - 0,188 \\ \cdot (-0,7225) - 0,188 \cdot (-0,7225) - 0,375 \cdot 0,6783) - (0,375 \cdot 0,6783 \\ \cdot 1 \cdot (-0,0048) + 0,67 + 0,67 - 0,33)) \\ = (1,0052 \cdot 1,9124 \cdot (0,1358 + 0,2046 + 0,1358 - 0,2544)) + (0,2544 \\ \cdot 0,2247 - 0,2544) + (0,33 \cdot 0,2247 - 0,33) - (0,2247 - 0,33 \cdot 1,9124 \\ \cdot 0,2247 - 0,2544) - (0,33 \cdot 0,2218) - (0,2544 \cdot 1 \cdot 1,0052) \\ = 0,4264 + (-0,0076) + (-0,0348) - 0,0059 - 0,0732 - 0,2557 \\ = 0,0492$$

Критическая сила:

$$0,8P_{кр}^{1,5} = \frac{4,1^2 \cdot EI}{4^2} = 1,05EI; P_{кр}^3 = \frac{4,5^2 \cdot EI}{4^2} = 1,27EI.$$

Для 1 стержня:

$$v_1 = h \cdot \sqrt{\frac{0,8P_{кр}}{E(t) \cdot I}}$$

$$E(t) = \frac{l^2 \cdot P_{кр}}{v^2 \cdot I}$$

$$E(t) = \frac{4^2 \cdot EI}{4,1^2 \cdot I} = 0,95E.$$

Работа 1 стержня:

$$A_1 = Z_1^2 \cdot \frac{4EI}{l} \cdot \varphi_2(v_1) + Z_4^2 \cdot \frac{6EI}{l^2} \cdot \varphi_4(v_1)$$

Работа 2 стержня:

$$A_2 = Z_2^2 \cdot \frac{4EI}{l} \cdot \varphi_2(v_3) + Z_4^2 \cdot \frac{6EI}{l^2} \cdot \varphi_4(v_3)$$

Работа 3 стержня:

$$A_3 = Z_3^2 \cdot \frac{4EI}{l} \cdot \varphi_2(v_5) + Z_4^2 \cdot \frac{6EI}{l^2} \cdot \varphi_4(v_5)$$

Система уравнений:

$$\begin{aligned} 1,01 \cdot Z_1 + 0,33 \cdot Z_2 + 0 \cdot Z_3 + 0,27 \cdot Z_4 &= 0 \\ 0,33 \cdot Z_1 + 0,73 \cdot Z_2 + 0,33 \cdot Z_3 + 0,17 \cdot Z_4 &= 0 \\ 0 \cdot Z_1 + 0,33 \cdot Z_2 + 1,01 \cdot Z_3 + 0,27 \cdot Z_4 &= 0 \\ 0,27 \cdot Z_1 + 0,17 \cdot Z_2 + 0,27 \cdot Z_3 + 0,25 \cdot Z_4 &= 0 \end{aligned}$$

Выразим из уравнения 1 коэффициент Z_1 :

$$Z_1 = \frac{-0,33Z_2 - 0,27 \cdot Z_4}{1,01}$$

Выразим из уравнения 3 коэффициент Z_2 :

$$Z_2 = \frac{-1,01 \cdot Z_3 - 0,27 \cdot Z_4}{0,33}$$

Подставим коэффициент Z_2 в Z_1 :

$$Z_1 = \frac{-0,33 \cdot \left(\frac{-1,01 \cdot Z_3 - 0,27 \cdot Z_4}{0,33} \right) - 0,27 \cdot Z_4}{1,01}$$

$$Z_1 = \frac{-0,33 \cdot (-3,06 \cdot Z_3 - 0,82 \cdot Z_4) - 0,27 \cdot Z_4}{1,01}$$

$$Z_1 = Z_3 + 0,27Z_4 - 0,27Z_4$$

Выразим из уравнения 2 коэффициент Z_3 :

$$Z_3 = \frac{-0,33 \cdot Z_1 - 0,73 \cdot Z_2 - 0,17 \cdot Z_4}{0,33}$$

$$Z_3 = -Z_1 - 2,21 \cdot Z_2 - 0,52 \cdot Z_4$$

Подставим коэффициент Z_3 в Z_1 :

$$Z_1 = -Z_1 - 2,21 \cdot Z_2 - 0,52 \cdot Z_4$$

Выразим из уравнения 1 коэффициент Z_2 :

$$Z_2 = \frac{-1,01 \cdot Z_1 - 0,27 \cdot Z_4}{0,33}$$

$$Z_2 = -3,06 \cdot Z_1 - 0,82 \cdot Z_4$$

Подставим коэффициент Z_2 в Z_1 :

$$Z_1 = -Z_1 - 2,21 \cdot (-3,06 \cdot Z_1 - 0,82 \cdot Z_4) - 0,52 \cdot Z_4$$

$$Z_1 = -Z_1 + 6,76 \cdot Z_1 + 1,81 \cdot Z_4 - 0,52 \cdot Z_4$$

$$-4,76Z_1 = 1,29 \cdot Z_4$$

$$Z_1 = -0,27 \cdot Z_4$$

Тогда работа равна:

$$A_1 = (-0,27 \cdot Z_4)^2 \cdot \frac{4EI}{l} \cdot \varphi_2(v_1) + Z_4^2 \cdot \frac{6EI}{l^2} \cdot \varphi_4(v_1)$$

$$A_1 = 0,073 \cdot Z_4^2 \cdot \frac{4EI}{l} \cdot \varphi_2(v_1) + Z_4^2 \cdot \frac{6EI}{l^2} \cdot \varphi_4(v_1)$$

$$A_1 = 1,073 \cdot Z_4^2 \cdot \left[\frac{4EI}{l} \cdot \varphi_2(v_1) + \frac{6EI}{l^2} \cdot \varphi_4(v_1) \right]$$

Итерация: Принимаем $v_1 = 4,7$.

$$\varphi_2(4,7) = -0,1646$$

$$\varphi_4(4,7) = 0,5543$$

$$A_1 = 1,073 \cdot Z_4^2 \cdot \left[\frac{4EI}{l} \cdot (-0,1646) + \frac{6EI}{l^2} \cdot 0,5543 \right]$$

$$A_1 = 1,073 \cdot Z_4^2 \cdot [EI \cdot (-0,1646) + 0,375 \cdot EI \cdot 0,5543]$$

$$A_1 = 1,073 \cdot Z_4^2 \cdot EI \cdot [-0,1646 + 0,2079]$$

$$A_1 = 1,073 \cdot Z_4^2 \cdot EI \cdot [0,0433] \text{ (активная бифуркация стержня)}$$

Стержень перейдет из пассивной бифуркации в активную, когда работа стержня изменит знак.

$$v_{11} = 3,9$$

$$v_{12} = 4,7 \text{ (работа меняет знак)}$$

$$v_{11} = l \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{кр}}}{EI}} \quad v_{12} = l \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{кр}}}{E_{\text{red}}I}}$$

$$\frac{v_{11}}{v_{12}} = \frac{l \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{кр}}}{EI}}}{l \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{кр}}}{E_{\text{red}}I}}}$$

$$\frac{v_{11}^2}{v_{12}^2} = \frac{l^2 \cdot \frac{P_{\text{кр}}}{EI}}{l^2 \cdot \frac{P_{\text{кр}}}{E_{\text{red}}I}}$$

$$\frac{v_{11}^2}{v_{12}^2} = \frac{E_{\text{red}}}{E}$$

$$E_{\text{red}} = \frac{v_{11}^2 \cdot E}{v_{12}^2}$$

$$E_{\text{red}} = \frac{3,9^2 \cdot E}{4,7^2} = 0,69E.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Реферат и исходный текст программы для определения критической силы при расчете на устойчивость стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Реферат и исходный текст программы для определения критической силы при расчете на устойчивость стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности

Реферат

Программа: Программа для определения критической силы при расчете на устойчивость стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности.

Аннотация: Программа предназначена для определения критической силы при расчете на устойчивость стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности с применением расчетного аппарата, основанного на реологической модели деформирования древесины с вязкой составляющей. Программа может применяться при расчете и проектировании строительных конструкций из древесины. Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- определение критической силы при расчете на устойчивости центрально сжатого стержня из древесины при влиянии времени нагружения;

- определение критической силы при расчете на устойчивости центрально сжатого стержня из древесины при силовом нагружении и переменной влажности;

- определение критической силы при расчете на устойчивости центрально сжатого стержня из древесины при влиянии времени нагружения и переменной влажности.

Тип ЭВМ: PC

Язык: C#

ОС: Windows

Объём программы: 54 Кб

```

namespace sdm
{
    partial class Form1
    {
        /// <summary>
        /// Требуется переменная конструктора.
        /// </summary>
        private System.ComponentModel.IContainer components = null;

        /// <summary>
        /// Освободить все используемые ресурсы.
        /// </summary>
        /// <param name="disposing">истинно,
если управляемый ресурс должен быть удален; иначе ложно.</param>
        protected override void Dispose(bool disposing)
        {
            if (disposing && (components != null))
            {
                components.Dispose();
            }
            base.Dispose(disposing);
        }

        #region Код, автоматически созданный конструктором форм Windows

        /// <summary>
        /// Обязательный метод для поддержки конструктора - не изменяйте
        /// содержимое данного метода при помощи редактора кода.
        /// </summary>
        private void InitializeComponent()
        {
            this.textBox1 = new System.Windows.Forms.TextBox();
            this.textBox2 = new System.Windows.Forms.TextBox();
            this.textBox3 = new System.Windows.Forms.TextBox();
            this.label1 = new System.Windows.Forms.Label();
            this.label2 = new System.Windows.Forms.Label();
            this.label3 = new System.Windows.Forms.Label();
            this.textBox4 = new System.Windows.Forms.TextBox();
        }
    }
}

```

```
this.textBox5 = new System.Windows.Forms.TextBox();
this.textBox6 = new System.Windows.Forms.TextBox();
this.label4 = new System.Windows.Forms.Label();
this.label5 = new System.Windows.Forms.Label();
this.label6 = new System.Windows.Forms.Label();
this.textBox7 = new System.Windows.Forms.TextBox();
this.button1 = new System.Windows.Forms.Button();
this.SuspendLayout();
//
// textBox1
//
this.textBox1.Font = new System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((byte)(204)));
this.textBox1.Location = new System.Drawing.Point(77, 37);
this.textBox1.Name = "textBox1";
this.textBox1.Size = new System.Drawing.Size(104, 29);
this.textBox1.TabIndex = 0;
this.textBox1.TextAlign = System.Windows.Forms.HorizontalAlignment.Right;
//
// textBox2
//
this.textBox2.Font = new System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((byte)(204)));
this.textBox2.Location = new System.Drawing.Point(77, 72);
this.textBox2.Name = "textBox2";
this.textBox2.Size = new System.Drawing.Size(104, 29);
this.textBox2.TabIndex = 1;
this.textBox2.TextAlign = System.Windows.Forms.HorizontalAlignment.Right;
//
// textBox3
//
this.textBox3.Font = new System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((byte)(204)));
this.textBox3.Location = new System.Drawing.Point(77, 107);
this.textBox3.Name = "textBox3";
```

```
this.textBox3.Size = new System.Drawing.Size(104, 29);
this.textBox3.TabIndex = 2;
this.textBox3.TextAlign = System.Windows.Forms.HorizontalAlignment.Right;
//
// label1
//
this.label1.AutoSize = true;
this.label1.Font = new System.Drawing.Font("Monotype Corsiva", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Italic, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, ((byte)(204)));
this.label1.Location = new System.Drawing.Point(41, 42);
this.label1.Name = "label1";
this.label1.Size = new System.Drawing.Size(30, 22);
this.label1.TabIndex = 3;
this.label1.Text = "L :";
this.label1.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.TopRight;
//
// label2
//
this.label2.AutoSize = true;
this.label2.Font = new System.Drawing.Font("Monotype Corsiva", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Italic, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, ((byte)(204)));
this.label2.Location = new System.Drawing.Point(39, 77);
this.label2.Name = "label2";
this.label2.Size = new System.Drawing.Size(32, 22);
this.label2.TabIndex = 3;
this.label2.Text = "w :";
this.label2.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.TopRight;
//
// label3
//
this.label3.AutoSize = true;
this.label3.Font = new System.Drawing.Font("Monotype Corsiva", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Italic, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, ((byte)(204)));
this.label3.Location = new System.Drawing.Point(46, 112);
this.label3.Name = "label3";
this.label3.Size = new System.Drawing.Size(25, 22);
this.label3.TabIndex = 3;
this.label3.Text = "t :";
```

```
this.label3.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.TopRight;
//
// textBox4
//
this.textBox4.Font = new System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((byte)(204)));
this.textBox4.Location = new System.Drawing.Point(77, 142);
this.textBox4.Name = "textBox4";
this.textBox4.Size = new System.Drawing.Size(104, 29);
this.textBox4.TabIndex = 2;
this.textBox4.TextAlign = System.Windows.Forms.HorizontalAlignment.Right;
//
// textBox5
//
this.textBox5.Font = new System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((byte)(204)));
this.textBox5.Location = new System.Drawing.Point(77, 177);
this.textBox5.Name = "textBox5";
this.textBox5.Size = new System.Drawing.Size(104, 29);
this.textBox5.TabIndex = 2;
this.textBox5.TextAlign = System.Windows.Forms.HorizontalAlignment.Right;
//
// textBox6
//
this.textBox6.Font = new System.Drawing.Font("Microsoft Sans Serif", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((byte)(204)));
this.textBox6.Location = new System.Drawing.Point(77, 212);
this.textBox6.Name = "textBox6";
this.textBox6.Size = new System.Drawing.Size(104, 29);
this.textBox6.TabIndex = 2;
this.textBox6.TextAlign = System.Windows.Forms.HorizontalAlignment.Right;
//
// label4
//
this.label4.AutoSize = true;
```

```
this.label4.Location = new System.Drawing.Point(39, 153);
this.label4.Name = "label4";
this.label4.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);
this.label4.TabIndex = 3;
this.label4.Text = "E(t 0)";
this.label4.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.TopRight;
//
// label5
//
this.label5.AutoSize = true;
this.label5.Font = new System.Drawing.Font("Monotype Corsiva", 14.25F,
System.Drawing.FontStyle.Italic, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, ((byte)(204)));
this.label5.Location = new System.Drawing.Point(45, 182);
this.label5.Name = "label5";
this.label5.Size = new System.Drawing.Size(26, 22);
this.label5.TabIndex = 3;
this.label5.Text = "I :";
this.label5.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.TopRight;
//
// label6
//
this.label6.AutoSize = true;
this.label6.Font = new System.Drawing.Font("Monotype Corsiva", 12F,
System.Drawing.FontStyle.Italic, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, ((byte)(204)));
this.label6.Location = new System.Drawing.Point(47, 212);
this.label6.Name = "label6";
this.label6.Size = new System.Drawing.Size(24, 18);
this.label6.TabIndex = 3;
this.label6.Text = "v :";
this.label6.TextAlign = System.Drawing.ContentAlignment.TopRight;
//
// textBox7
//
this.textBox7.BackColor = System.Drawing.Color.WhiteSmoke;
this.textBox7.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 15.75F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((byte)(204)));
this.textBox7.Location = new System.Drawing.Point(232, 198);
```

```
this.textBox7.Name = "textBox7";
this.textBox7.ReadOnly = true;
this.textBox7.Size = new System.Drawing.Size(125, 32);
this.textBox7.TabIndex = 4;
this.textBox7.TextAlign = System.Windows.Forms.HorizontalAlignment.Right;
this.textBox7.TextChanged += new
System.EventHandler(this.textBox7_TextChanged);
//
// button1
//
this.button1.Location = new System.Drawing.Point(232, 142);
this.button1.Name = "button1";
this.button1.Size = new System.Drawing.Size(125, 29);
this.button1.TabIndex = 5;
this.button1.Text = "Рассчитать";
this.button1.UseVisualStyleBackColor = true;
this.button1.Click += new System.EventHandler(this.button1_Click);
//
// Form1
//
this.AutoScaleDimensions = new System.Drawing.SizeF(6F, 13F);
this.AutoScaleMode = System.Windows.Forms.AutoScaleMode.Font;
this.BackColor = System.Drawing.Color.Wheat;
this.ClientSize = new System.Drawing.Size(395, 262);
this.Controls.Add(this.button1);
this.Controls.Add(this.textBox7);
this.Controls.Add(this.label6);
this.Controls.Add(this.label5);
this.Controls.Add(this.label4);
this.Controls.Add(this.label3);
this.Controls.Add(this.label2);
this.Controls.Add(this.label1);
this.Controls.Add(this.textBox6);
this.Controls.Add(this.textBox5);
this.Controls.Add(this.textBox4);
this.Controls.Add(this.textBox3);
this.Controls.Add(this.textBox2);
this.Controls.Add(this.textBox1);
```



```

    this.Name = "Form1";
    this.Text = "Form1";
    this.ResumeLayout(false);
    this.PerformLayout();

}

```

```
#endregion
```

```

private System.Windows.Forms.TextBox textBox1;
private System.Windows.Forms.TextBox textBox2;
private System.Windows.Forms.TextBox textBox3;
private System.Windows.Forms.Label label1;
private System.Windows.Forms.Label label2;
private System.Windows.Forms.Label label3;
private System.Windows.Forms.TextBox textBox4;
private System.Windows.Forms.TextBox textBox5;
private System.Windows.Forms.TextBox textBox6;
private System.Windows.Forms.Label label4;
private System.Windows.Forms.Label label5;
private System.Windows.Forms.Label label6;
private System.Windows.Forms.TextBox textBox7;
private System.Windows.Forms.Button button1;
}
}
//
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Project ToolsVersion="4.0" DefaultTargets="Build"
xmlns="http://schemas.microsoft.com/developer/msbuild/2003">
  <PropertyGroup>
    <Configuration Condition=" '$(Configuration)' == " ">Debug</Configuration>
    <Platform Condition=" '$(Platform)' == " ">x86</Platform>
    <ProductVersion>8.0.30703</ProductVersion>
    <SchemaVersion>2.0</SchemaVersion>
    <ProjectGuid>{290485C1-B6E7-4DD6-B7FE-0DD9BF174E90}</ProjectGuid>
    <OutputType>WinExe</OutputType>
    <AppDesignerFolder>Properties</AppDesignerFolder>
    <RootNamespace>WindowsFormsApplication1</RootNamespace>

```

```

<AssemblyName>ksdm1.1</AssemblyName>
<TargetFrameworkVersion>v4.0</TargetFrameworkVersion>
<TargetFrameworkProfile>Client</TargetFrameworkProfile>
<FileAlignment>512</FileAlignment>
</PropertyGroup>
<PropertyGroup Condition=" '$(Configuration)|$(Platform)' == 'Debug|x86' ">
  <PlatformTarget>x86</PlatformTarget>
  <DebugSymbols>>true</DebugSymbols>
  <DebugType>full</DebugType>
  <Optimize>>false</Optimize>
  <OutputPath>bin\Debug\</OutputPath>
  <DefineConstants>DEBUG;TRACE</DefineConstants>
  <ErrorReport>prompt</ErrorReport>
  <WarningLevel>4</WarningLevel>
</PropertyGroup>
<PropertyGroup Condition=" '$(Configuration)|$(Platform)' == 'Release|x86' ">
  <PlatformTarget>x86</PlatformTarget>
  <DebugType>pdbonly</DebugType>
  <Optimize>>true</Optimize>
  <OutputPath>bin\Release\</OutputPath>
  <DefineConstants>TRACE</DefineConstants>
  <ErrorReport>prompt</ErrorReport>
  <WarningLevel>4</WarningLevel>
</PropertyGroup>
<ItemGroup>
  <Reference Include="System" />
  <Reference Include="System.Core" />
  <Reference Include="System.Xml.Linq" />
  <Reference Include="System.Data.DataSetExtensions" />
  <Reference Include="Microsoft.CSharp" />
  <Reference Include="System.Data" />
  <Reference Include="System.Deployment" />
  <Reference Include="System.Drawing" />
  <Reference Include="System.Windows.Forms" />
  <Reference Include="System.Xml" />
</ItemGroup>
<ItemGroup>
  <Compile Include="..\ksdm v1.1.cs">

```

```

    <SubType>Form</SubType>
  </Compile>
  <Compile Include="..\ksdm v1.1.Designer.cs">
    <DependentUpon>ksdm v1.1.cs</DependentUpon>
  </Compile>
  <Compile Include="Program.cs" />
  <Compile Include="Properties\AssemblyInfo.cs" />
  <EmbeddedResource Include="..\ksdm v1.1.resx">
    <DependentUpon>ksdm v1.1.cs</DependentUpon>
  </EmbeddedResource>
  <EmbeddedResource Include="Properties\Resources.resx">
    <Generator>ResXFileCodeGenerator</Generator>
    <LastGenOutput>Resources.Designer.cs</LastGenOutput>
    <SubType>Designer</SubType>
  </EmbeddedResource>
  <Compile Include="Properties\Resources.Designer.cs">
    <AutoGen>True</AutoGen>
    <DependentUpon>Resources.resx</DependentUpon>
  </Compile>
  <None Include="Properties\Settings.settings">
    <Generator>SettingsSingleFileGenerator</Generator>
    <LastGenOutput>Settings.Designer.cs</LastGenOutput>
  </None>
  <Compile Include="Properties\Settings.Designer.cs">
    <AutoGen>True</AutoGen>
    <DependentUpon>Settings.settings</DependentUpon>
    <DesignTimeSharedInput>True</DesignTimeSharedInput>
  </Compile>
</ItemGroup>
<Import Project="$(MSBuildToolsPath)\Microsoft.CSharp.targets" />
<!-- To modify your build process, add your task inside one of the targets below and
uncomment it.

    Other similar extension points exist, see Microsoft.Common.targets.
  <Target Name="BeforeBuild">
  </Target>
  <Target Name="AfterBuild">
  </Target>
-->

```

```

</Project>
//
using System.Reflection;
using System.Runtime.CompilerServices;
using System.Runtime.InteropServices;

// Управление общими сведениями о сборке осуществляется с помощью
// набора атрибутов. Измените значения этих атрибутов, чтобы изменить
// сведения,
// связанные со сборкой.
[assembly: AssemblyTitle("WindowsFormsApplication1")]
[assembly: AssemblyDescription("")]
[assembly: AssemblyConfiguration("")]
[assembly: AssemblyCompany("Ksdm")]
[assembly: AssemblyProduct("WindowsFormsApplication1")]
[assembly: AssemblyCopyright("Copyright © Ksdm 2016")]
[assembly: AssemblyTrademark("")]
[assembly: AssemblyCulture("")]

// Параметр ComVisible со значением FALSE делает типы в сборке невидимыми
// для COM-компонентов. Если требуется обратиться к типу в этой сборке через
// COM, задайте атрибуту ComVisible значение TRUE для этого типа.
[assembly: ComVisible(false)]

// Следующий GUID служит для идентификации библиотеки типов, если этот
// проект будет видимым для COM
[assembly: Guid("240972e7-cd04-4188-89e4-d293afd00914")]

// Сведения о версии сборки состоят из следующих четырех значений:
//
// Основной номер версии
// Дополнительный номер версии
// Номер построения
// Редакция
//
// Можно задать все значения или принять номер построения и номер редакции по
// умолчанию,
// используя "*", как показано ниже:

```

```
// [assembly: AssemblyVersion("1.0.*")]
[assembly: AssemblyVersion("1.0.0.0")]
[assembly: AssemblyFileVersion("1.0.0.0")]
//

//
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace ksdm
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void textBox7_TextChanged(object sender, EventArgs e)
        {

        }

        public static double result(double t, double l, double w, double Et0, double I,
double v )
        {
            return v * v * I / l * l;
        }

        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
```

```
        textBox7.Text = Convert.ToString(result(Convert.ToDouble(textBox1.Text),
Convert.ToDouble(textBox2.Text), Convert.ToDouble(textBox3.Text),
Convert.ToDouble(textBox4.Text), Convert.ToDouble(textBox5.Text),
Convert.ToDouble(textBox6.Text)));
    }

}
}
//
```

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU 2016616852

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2016616852	Авторы: Дмитриева Ксения Олеговна (RU), Колчунов Виталий Иванович (RU)
Дата регистрации: 21.06.2016	Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (RU)
Номер и дата поступления заявки: 2016614157 26.04.2016	
Дата публикации: 20.07.2016	

Название программы для ЭВМ:

Программа для определения критической силы при расчете на устойчивость стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности

Реферат:

Программа предназначена для определения критической силы при расчете на устойчивость стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности с применением расчетного аппарата, основанного на реологической модели деформирования древесины с вязкой составляющей. Программа может применяться при расчете и проектировании строительных конструкций из древесины. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: определение критической силы при расчете на устойчивости центрально сжатого стержня из древесины при влиянии времени нагружения; определение критической силы при расчете на устойчивости центрально сжатого стержня из древесины при силовом нагружении и переменной влажности; определение критической силы при расчете на устойчивости центрально сжатого стержня из древесины при влиянии времени нагружения и переменной влажности.

Тип реализующей ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК

Язык программирования: C#

Вид и версия операционной системы: Windows

Объем программы для ЭВМ: 54 Кб

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Справки и акты о внедрении



**федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук»
(НИИСФ РААСН)**

Исх. от 13.10.2016 № — 1 —

Справка
О внедрении результатов диссертационной работы
Дмитриевой Ксении Олеговны
**«Устойчивость стержневых элементов из древесины при силовом и
средовом нагружении»**

Результаты диссертационной работы К.О. Дмитриевой «Устойчивость стержневых элементов из древесины при силовом и средовом нагружении» использовались Научно-исследовательским институтом строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук при выполнении НИОКР разделов фундаментальных научных исследований по направлению «Развитие теоретических основ строительных наук».

Использование предложенной в диссертационной работе методики расчета конструктивной системы на устойчивость при силовом нагружении и переменной влажности с учетом пассивной и активной бифуркации позволяет повысить уровень конструктивной безопасности и живучести конструктивных систем.

Директор института

И.Л. Шубин