

На правах рукописи



Корольков Дмитрий Игоревич

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА И СРОКОВ
СЛУЖБЫ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ LVL**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Черных Александр Григорьевич

Официальные оппоненты: **Рощина Светлана Ивановна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
кафедра строительных конструкций,
заведующая кафедрой;

Соловьев Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Вологодский государственный
университет», кафедра промышленного
и гражданского строительства, доцент,
и.о. заведующего кафедрой.

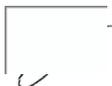
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)».**

Защита состоится 12 декабря 2024 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220 главного корпуса). Факс: 8 (812) 316-58-73, Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/korolkov-dmitriy-igorevich>

Автореферат разослан «07» ноября 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние два десятилетия все большее распространение в строительной отрасли Российской Федерации получает многослойный клееный брус из шпона LVL (англ. Laminated Veneer Lumber). Однако отсутствие сведений о долговечности LVL является одним из факторов сдерживающим его применение в строительстве. Основное влияние на долговечность несущих конструкций оказывает уменьшение во времени сопротивления поперечного сечения элементов деревянных конструкций при действии длительной нагрузки и накопление повреждений при воздействии окружающей среды.

Остаточный ресурс является одним из параметров долговечности, позволяющий корректно прогнозировать срок службы с учетом деградации свойств несущих деревянных конструкций во времени, и физического износа. Следует отметить, что вопрос количественной оценки и обоснования остаточного ресурса остается недостаточно изученным, отсутствует методика для деревянных конструкций.

Предлагаемые в данной работе методы расчета остаточного ресурса с учетом факторов накопления повреждений и снижение прочности во времени, на примере балочных LVL-конструкций, позволяют оптимизировать конструктивные параметры и определять их срок службы до полного исчерпания несущей способности.

Степень разработанности темы исследования. В области теории и практики расчета остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений работали российские ученые Шмелев Г.Д., Добромыслов А.Н., Адаменко И.А., Самолинов Н.А., Голубев К.В., Шестакова Е.А., Миронов Д.А., Долгополов В.В., Клисенко Л.Б., Белый Г.И. и др. Предложенные методы определения срока службы и остаточного ресурса деревянных конструкций можно условно разделить на две большие группы. Первая, связана с прогнозированием сроков службы по деградации прочностных свойств, вторая – по величине физического износа. Недостатком этих методов является то, что они не позволяют оценить совместное влияния физического износа и деградации прочностных свойств деревянных конструкций на срок службы и остаточный ресурс.

Оценки физического износа строительных конструкций посвящены работы Горшкова А.С., Соколова В.А., Белых А.В., Хайруллина В.А., Салова А.С., Яковлевой Л.А., Валишиной В.В., Васильева А.А., Алексеевой Е.Л., Хлёткина А.Ю., Мищенко В.Я., Головинского П.А., Драпалюка Д.А., Гордеевой О.Г., Шмелева Г.Д., Ибрагимова А.М., Цуканов В.Н. Варфоломеев А.Ю. и др.

Исследованием надежности элементов строительных конструкций занимались такие отечественные ученые как Болотин В.В., Гарагаш А.М., Гнеденко В.Д., Кудзис А.П., Лычев А.С, Половко Б.В., Райзер В.Д., Ржаницын А.Р., Стрелецкий Н.С., Тамразян А.Г., Уткин В.С., Уткин Л.В., Юделевич А.М., Шульман Г.С., Чирков В.П. За рубежом Аугусти Г., Aven Т., Шпете Г., Beer М., Баратта А., Melchers R.E., Li Н., Кашиати Ф., Jiang С., Tonon F., Walley P., Zhang J., и другие.

Изучением влияния длительности действия нагрузки на конструкции, выполненные из материалов на основе древесины, занимались ученые: Белянкин Ф.П., Леонтьев Н.Л., Хрулев В.М., Иванов Ю.М., Леннов В.Г., Леонтьев Н.Л., Славик Ю.Ю., Уголев Б.П., Квасников Е.Н., Ярцев В.И., Коцегубов В.П., Стрельцов Д.Ю., Кистерная М.В., Орлович Р.Б., Найчук А.Я., Рощина С.И., Сашин М.А., Васильев А.Ю., Погорельцев А.А., Животов Д.А., Цепаев В.А., Котлов В.Г., Черных А.Г., Шмидт А.Б., Коваль П.С., Данилов Е.В., Чан Куок Фонг, Сюй Юнь и др. Работы данных исследователей основаны на использовании положений кинетической теории прочности, которую разрабатывали Журков С.Н., Ратнер С.Б., Бартенев Г.М., Гуль В.Е., Регель В.Р., Степанов В.А., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е., Gerhards С.С., Barrett J.D., Foschi R.O., Folz B.R., Yao F.Z., Wang B. и др.

Цель работы – Развитие методов расчета остаточного ресурса и сроков службы балочных конструкций из LVL с учетом длительности действия нагрузки и физического износа.

Для достижение поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1) выполнить системный анализ отечественных и зарубежных литературных источников, результатов научных исследований по проблеме расчета остаточного ресурса и срока службы строительных конструкций, учета влияния длительности действия нагрузки и физического износа;

2) провести теоретические исследования аналитических зависимостей остаточного ресурса от факторов деградации прочностных свойств и физического износа для прогнозирования остаточного ресурса и сроков службы балочных конструкций LVL.

3) разработать методические положения для проведения и обработке экспериментальных исследований по определению длительной прочности LVL;

4) разработать экспериментальную установку и провести исследования по верификации ускоренного метода определения длительной прочности LVL при растяжении под различными углами наклона волокон;

5) разработать алгоритм оценки остаточного ресурса и сроков службы на примере проектирования новых и находящихся в эксплуатации несущих конструкций.

Объект исследования – изгибаемые балочные конструкции из LVL при длительном действии нагрузки.

Предмет исследования – остаточный ресурс и срок службы балочных конструкций из LVL.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, по п.3 «Развитие теории и методов оценки напряжённого состояния, живучести, риска, надёжности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности».

Научная гипотеза: срок службы и остаточный ресурс деревянных конструкций определяется совместным влиянием на несущую способность деградации прочностных свойств материала и накопления повреждений в элементах при эксплуатационных воздействиях.

Научная новизна работы состоит в:

1. Установлении зависимости длительной прочности однонаправленного клееного шпона от продолжительности действия при растяжении постоянной нагрузки для разных углов наклона к направлению волокон древесины.

2. Разработке метода определения относительной надёжности несущих конструкций из материалов на основе древесины с учетом деградации прочностных свойств.

3. Усовершенствовании метода гамма-процентного ресурса путем построения математической зависимости относительной надёжности деревянных конструкций от физического износа;

4. Разработке метода прогнозирования остаточного ресурса и сроков службы балочных конструкций из однонаправленного клееного шпона с учетом изменения прочностных свойств во времени.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке временных зависимостей для прогнозирования срока службы и остаточного ресурса с учетом длительной прочности и физического износа несущих деревянных конструкций.

Практическая значимость работы состоит в создании алгоритма оценки остаточного ресурса и сроков службы для вновь возводимых и находящихся в эксплуатации несущих деревянных конструкций.

Методология и методы исследования. Методологической и теоретической базой для исследования явились основные положения теории надёжности, термофлуктуационной теории разрушения твердых тел, длительной прочности, а также существующие методы определения срока службы и остаточного ресурса. Использованы следующие методы научного познания: измерение, эксперимент, наблюдение, моделирование и др.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод прогнозирования остаточного ресурса и срока службы несущих деревянных конструкций с использованием функции Лапласа и гамма-процентного ресурса.

2. Ускоренный метод определения длительной прочности при растяжении LVL.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению зависимости прочности LVL от времени действия постоянной нагрузки при растяжении.

4. Алгоритм оценки остаточного ресурса и сроков службы вновь проектируемых и находящихся в эксплуатации несущих деревянных конструкций из LVL.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались на 5 научных конференциях. Основные положения диссертационного исследования были доложены на:

– XI международной научно-практической конференции «Инновации в деревянном строительстве», Санкт-Петербург, 2021 г.;

– международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию кафедр железобетонных и каменных конструкций, конструкций из дерева и пластмасс, металлических конструкций и испытаний сооружений. Дата проведения, Санкт-Петербург, 2021 г.;

– научной конференции - XIII Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л. «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», Москва, 2022 г.;

– LXXV научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, 2022 г.;

– XII международной научно-практической конференции «Инновации в деревянном строительстве», Санкт-Петербург, 2023 г.

В 2020 году результаты диссертационного исследования были отмечены дипломом победителя конкурса грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов и обоснованность выводов обеспечивается применением основных положений методов расчета деревянных конструкций; использованием поверенных измерительных приборов, сертифицированного оборудования для проведения экспериментальных исследований; сходимостью в допустимых пределах результатов ускоренных и длительных испытаний элементов конструкций.

Личный вклад автора. Автор принимал личное участие в постановке и решении всех поставленных задач в рамках диссертационной работы, получении основных результатов и в публикации научных статей.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 10 научных работах, в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, 1 публикаций, индексируемые в международных базах Scopus и Web of Science, и в двух монографиях.

Внедрение результатов работы. Материалы диссертационного исследования использованы при разработке учебной дисциплины «Методы определения надежности, длительной прочности и сроков службы металлических и деревянных конструкций» по направлению подготовки/специальность 08.04.01 «Строительство» в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 205 наименований, приложений. Работа изложена на 277 страницах машинописного текста, включает 44 таблицы, 48 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована и обоснована актуальность определения срока службы и остаточного ресурса деревянных конструкций, раскрыта степень разработанности проблемы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнен анализ отечественных и зарубежных научно-технических источников по проблеме определения сроков службы и остаточного ресурса деревянных конструкций.

На основании проведенного анализа установлено:

– оценка остаточного ресурса эксплуатируемых конструкций, проводится по методике, которая не учитывается влияние конкретной величины физического износа на предельный срок службы;

– расчет срока службы вновь проектируемых объектов не производится, срок службы устанавливается проектировщиком.

– отсутствует комплексный количественный показатель для расчета срока службы и остаточного ресурса, который включал бы в себя параметры деградации прочностных свойств древесины и величину физического износа, как меру накопления повреждений.

Поэтому необходимо разработать концепцию определения сроков службы несущих конструкций с учетом коэффициента длительной прочности LVL и физического износа.

Также в ходе анализа выявлено, что длительность действия нагрузки на LVL-конструкцию учитывается при помощи коэффициента $m_{дл}$, значения которого приведены в таблице 4 СП 64.13330. Применение данных коэффициентов для клееного бруса вызывает сомнения, поскольку указанные значения не зависят от вида материала, вида нагружения, ориентации волокон и температуры эксплуатации. Проблема при определении значений коэффициентов длительной прочности для новых конструкционных материалов на основе древесины заключается в том, что необходимо проводить прямые длительные и трудоемкие испытания для разных видов НДС. В связи с этим возникает необходимость разработки ускоренного метода испытаний, который позволил бы снизить как время проведения экспериментальных исследований, так и трудозатраты и издержки при его выполнении.

Во **второй главе** предложена и теоретически обоснована концепция прогнозирования срока службы и остаточного ресурса несущих деревянных конструкций, учитывающая параметры деградации прочностных свойств и величину физического износа.

В качестве расчетного показателя используется обобщенный показатель относительной надежности, который в общем случае определяется по формуле:

$$P = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n P_i} \geq P_{\min}, \quad (1)$$

где P_{\min} – минимальный показатель относительной надежности, установленный для определенной категории технического состояния; P_i – показатель относительной надежности, для i -го критерия; n – количество используемых критериев.

При расчете только по прочностному критерию для работоспособной категории принимается $P_{\min} = 0,99865$, для ограниченно-работоспособной – $P_{\min} = 0,95450$, для аварийной – $P_{\min} = 0,68269$. В случае, если расчет ведется при $n = 2$, то $P_{\min} = 0,8$.

В данном диссертационном исследовании рассматриваются случаи при $n = 1$ для вновь проектируемых конструкций с относительной надежностью по прочностному критерию P_1 , которая учитывает механическую деградацию, и находящихся в эксплуатации с относительной надежностью по величине физического износа P_2 , которая зависит от накопления повреждений воздействия окружающей среды, а также при $n = 2$, когда учитывается совместное влияние критериев P_1 и P_2 .

Определение относительной надежности P_1 для расчета срока службы предложено выполнять с применением функции Лапласа, где индекс надежности определяется:

– параметрами кинетической теории прочности (энергия активации разрыва связей молекул, структурный коэффициент);

– величиной действующего напряжения в элементах конструкции и расчетным сопротивлением материалов на основе древесины.

При определении срока службы варьируется время. Все остальные величины (энергия активации, структурный коэффициент, температура эксплуатации, напряжения, расчетные сопротивления) принимаются постоянными. За конечный результат расчета срока службы, выполненный итерационным путем, принимается минимальное значение срока службы из полученных данных.

Основное уравнение во всех случаях при расчете срока службы имеет следующий вид:

$$P_1 = 0,5 + \Phi(\beta) \geq P_{\min}, \quad (2)$$

где $\Phi(\beta)$ – функция Лапласа.

Для каждого расчетного случая определен индекс безопасности β по формулам 3–5:

$$\beta = \left(1 - \frac{x}{x_{\text{ср}}} \right) / \nu; \quad (3)$$

$x_{\text{ср}}$ принимается равной

$$x_{\text{ср}} = (U_0 - k \cdot \sigma) / (R \cdot T). \quad (4)$$

Переменная x определяется:

$$x = \ln(\tau_c / \tau_0), \quad (5)$$

где σ – напряжение, Па; τ_0 – период тепловых колебаний, равный 10^{-13} с; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К); T – температура, К; U_0 – энергия активации процесса разрушения материала конструкции, Дж/моль; k – коэффициент, зависящий от величины масштабного фактора конструкции; ν – коэффициент вариации прочностных свойств материала конструкции.

$$\beta = \frac{m_g(t)}{S_g(t)} = \frac{m_y(t) - m_x}{\sqrt{S_y(t)^2 + S_x^2}}, \quad (6)$$

где m_y и S_y – выборочное среднее и среднее квадратическое отклонение прочности древесины в момент времени t ; m_x и S_x – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение в нормальном сечении балки от суммы нагрузок.

В качестве развития существующего метода соискателем предлагается при определении m_y и S_y учитывать коэффициенты условий работы конструкций, а также изменение прочности материала древесины во времени. Для этого принимаем, что уравнение длительной прочности $m_{дл}$ имеет вид:

$$m_{дл} = \omega \cdot \left(1 - \frac{\lg t}{\lg A} \right), \quad (7)$$

где ω – коэффициент, определяемый графоаналитическим методом на основе экспериментальных данных в полулогарифмических координатах на основе экспериментальных данных.

Тогда уравнения для m_y и S_y будут иметь вид:

$$m_y(t) = m_\sigma \cdot \prod m_i \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{\lg t}{\lg A} \right); \quad (8)$$

$$S_y(t) = S_\sigma \cdot \prod m_i \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{\lg t}{\lg A} \right), \quad (9)$$

где m_σ и S_σ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение прочности древесины, определенные по результатам испытаний.

Подставляя уравнения (8) и (9) в формулу (6), получаем:

$$\beta = \frac{m_g(t)}{S_g(t)} = \frac{m_\sigma \cdot \prod m_i \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{\lg t}{\lg A} \right) - m_x}{\sqrt{\left(S_\sigma \cdot \prod m_i \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{\lg t}{\lg A} \right) \right)^2 + S_x^2}}, \quad (10)$$

$\lg A$ определяется по формуле:

$$\lg A = \frac{U_0}{2,3 \cdot R \cdot T} - \lg \tau_0. \quad (11)$$

Коэффициент $m_{с.с}$ в формулах (8) и (9) не используется, поскольку применяется уравнение длительной прочности, которое учитывает: изменение прочности материала во времени, температуру эксплуатации и вид напряженного состояния.

Для определения относительной надежности P_2 было выдвинуто предположение, что имеется взаимосвязь между показателем P_2 , и величиной физического износа. На основании регрессионного анализа совокупности принятых значений физического износа и относительной надежности для

разных категорий технического состояния элементов конструкций установлена связь в виде уравнения (12):

$$P_2 = 1,0714 \cdot \Phi^3 - 1,3929 \cdot \Phi^2 + 0,0357 \cdot \Phi + 0,99. \quad (12)$$

Остаточный ресурс деревянных конструкций, находящихся в эксплуатации, определяется по формуле:

$$T_{\text{ос}} = T_{\text{ГПР}} - t_{\text{фак}}, \quad (13)$$

где $T_{\text{ГПР}}$ – гамма-процентный ресурс, год; $t_{\text{фак}}$ – фактическое время эксплуатации, год.

Гамма-процентный ресурс определяется по формуле:

$$T_{\text{ГПР}} = \frac{\ln y_{\min}}{\lambda}, \quad (14)$$

где y_{\min} – минимальное значение относительной надежности для каждой категории технического состояния (для ограниченно-работоспособного – $y_{\min} = 0,85$; для аварийного – $y_{\min} = 0,80$).

λ – постоянная износа, определяется по формуле:

$$\lambda = -\frac{\ln P_2}{t_{\text{фак}}}. \quad (15)$$

Для вновь проектируемых конструкций при $n = 2$ зависимость P_2 примет вид:

$$P_2 = \exp[-\lambda \cdot t]. \quad (16)$$

Для случая двух критериев ($n = 2$), когда учитывается совместное влияние деградации прочностных свойств и физический износ, уравнение (1) с учетом формул (2) и (16) приобретает вид:

$$P = \sqrt{(0,5 + \Phi(\beta)) \cdot \exp[-\lambda \cdot t]} \geq P_{\min}. \quad (17)$$

В данном случае износ во времени характеризуется постоянной величиной, устанавливаемой на основании экспериментальных наблюдений.

На основе разработанной концепции предложен алгоритм расчета сроков службы и остаточного ресурса для вновь возводимых и находящихся в эксплуатации конструкций, блок-схема которого приведена на рисунке 1.

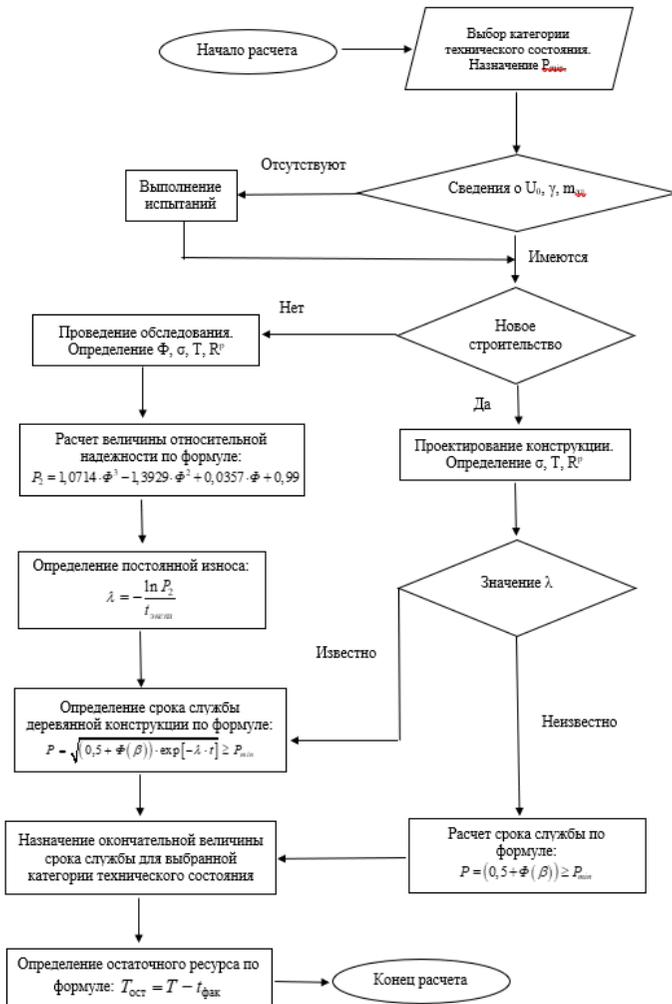


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма расчета срока службы и остаточного ресурса

В **третьей** главе рассмотрены методические вопросы планирования и организации экспериментальных исследований для определения длительной прочности, сроков службы и остаточного ресурса элементов LVL-конструкций. Глава включает в себя описание опытных образцов, измерительного и силового оборудования, нагружения, изложены методики

проведения испытаний и статистической обработки результатов, представлена экспериментальная установка для выполнения длительных испытаний LVL на растяжение. Описан ускоренный метод определения длительной прочности, в основе которого предположение о том, что при изменении скорости приложения нагрузки значение предела прочности также меняется. Таким образом, используя данное явление можно определить коэффициент длительной прочности.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований по определению зависимости прочности LVL при растяжении от времени действия постоянной нагрузки.

На первом этапе была решена задача по определению кратковременной прочности при растяжении со стандартной скоростью нагружения 4 мм/мин. Экспериментальные исследования выполнялись на универсальной электромеханической машине Instron-5989 (рисунок 2).

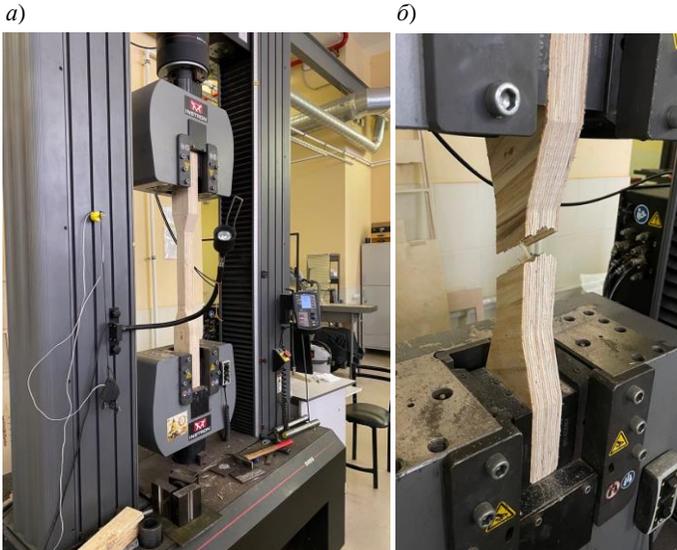


Рисунок 2 – Кратковременные испытания образцов:
 а) растяжение вдоль волокон; б) растяжение под углом к волокнам

По результатам испытаний были определены нормативные сопротивления LVL при растяжении, которые явились исходными данными для проведения прямых длительных испытаний. При проведении испытаний на кратковременное действие нагрузки все образцы имели хрупкий характер разрушения. (рисунок 3).

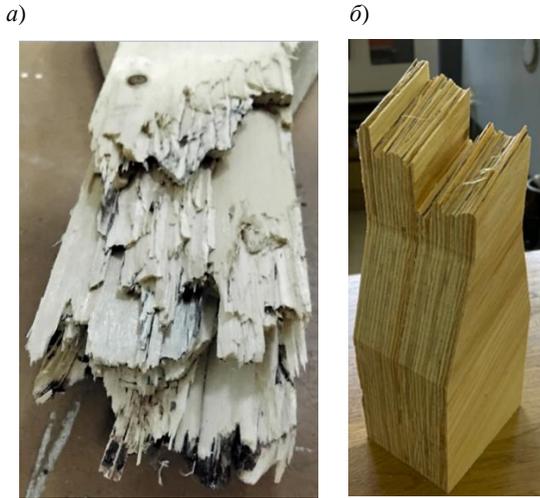


Рисунок 3 – Хрупкое разрушение образцов при кратковременных испытаниях:
 а) при угле наклона волокон 0° ; б) при угле наклона волокон 45°

Было выполнено сравнение зависимостей нормативных сопротивлений, полученных на основе экспериментальных данных, и расчетных значений, вычисленных по формуле (6), СП 64.13330 (рисунок 4).

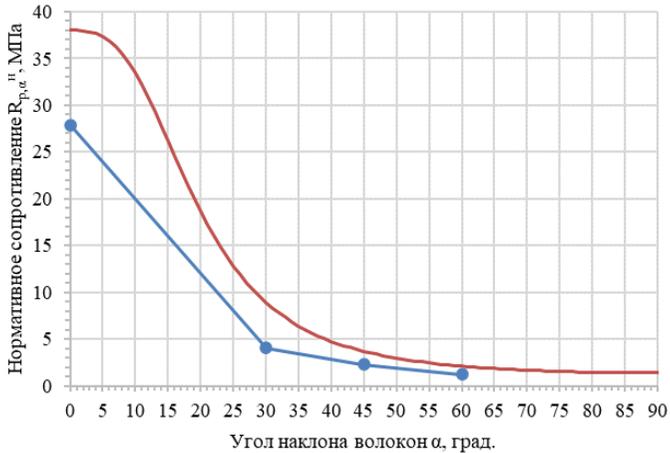


Рисунок 4 – Зависимости прочности LVL от угла наклона волокон, определенных экспериментально (синяя линия), и расчетным путем (оранжевая линия)

Анализ зависимостей, полученных экспериментальным и расчетным путем, показывает существенное расхождение нормативных значений прочности при малых углах наклона волокон, что повышает риски проектирования балочных конструкций из LVL.

На втором этапе была решена задача по определению долговечности LVL при растяжении по методу ускоренных испытаний.

Ниже показаны результаты для образцов толщиной 39 мм с углом наклона волокон 60° . Подробная информация об ускоренных испытаниях при других углах наклона волокон представлена в диссертации.

Нагружение выполнялось на скоростях 0,04, 0,4, 4, 40 и 80 мм/мин.

Результаты полученных временных сопротивлений представлены на рисунке 5.

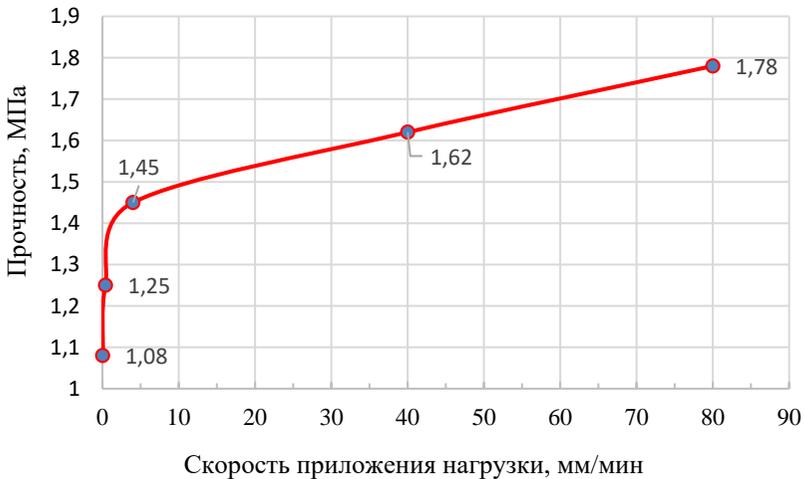


Рисунок 5 – Зависимость прочности LVL толщиной 39 мм при растяжении под углом 60° от скорости приложения нагрузки

По результатам испытаний, выполненных ускоренным методом, определялась удельная энергия активации U_0 структурный коэффициент γ (рисунок 6).

Максимальная энергия активации определялась U_0 графоаналитическим способом при $\sigma = 0$ (рисунок 6). По тангенсу угла наклона прямой φ (рисунок 6) определялось значение структурного коэффициента γ .

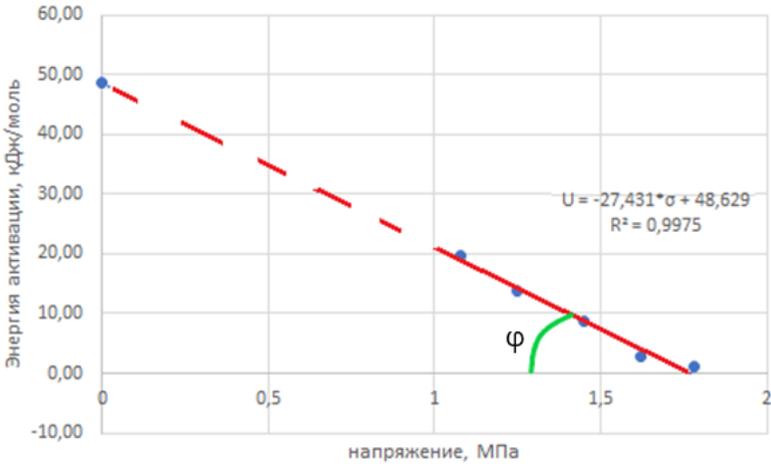


Рисунок 6 – График определения максимальной энергии активации U_0 (красная линия) по результатам ускоренных испытаний для LVL толщиной 39 мм при растяжении под углом 60°

В результате были получены следующие значение термофлуктуационных констант.

- $U_0 = 48,63$ кДж/моль;
- $\gamma = 27,43$ кДж/(моль*МПа).

По величине энергии активации с использованием формулы (11) было вычислено значение $Lg A$ равное 13,78.

Таким образом, уравнение длительной прочности LVL толщиной 39 мм при растяжении под углом 60° по результатам ускоренных испытаний приняло вид:

$$m_{дл} = 1,04 \cdot \left(1 - \frac{\lg t}{13,78} \right). \quad (18)$$

На третьем этапе исследований была выполнена верификация значений длительной прочности LVL полученных при ускоренных испытаниях. Условия проведения: влажность воздуха варьируется от 65–67%, при температуре воздуха в помещении 21° . На рисунке 7 показана схема и экспериментальная установка для определения длительной прочности LVL при постоянном действии нагрузки.

Для исследования был выбран образец толщиной 39 мм, и с углом наклона волокон 60° . Усилие растяжения создавалось с постоянной нагрузкой равной $0,8R^{вп}$ и $0,7R^{вп}$.

Вычисление значения $\lg A$ производилось аналогичного тому, как это делалось при ускоренных испытаниях по формуле (11).

По результатам длительных испытаний получено уравнение вида:

$$m_{\text{дл}} = 1,1 \cdot \left(1 - \frac{\lg t}{14,7} \right). \quad (19)$$

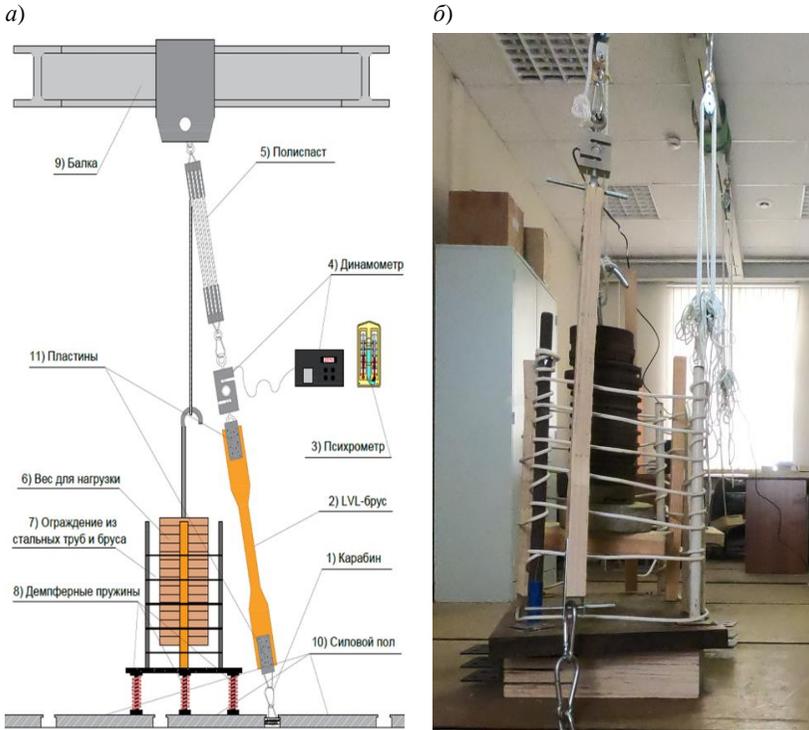


Рисунок 7 – Длительные испытания LVL на растяжение:
 а) схема экспериментальной установки;
 б) экспериментальная установка с установленным образцом

Сравнение значений длительной прочности, полученных по уравнениям (18) и (19) показало, что расхождение между результатами полученных ускоренным методом и прямыми длительными испытаниями составляет порядка 4–10%. Таким образом установлена возможность применения предложенного ускоренного метода определения длительной прочности LVL при растяжении.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению несущей способности LVL- балки и выполнен расчет срока службы. Кратковременные испытания LVL-балки (предоставленные компанией ООО «СТОД», г. Торжок) с размером поперечного сечения $b \times h = 45 \times 200$ мм и длиной $l = 6$ м проводились по методике, изложенной в ГОСТ 57790-2017 (рисунок 8).



Рисунок 8 – LVL-балка перед испытанием

Среднее экспериментальное значение несущей способности балки по результатам испытаний составило 19,37 кН. Проектная несущая способность, определенная по коэффициенту безопасности с учетом коэффициента длительной прочности LVL, равняется 16,0 кН. Расчетное же значение несущей способности равно 15,3 кН. Таким образом, несущая способность на предполагаемый срок эксплуатации обеспечена.

По разработанному алгоритму (см рисунок 1) выполнено определение срока службы для LVL-балки, как для вновь проектируемой.

Последовательность расчета.

1. Выбрана аварийная категория технического состояния: $P_{\min} = 0,68269$.
2. Энергия активации равна $U = 121,3$ кДж/моль, структурный коэффициент $\gamma = 2,24$ кДж/(моль*МПа. Указанные значения получены в ходе выполнения экспериментальных исследований. Коэффициент вариации равен 10%.

3. Конструкция является объектом нового строительства, поэтому осуществлен подбор сечения и выполнены проверки.

Исходные данные. Пролет – $l = 5,5$ м, шаг балок – $s = 0,4$ м в осях. Температура эксплуатации +25 °С (298 К). Суммарная расчетная нагрузка на 1 п.м. балки междуэтажного перекрытия равна 846,0 Н/м.

Сечение балки было равно 45×200 мм.

Расчетные сопротивления балки с учетом коэффициента длительной прочности LVL при изгибе вдоль волокон в плоскости слоев шпона (по кромке) и скалывании вдоль волокон поперек плоскости листа были определены равным соответственно 21,38 и 2,23 МПа. При действии главных напряжений под углом – 0,67 МПа.

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения действующих напряжений, расчетных сопротивлений и коэффициентов использования сечения при расчете балки LVL при изгибе вдоль волокон в плоскости слоев шпона

Вид проверки	Действующее напряжение, МПа	Расчетное сопротивление, МПа	Коэффициент использования
По нормальным напряжениям	10,66	21,38	0,50
По касательным напряжениям	0,39	2,23	0,17
Проверка устойчивости	9,19	21,38	0,43
По главным растягивающим напряжениям	0,36	0,67	0,54

Наибольший коэффициент использования получился при действии главных растягивающих напряжений, поэтому в расчете использовано значение данного напряжения.

4. Расчет срока службы выполнен по формулам (2)÷(5), методом итераций до достижения минимальной установленной относительной надежности (рисунок 9).

В результате срок службы конструкции до момента наступления аварийного состояния при действии главных растягивающих напряжений принимается 93 года.

Также было выполнено определение срока службы указанной балки как для находящейся в эксплуатации.

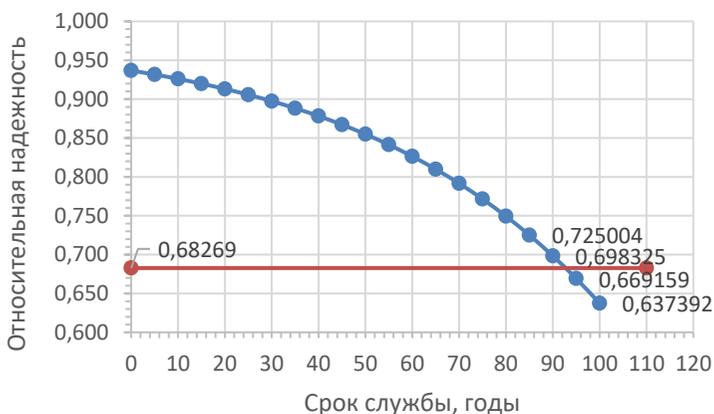


Рисунок 9 – График расчета срока службы: синяя линия – значения P_1 , полученные расчетным путем; красная линия – уровень P_{\min} для аварийного технического состояния

Последовательность расчета.

1. Выбрана аварийная категория технического состояния: $P_{\min} = 0,80$.
2. Данные по длительной прочности и значениям термофлуктуационных констант не требуется.
3. По результатам визуального обследования балок установлено, что балки имеет следы замачивания верхнего слоя шпона на площади до 30 %, биопоражения участков грибок на площади не более 3%. Физический износ определен равным 5%.
4. Относительная надежность равна $P_2 = 0,9884$.
5. Постоянная износа будет равна:

$$\lambda = -\frac{\ln P_2}{t_{\text{эксп}}} = -\frac{\ln 0,9884}{5} = \frac{0,011668}{5} = 0,0023268.$$

6. Гамма-процентный ресурс до наступления аварийного состояния:

$$t_{\text{ГПР}} = -\frac{\ln P_{\min}}{\lambda} = -\frac{\ln 0,80}{0,0023268} = \frac{0,223}{0,0023268} = 95,93 \approx 96 \text{ лет.}$$

7. Остаточный ресурс будет равен:

$$t_{\text{ост}} = t_{\text{ГПР}} - t_{\text{ф}} = 96 - 5 = 91 \text{ год.}$$

Таким образом, на основании визуальной оценки технического состояния остаточный ресурс балки из LVL составляет 91 год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. На основе выполненного анализа состояния вопроса по определению долговечности несущих деревянных конструкций обнаружено, что отсутствует метод, который позволял бы оценить совместное влияния физического износа и деградации прочностных свойств деревянных конструкций на срок службы и остаточный ресурс; выявлено, что недостаточно исследован вопрос влияния толщины элемента и угла наклона волокон на кратковременное и длительное сопротивление многослойного клееного бруса из шпона типа 1; установлено, что возможно определение длительной прочности ускоренным методом при различных скоростях нагружения.

2. Предложены аналитические зависимости остаточного ресурса от факторов деградации прочностных свойств и физического износа для прогнозирования остаточного ресурса и сроков службы балочных конструкций LVL.

3. Получены зависимости кратковременной прочности LVL при растяжении от угла наклона волокон. Установлено превышение нормативного сопротивления, рассчитанного по СП 64.13330, над экспериментальными данными при растяжении LVL под углом, что свидетельствует о необходимости корректировки несущей способности при расчете балочных конструкций из LVL.

4. Разработан ускоренный метод определения длительной прочности на основе данных кратковременных испытаний образцов с различными скоростями нагружения, определены зависимости коэффициента длительной прочности LVL при растяжении под углами 0° , 45° , и 60° .

5. Верификация результатов, полученных прямым методом, при растяжении образцов из LVL, с помощью созданной экспериментальной установки, подтвердила хорошую сходимость (4-10%) с данными, полученными ускоренным методом.

6. Предложен алгоритм оценки остаточного ресурса и сроков службы как при проектировании новых, так и находящихся в эксплуатации балочных конструкций из LVL, при учете совместного влияния физического износа и деградации прочностных свойств, что позволяет повысить достоверность оценки эксплуатационной надежности и безопасность дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Провести исследование и разработать таблицы-определители физического износа для новых материалов на основе клееной древесины, в зависимости от объёма и видов накопленных повреждений, сформировать базу данных постоянной физической износа, для разных видов деревянных конструкций.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Корольков Д.И.** Оценка остаточного ресурса деревянных конструкций по изменению геометрических параметров поперечного сечения / Д. И. Корольков // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2 (85). – С. 49–56. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-49-56.
2. **Корольков Д.И.** Оценка гамма-процентного ресурса деревянных конструкций по величине физического износа / А. Г. Черных, Д. И. Корольков, Е. В. Данилов, Т. Н. Казакевич, П. С. Коваль // Жилищное строительство. – 2022. – № 4. – С. 66–71. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-2-66-71>.
3. **Корольков, Д.И.** Определение сроков службы и остаточного ресурса LVL-конструкций при растяжении / Д. И. Корольков // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т 15. № 4. – URL: <https://esj.today/PDF/10SAVN423.pdf>.
4. **Корольков, Д.И.** Влияние угла наклона волокон на прочность и срок службы LVL-конструкции / Д. И. Корольков, А. Г. Черных, С. Н. Савин [и др.] // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15. № 5. – URL: <https://esj.today/PDF/74SAVN523.pdf>.
5. Черных, А.Г. Сравнительный анализ результатов определения длительной прочности древесины и LVL ускоренным методом при сжатии вдоль волокон / А. Г. Черных, В.Н. Глухий, П.С. Коваль, **Д.И. Корольков** [и др.] // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т 15. № 6. – URL: <https://esj.today/PDF/60SAVN623.pdf>.

Монографии

6. **Корольков Д.И.** Оценка остаточного ресурса строительных конструкций: монография / Д. И. Корольков. – СПб.: СПбГАСУ, 2021. – 168 с.
7. Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации: монография / А. Г. Черных, Е. И. Рыбнов, Н. А. Сенькин, **Д. И. Корольков** [и др.]. – СПб.: СПбГАСУ, 2021. – 358 с.

Публикации в других изданиях

8. Aleksandr Chernykh, **Dmitry Korolkov**, Denis Nizhegorodtsev, Tatiana Kazakevich, Shirali Mamedov. Estimating the residual operating life of wooden structures in high humidity conditions // Architecture and Engineering. – 2020. – Vol. 5, Iss. 1. – P. 10–19. – DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-10-19.
9. Черных А.Г., Нижегородцев Д.В., **Корольков Д.И.** Оценка остаточного ресурса объектов деревянного домостроения с применением технологии информационного моделирования // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. Материалы V Международной научно-практической конференции / Под общей редакцией А.А. Семенова. – СПб.: СПбГАСУ, 2022. – С. 198–204.
10. Черных А.Г., **Корольков Д.И.** Определение остаточного ресурса деревянных конструкций / А. Г. Черных, Д. И. Корольков // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт: Материалы IX Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е.М. – Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2022. – С. 317–321.

Компьютерная верстка *Смирновой М. В.*

Подписано к печати 10.10.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 127.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.