

УДК 69

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ: СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ЕЁ ФАКТОРОВ (ОБЗОР)

Бусаргин Дмитрий Александрович,

аспирант 3 курса, кафедра «Строительные конструкции»,
Институт архитектуры и строительства,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н. П. Огарёва», г. Саранск
E-mail: busargin20@mail.ru

Аннотация

Работа обобщает и критически сопоставляет современные представления о факторах, определяющих долговечность древесины как конструкционного материала. Рассмотрены четыре укрупнённые группы факторов – механические (кинетика накопления повреждений при кратковременном и длительном нагружении), физические (влажностные и механосорбционные эффекты), биологические и техногенные (грибное поражение, огневое воздействие), – а также инженерные средства управления долговечностью: композитное армирование, защитная обработка, неразрушающий контроль и вероятностные методы оценки надёжности. На основе анализа 48 источников показано, что перечисленные направления развивались в значительной мере независимо друг от друга, тогда как трещиностойкость древесины, определяемая методами механики разрушения, потенциально способна объединить механический, влажностный и биологический аспекты долговечности в рамках одного показателя. Сформулированы ограничения существующих подходов и намечены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: древесина, долговечность, трещиностойкость, длительная прочность, ползучесть, влажность, биологическая деградация, огневое воздействие, армирование, надёжность, обзор.

DURABILITY OF WOOD: COMPARING APPROACHES TO ASSESSING ITS FACTORS: A REVIEW

Busargin Dmitrii Aleksandrovich,

3rd year graduate student, Department of Building Structures,
Institute of Architecture and Construction,
National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk
E-mail: busargin20@mail.ru

ABSTRACT

This paper synthesises and critically compares current views on the factors that govern the durability of wood as a structural material. Four broad factor groups are considered – mechanical (damage-accumulation kinetics under short-term and long-term loading), physical (moisture and mechano-sorptive effects), and biological or man-made (fungal decay, fire exposure) – together with engineering means of controlling durability: composite reinforcement, protective treatment, non-destructive testing and probabilistic reliability assessment. Based on an analysis of 48 sources, it is argued that these research lines have largely developed independently of one another, whereas the fracture toughness of wood, as determined by fracture-mechanics methods, could potentially unify the mechanical, moisture-related and biological aspects of durability within a single indicator. Limitations of existing approaches are identified and directions for further research are outlined.

Keywords: wood, durability, fracture toughness, long-term strength, creep, moisture, biological degradation, fire exposure, reinforcement, reliability, review.

Актуальность

Возобновляемость, благоприятное соотношение прочности и массы, а также низкий углеродный след делают древесину всё более востребованным конструкционным материалом – прежде всего в контексте развития высотного деревянного домостроения и клеёных, в том числе перекрёстно-клеёных (CLT), конструкций [1–3]. Расширение области применения древесины закономерно смещает акцент требований с начальной на сохраняющуюся во времени несущую способность элементов, то есть непосредственно на их долговечность [2, 4].

Проблема долговечности древесины осложняется тем, что она не сводится к одному физическому механизму. На несущую способность элемента одновременно влияют характер и длительность нагрузки, влажностный режим эксплуатации, вероятность биологического поражения и, в отдельных случаях, огневое воздействие [1, 4]; при этом перечисленные факторы, как правило, не суммируются линейно, а взаимно усиливают друг друга – особенно в зонах концентрации напряжений, ослабленных естественными пороками или технологическими дефектами. Это обстоятельство затрудняет прямой перенос результатов, полученных для отдельного фактора в лабораторных условиях, на реальные условия эксплуатации, где факторы действуют совместно.

Существующие обзоры, как правило, рассматривают отдельные группы факторов изолированно, в границах одной предметной области, что не позволяет оценить, насколько согласованно накопленные в разных областях модели описывают долговечность древесины как единое свойство.

Цель исследования

Цель настоящей работы состоит не в последовательном описании каждой группы факторов по отдельности – это неоднократно делалось в специализированной литературе, – а в сопоставлении подходов, развитых в разных предметных областях: механике разрушения, теории ползучести, физике древесины, микологии и теории надёжности. Такое сопоставление позволяет оценить, насколько согласованно эти подходы в совокупности описывают долговечность древесины как единое, количественно определяемое свойство, и где проходят границы между уже сложившимися направлениями исследований.

Материалы и методы исследования

Материалом обзора послужили 48 научных источников: отечественные и зарубежные монографии, статьи в рецензируемых периодических изданиях, диссертационные работы,

а также действующие нормативные документы (ГОСТ, СП, EN). Хронологический охват выборки – с 1934 по 2022 год, что позволяет проследить развитие представлений о долговечности древесины от классических работ по длительному сопротивлению до современных вероятностных и биологических моделей.

Отбор источников проводился по тематическому принципу: включались работы, содержащие количественные либо модельные описания процессов деградации древесины во времени, а также нормативные документы, регламентирующие оценку долговечности и надёжности деревянных конструкций.

Методической основой анализа послужило сопоставление источников не по хронологии и не по предметной принадлежности, а по типу применяемого расчётного аппарата и по кругу учитываемых им переменных. Для каждой выделенной группы факторов долговечности определялись: представительный расчётный аппарат, характерный набор входных параметров и основное ограничение, препятствующее совместному учёту с остальными группами. Результаты такого сопоставления сведены в таблицу 1.

Результаты и их обсуждение

Укрупнённая классификация факторов, определяющих долговечность древесины, приведена на рисунке 1.

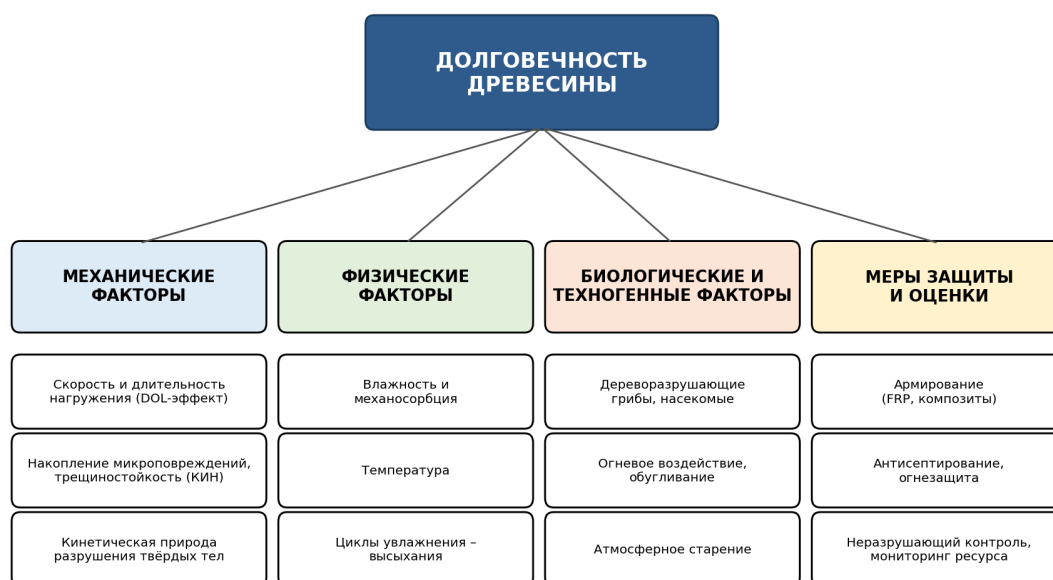


Рисунок 1 – Укрупнённая классификация факторов, определяющих долговечность древесины

Трещиностойкость древесины как показатель, объединяющий механические факторы долговечности

Наиболее развитый аппарат количественной оценки способности материала сопротивляться развитию дефектов даёт механика разрушения, оперирующая понятием трещиностойкости [6, 7]. Для бетона процедура определения характеристик трещиностойкости при статическом нагружении закреплена ГОСТ 29167-2021 [5]; специализированного стандарта для древесины в отечественной практике не существует, однако ряд работ – зарубежных [11–13, 15] и отечественных [8–10, 16] – показывает, что подходы линейной механики разрушения переносимы на этот анизотропный материал при корректном учёте его структурных особенностей.

Показательно, что даже в пределах одного узкого направления – трещиностойкости древесины – исследователи расходятся в том, какой фактор вносит основной вклад в наблюдаемый разброс результатов. Ashby с соавторами [11] и Reiterer с соавторами [14] связывают разброс прежде всего с анизотропией материала и ориентацией трещины относительно волокон, тогда как Schniewind и Centeno [12], одними из первых включившие фактор времени в анализ трещиностойкости, указывают на определяющую роль скорости нагружения. В обобщающей монографии Smith, Landis и Gong [13] значительный статистический разброс характеристик разрушения трактуется как неотъемлемое свойство древесины как природного материала, а не как следствие несовершенства методики испытаний. Отечественные экспериментальные данные о разрушении древесины при сжатии [9, 10] не позволяют однозначно разделить эти два эффекта, поскольку в природных образцах анизотропия и естественные пороки неизбежно сопутствуют друг другу, – что можно считать общим методическим ограничением большинства выполненных к настоящему времени испытаний, включая обобщённые в [16].

Длительная прочность, ползучесть и эффект продолжительности нагружения

Представление о том, что несущая способность древесины снижается при длительном действии нагрузки – эффект продолжительности нагружения (*duration of load*, DOL), – восходит к первой половине XX века и подробно рассмотрено ещё в монографии Ф. П. Белянкина [19]. Общеуниверсальную базу для описания ползучести и длительной прочности деформируемых тел вне зависимости от конкретного материала дали работы Ю. Н. Работнова [17] и А. Р. Ржаницына [18]; на этом фоне зарубежные модели накопления повреждений – вероятностная модель *creep rupture* Barrett и Foschi [20] и кумулятивная модель Gerhards и Link [21] – можно рассматривать как частные, эмпирически откалиброванные приложения более общей теории ползучести твёрдых тел к древесине как конкретному материалу.

Показательно, что современные работы по DOL-эффекту [22, 23] в основном опираются на переанализ массивов данных, накопленных ещё в середине XX века, а не на принципиально новые серии испытаний, – то есть развитие направления идёт скорее по пути совершенствования статистического аппарата, чем расширения экспериментальной базы. Для реконструируемых конструкций, где предшествующая история нагружения известна не полностью, это создаёт дополнительную неопределённость, отмечаемую, в частности, в диссертации С. В. Деордиева [24].

Кинетическая природа разрушения твёрдых тел применительно к древесине

Физическое обоснование зависимости прочности от времени и температуры даёт кинетическая концепция прочности твёрдых тел С. Н. Журкова [25], развитая совместно с В. Р. Регелем и Э. Е. Томашевским [26]: разрушение трактуется не как мгновенный акт достижения предельного напряжения, а как термофлуктуационный процесс постепенного разрыва межатомных связей, скорость которого экспоненциально зависит от напряжения и температуры. Для древесины, где несущими являются главным образом водородные связи между цепями целлюлозы, эта концепция даёт физическое объяснение эмпирически наблюдаемой чувствительности прочности к скорости нагружения [12] и температуре [18, 19]. Вместе с тем, в отличие от металлов и однородных полимеров, для которых кинетическая теория разрабатывалась изначально, применительно к древесине она до сих пор не получила количественно откалиброванной формы, учитывающей анизотропию и естественную неоднородность материала, – это направление остаётся скорее общетеоретической рамкой, чем инструментом расчёта.

Влажность и механосорбционные эффекты

Влажность древесины признаётся одним из наиболее значимых физических факторов долговечности начиная с классических работ Skaar [28] о взаимодействии древесины с водой. Экспериментально установлено, что деформации древесины под

нагрузкой существенно возрастают именно при одновременном изменении влажности, а не при постоянном, пусть и высоком, влагосодержании – так называемый механосорбционный эффект, впервые системно описанный Armstrong и Christensen [29] и впоследствии формализованный в виде реологических моделей типа обобщённой модели Кельвина – Фойгта с «гигромеханическими» элементами [31]. Ranta-Maunus [30] показал, что механосорбционная ползучесть может в несколько раз превышать чисто механическую составляющую при постоянной влажности – свойство, которое в инженерной практике нередко воспринимается как второстепенное, хотя способно доминировать в общем балансе деформаций конструкции.

В отечественной литературе совместное влияние напряжённого состояния, температуры и жидких сред на предел длительного сопротивления древесины систематически исследовано В. П. Ярцевым [27]; полученные им данные о снижении длительной прочности в агрессивных жидких средах логично дополняют зарубежные механосорбционные модели [29–31], однако их прямое количественное сопоставление затруднено различием методик испытаний и принятых критериев разрушения – проблема, характерная в целом для сопоставления отечественных и зарубежных данных по древесине.

Биологическая деградация и огневое воздействие

Обзор Marais, Brischke и Militz [32] систематизирует биотические и абиотические факторы, определяющие устойчивость древесины к разрушению в наземных и водных условиях, а модель деградации бурой гнилью Brischke и Meyer-Veltrup [34] и обзор методов прогнозирования срока службы Isaksson с соавторами [33] образуют, по существу, самостоятельное направление исследований, слабо пересекающееся с рассмотренными выше механическими моделями DOL-эффекта. Формально оба направления описывают один и тот же итог – потерю несущей способности элемента во времени, – но опираются на разный набор переменных: механические модели [17–23] строятся вокруг уровня напряжений и истории нагружения, тогда как биологические модели [32–34] – вокруг влажности, температуры и видового состава дереворазрушающих организмов, почти не учитывая напряжённое состояние материала. Классификация древесины по классам эксплуатации и стойкости к биологическим агентам, закреплённая стандартами EN 350 [35] и EN 335 [36], частично компенсирует этот разрыв на нормативном уровне, но не на уровне расчётных моделей.

Огневое воздействие занимает в этой картине промежуточное положение: оно снижает несущую способность элемента не только за счёт непосредственной потери сечения, но и, предположительно, за счёт ухудшения трещиностойкости сохранившейся древесины в приповерхностной зоне, – эффект, качественно родственный биологической деградации, но не описываемый моделями [32–34] и требующий, на наш взгляд, отдельного методического аппарата, объединяющего механику разрушения с представлениями о термическом повреждении материала.

Армирование как способ управления долговечностью деревянных конструкций

Армирование композитными материалами – стеклопластиковой, базальтопластиковой или углеродной арматурой, а также накладками на основе углеволокна – остаётся наиболее распространённым конструктивным способом повышения долговечности деревянных элементов. По данным С. И. Рощиной [37], армирование не только повышает несущую способность, но и снижает ползучесть конструкции за счёт перераспределения части нагрузки на более жёсткий и менее подверженный длительному деформированию армирующий элемент – то есть воздействует именно на механизм длительного деформирования, рассмотренный выше. Отечественный опыт усиления эксплуатируемых деревянных конструкций композитными материалами, включая объекты культурного наследия, обобщён А. С. Кавелиным с соавторами [40] и Т. В. Потаповой [41].

Вместе с тем повышение долговечности армированного элемента ограничено долговечностью самого соединения «древесина – композит». Custódio, Broughton и Cruz [39] показывают, что деградация клеевого шва под влиянием циклов увлажнения и температуры может стать лимитирующим фактором долговечности всей усиленной конструкции даже при формально достаточной прочности исходных материалов, а обзор Ghazijahani с соавторами [38] связывает эту деградацию прежде всего с несовпадением коэффициентов влажностного и температурного расширения древесины и полимерного композита. Иными словами, армирование скорее смещает проблему долговечности из объёма материала в зону контакта разнородных сред, чем устраняет её, – что целесообразно учитывать при оценке эффективности этого способа на длительных интервалах эксплуатации.

Вероятностные методы и надёжность деревянных конструкций

Поскольку и прочностные характеристики древесины, и интенсивность рассмотренных выше факторов деградации носят случайный характер, всё отчётливее проявляется тенденция к переходу от детерминированных запасов прочности к вероятностной оценке долговечности. Основы вероятностного нормирования расчётных сочетаний нагрузок заложены Ellingwood и Galambos [42], а систематическое изложение методов анализа и прогнозирования надёжности строительных конструкций дано в монографии Melchers и Beck [43]; отечественная нормативная база опирается на близкие принципы, закреплённые ГОСТ 27751-2014 [44]. Характерно, однако, что вероятностные модели – как отечественные, так и зарубежные – чаще всего строятся вокруг DOL-эффекта [20, 23] как единственного случайного фактора, тогда как влажностные и биологические факторы, рассмотренные выше, в явном вероятностном виде учитываются существенно реже. Иными словами, достигнутый уровень вероятностного описания долговечности древесины пока отстаёт от признаваемой многофакторности самого явления.

Оценка остаточного ресурса и неразрушающий контроль

Практическая оценка долговечности эксплуатируемых конструкций требует средств диагностики, не разрушающих обследуемый элемент. Общие принципы определения остаточного ресурса строительных конструкций систематизированы Д. И. Корольковым [45]. Инструментальную основу диагностики составляют акустические, ультразвуковые и инфракрасные термографические методы, обзор которых даёт Ross [46] и Riggio с соавторами [47]: эти методы позволяют локализовать дефекты, зоны биологического поражения и участки повышенной влажности без вскрытия конструкции, но, как отмечают сами авторы обзоров, дают лишь косвенную оценку остаточной несущей способности – то есть для интерпретации результатов диагностики всё равно требуется расчётная модель долговечности, единство которой, как показано выше, само остаётся предметом дискуссии. Требования к проектированию конструктивных мер защиты и армирования деревянных конструкций в Российской Федерации закреплены СП 64.13330.2017 [48].

Сопоставление рассмотренных подходов

Основные результаты проведённого сопоставления сведены в таблице 1, где для каждой группы факторов указан представительный расчётный аппарат и, по мнению автора, его главное ограничение.

Таблица 1 – Сопоставление групп факторов долговечности древесины и ограничений соответствующего расчётного аппарата

№	Группа факторов	Представительный расчётный аппарат	Источник	Основное ограничение
1	Механическая (кратковременная и длительная прочность,	Линейная механика разрушения; кинетическая теория прочности;	[5–23, 25, 26]	Слабый учёт влажностных и биологических

№	Группа факторов	Представительны й расчётный аппарат	Источник и	Основное ограничение
	трещиностойкость)	вероятностные модели DOL		факторов в едином расчётном аппарате
2	Физическая (влажность, механосорбция)	Гигромеханические реологические модели (типа Кельвина – Фойгта)	[27–31]	Различие методик испытаний в отечественной и зарубежной практике затрудняет сопоставление данных
3	Биологическая	Модели риска грибного поражения; классы эксплуатации по EN 350/335	[32–36]	Модели почти не учитывают напряжённое состояние материала
4	Техногенная (огневое воздействие)	Оценка остаточного сечения после обугливания	[32–34] (по анalogии)	Отсутствует специализированный аппарат, объединяющий термическое повреждение и механику разрушения
5	Организационно- конструктивная (армирование, диагностика, надёжность)	Композитное армирование; неразрушающий контроль; вероятностные модели надёжности	[37–48]	Вероятностные модели надёжности учитывают преимущественно DOL-эффект, а не совокупность факторов 1–4

Выводы

Проведённое сопоставление показывает, что исследования долговечности древесины по-прежнему распределены между относительно изолированными предметными областями – механикой разрушения и ползучести, физикой влажностных явлений, микологией древесины и теорией надёжности, – каждая из которых располагает собственным, достаточно зрелым математическим аппаратом (таблица 1), но описывает лишь часть общей картины деградации материала.

Наиболее вероятным кандидатом на роль объединяющего показателя, судя по рассмотренным работам, остаётся трещиностойкость древесины: поскольку любое из рассмотренных воздействий – механическое, влажностное или биологическое – в конечном счёте проявляется через снижение способности материала сопротивляться распространению уже имеющихся дефектов, изменение этой характеристики потенциально позволяет сравнивать между собой разнородные по природе факторы долговечности в единых физических величинах.

Практическим следствием сделанных наблюдений является необходимость методик, позволяющих сопоставлять влияние различных факторов долговечности – скорости и

длительности нагружения, увлажнения, огневого воздействия – в рамках одной экспериментальной программы и на едином комплекте образцов, а не заимствовать разрозненные количественные оценки из работ, выполненных для разных пород древесины, условий испытаний и критериев разрушения. Разработка подобной методики, адаптированной из ГОСТ 29167-2021 [5, 8, 10], составляет направление дальнейших исследований автора.

Список литературы:

1. Карлсен Г. Г., Слишкоухов Ю. В. Конструкции из дерева и пластмасс. М.: Стройиздат, 1986. 543 с.
2. Ramage M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 68, Part 1. P. 333–359.
3. Green M. et al. Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance. Basel: Birkhäuser, 2017. 222 p.
4. Уголев Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Московский государственный университет леса, 2004. 340 с.
5. ГОСТ 29167-2021. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: РСТ, 2022. 22 с.
6. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
7. Bažant Z. P., Planas J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. Boca Raton: CRC Press, 1998. 616 p.
8. Найчук А. Я., Петрукович А. Н. О вязкости разрушения древесины сосны КИС при кратковременном действии статической нагрузки // Вестник Брестского государственного технического университета. 2005. № 2 (26). С. 60–63.
9. Шемякин Е. И., Тутурин С. В., Короткина М. Р. Разрушение древесины при сжатии // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2005. № 3. С. 56–70.
10. Бусаргин Д. А., Лазарев А. Л., Осина П. Н., Качурин В. А. Характер разрушения древесины при сжатии // Оригинальные исследования. 2023. Т. 13, № 7. С. 135–140.
11. Ashby M. F. et al. The fracture toughness of woods // Proceedings of the Royal Society A. 1985. Vol. 398. P. 261–280.
12. Schniewind A. P., Centeno J. C. Fracture toughness and duration of load factor. I. Six principal systems of crack propagation // Wood and Fiber Science. 1973. Vol. 5, № 2. P. 152–159.
13. Smith I., Landis E., Gong M. Fracture and Fatigue in Wood. Chichester: Wiley, 2003. 242 p.
14. Reiterer A., Stanzl-Tschegg S. E., Tschegg E. K. The influence of crack growth angle on the fracture toughness of wood // Wood Science and Technology. 2000. Vol. 34. P. 417–429.
15. Gustafsson P. J. Fracture mechanics in timber engineering – strength analyses of components and joints // Materials and Structures. 2006. Vol. 39. DOI: 10.1617/s11527-006-9121-0.
16. Найчук А. Я. Трещиностойкость и несущая способность элементов и узлов деревянных конструкций: дис. ... д-ра техн. наук. Брест, 2010. 312 с.
17. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
18. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат, 1968. 416 с.

19. Белянкин Ф. П. Длительное сопротивление древесины. М.: ОНТИ, 1934. 280 с.
20. Barrett J. D., Foschi R. O. Duration of load and probability of failure in wood. Part 1: Modeling creep rupture // Canadian Journal of Civil Engineering. 1978. Vol. 5, № 4. P. 505–514.
21. Gerhards C. C., Link C. L. A cumulative damage model to predict load duration characteristics of lumber // Wood and Fiber Science. 1987. Vol. 19, № 2. P. 147–164.
22. Pellicciari M. et al. Re-analysis of historical data and model calibration of duration of load effect on structural timber // Journal of Structural Engineering (ASCE). 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003148.
23. Köhler J., Sørensen J. D., Faber M. H. Reliability-based calibration of load duration factors for timber structures // Structural Safety. 2007. Vol. 29, № 4. P. 306–327.
24. Деордиев С. В. Влияние вида длительно действовавших напряжений на прочность древесины реконструируемых конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2022.
25. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твёрдых тел // Вестник Академии наук СССР. 1957. № 11. С. 78–82.
26. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
27. Ярцев В. П. Влияние вида напряжённого состояния, температуры и жидких сред на предел длительного сопротивления древесины // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2000. Т. 6, № 1. С. 137–147.
28. Skaar C. Wood-Water Relations. Berlin: Springer, 1988. 283 p.
29. Armstrong L. D., Christensen G. N. Influence of moisture changes on deformation of wood under stress // Nature. 1961. Vol. 191. P. 869–870.
30. Ranta-Maunus A. The viscoelasticity of wood at varying moisture content // Wood Science and Technology. 1975. Vol. 9. P. 189–205.
31. Dubois F. et al. A generalised Kelvin-Voigt model integrating specific hygro-lock springs for timber creep // Mechanics of Time-Dependent Materials. 2012. Vol. 16, № 4. P. 439–460.
32. Marais B. N., Brischke C., Militz H. Wood durability in terrestrial and aquatic environments: A review of biotic and abiotic influence factors // Wood Material Science & Engineering. 2022. Vol. 17. P. 82–105.
33. Isaksson T., Brischke C., Thelandersson S. Estimating the service life of timber structures concerning risk and influence of fungal decay: a review // Forests. 2021. Vol. 12, № 5. Ст. 588.
34. Brischke C., Meyer-Veltrup L. Modelling timber decay caused by brown rot fungi // Materials and Structures. 2016. Vol. 49. P. 3281–3291.
35. EN 350:2016. Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. Brussels: CEN, 2016.
36. EN 335:2013. Durability of wood and wood-based products – Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products. Brussels: CEN, 2013.
37. Рощина С. И. Армирование – способ повышения надёжности и долговечности деревянных конструкций // Лесной журнал. 2008. № 2. С. 71–75.
38. Ghazijahani T. G. et al. Durability of FRP-wood composite members: An overview // Composite Structures. 2022. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115979.

39. Custódio J., Broughton J., Cruz H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2009. Vol. 29, № 2. P. 173–185.
40. Кавелин А. С., Тютина А. Д., Нуриев В. Э., Колтакова В. А. Армирование деревянных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6156 (дата обращения: 15.03.2024).
41. Потапова Т. В. К вопросу усиления эксплуатируемых деревянных конструкций композитными материалами // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7533 (дата обращения: 15.03.2024).
42. Ellingwood B., Galambos T. V. et al. Probability-based load criteria: load factors and load combinations // Journal of the Structural Division (ASCE). 1982. Vol. 108, № 5. P. 978–997.
43. Melchers R. E., Beck A. T. Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2018. 528 p.
44. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2015.
45. Корольков Д. И. Оценка остаточного ресурса строительных конструкций: монография. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. 168 с.
46. Ross R. J. Nondestructive Evaluation of Wood. 2nd ed. Madison: USDA Forest Products Laboratory, 2015. 176 p.
47. Riggio M. et al. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques // Materials and Structures. 2014. Vol. 47. P. 749–766.
48. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. М.: Минстрой России, 2017.

References:

1. Karlsen G. G., Slitskoukhov Yu. V. Konstruktsii iz dereva i plastmass [Structures of wood and plastics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 543 p. (in Russian)
2. Ramage M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 68, part 1, pp. 333–359.
3. Green M. et al. Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance. Basel, Birkhäuser, 2017. 222 p.
4. Ugolev B. N. Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya [Wood science with the basics of forest product studies]. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2004. 340 p. (in Russian)
5. GOST 29167-2021. Betony. Metody opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении [Concretes. Methods for determination of fracture toughness characteristics under static loading]. Moscow, RST Publ., 2022. 22 p. (in Russian)
6. Cherepanov G. P. Mekhanika khrupkogo razrusheniya [Mechanics of brittle fracture]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 640 p. (in Russian)
7. Bažant Z. P., Planas J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. Boca Raton, CRC Press, 1998. 616 p.

8. Naychuk A. Ya., Petrukovich A. N. O vyazkosti razrusheniya drevesiny sosny KIC pri kratkovremennom deystvii staticheskoy nagruzki [On the fracture toughness KIC of pine wood under short-term static loading]. Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2005, no. 2 (26), pp. 60–63. (in Russian)
9. Shemyakin E. I., Tuturin S. V., Korotkina M. R. Razrushenie drevesiny pri szhatii [Fracture of wood under compression]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik, 2005, no. 3, pp. 56–70. (in Russian)
10. Busargin D. A., Lazarev A. L., Osina P. N., Kachurin V. A. Kharakter razrusheniya drevesiny pri szhatii [Fracture pattern of wood under compression]. Original'nye issledovaniya, 2023, vol. 13, no. 7, pp. 135–140. (in Russian)
11. Ashby M. F. et al. The fracture toughness of woods. Proceedings of the Royal Society A, 1985, vol. 398, pp. 261–280.
12. Schniewind A. P., Centeno J. C. Fracture toughness and duration of load factor. I. Six principal systems of crack propagation. Wood and Fiber Science, 1973, vol. 5, no. 2, pp. 152–159.
13. Smith I., Landis E., Gong M. Fracture and Fatigue in Wood. Chichester, Wiley, 2003. 242 p.
14. Reiterer A., Stanzl-Tschegg S. E., Tschegg E. K. The influence of crack growth angle on the fracture toughness of wood. Wood Science and Technology, 2000, vol. 34, pp. 417–429.
15. Gustafsson P. J. Fracture mechanics in timber engineering – strength analyses of components and joints. Materials and Structures, 2006, vol. 39.
16. Naychuk A. Ya. Treshchinostoykost' i nesushchaya sposobnost' elementov i uzlov derevyannykh konstruktsiy [Fracture toughness and load-bearing capacity of timber structural members and joints]. Dr. eng. sci. diss. Brest, 2010. 312 p. (in Russian)
17. Rabotnov Yu. N. Polzuchest' elementov konstruktsiy [Creep of structural members]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 752 p. (in Russian)
18. Rzhantsyn A. R. Teoriya polzuchesti [Theory of creep]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968. 416 p. (in Russian)
19. Belyankin F. P. Dlitel'noe soprotivlenie drevesiny [Long-term resistance of wood]. Moscow, ONTI Publ., 1934. 280 p. (in Russian)
20. Barrett J. D., Foschi R. O. Duration of load and probability of failure in wood. Part 1: Modeling creep rupture. Canadian Journal of Civil Engineering, 1978, vol. 5, no. 4, pp. 505–514.
21. Gerhards C. C., Link C. L. A cumulative damage model to predict load duration characteristics of lumber. Wood and Fiber Science, 1987, vol. 19, no. 2, pp. 147–164.
22. Pelliciari M. et al. Re-analysis of historical data and model calibration of duration of load effect on structural timber. Journal of Structural Engineering (ASCE), 2021.
23. Köhler J., Sørensen J. D., Faber M. H. Reliability-based calibration of load duration factors for timber structures. Structural Safety, 2007, vol. 29, no. 4, pp. 306–327.
24. Deordiev S. V. Vliyanie vida dlitel'no deystvovavshikh napryazheniy na prochnost' drevesiny rekonstruiemykh konstruktsiy [Influence of long-acting stresses on the strength of wood in reconstructed structures]. Cand. eng. sci. diss. Vladimir, 2022. (in Russian)

25. Zhurkov S. N. Kineticheskaya kontseptsiya prochnosti tvyordykh tel [Kinetic concept of the strength of solids]. Vestnik Akademii nauk SSSR, 1957, no. 11, pp. 78–82. (in Russian)
26. Regel V. R., Slutsker A. I., Tomashevskiy E. E. Kineticheskaya priroda prochnosti tvyordykh tel [Kinetic nature of the strength of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 560 p. (in Russian)
27. Yartsev V. P. Vliyanie vida napryazhyonnogo sostoyaniya, temperatury i zhidkikh sred na predel dlitel'nogo soprotivleniya drevesiny [Influence of stress state, temperature and liquid media on the long-term strength limit of wood]. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2000, vol. 6, no. 1, pp. 137–147. (in Russian)
28. Skaar C. Wood-Water Relations. Berlin, Springer, 1988. 283 p.
29. Armstrong L. D., Christensen G. N. Influence of moisture changes on deformation of wood under stress. Nature, 1961, vol. 191, pp. 869–870.
30. Ranta-Maunus A. The viscoelasticity of wood at varying moisture content. Wood Science and Technology, 1975, vol. 9, pp. 189–205.
31. Dubois F. et al. A generalised Kelvin-Voigt model integrating specific hygro-lock springs for timber creep. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2012, vol. 16, no. 4, pp. 439–460.
32. Marais B. N., Brischke C., Militz H. Wood durability in terrestrial and aquatic environments: A review of biotic and abiotic influence factors. Wood Material Science & Engineering, 2022, vol. 17, pp. 82–105.
33. Isaksson T., Brischke C., Thelandersson S. Estimating the service life of timber structures concerning risk and influence of fungal decay: a review. Forests, 2021, vol. 12, no. 5, art. 588.
34. Brischke C., Meyer-Veltrup L. Modelling timber decay caused by brown rot fungi. Materials and Structures, 2016, vol. 49, pp. 3281–3291.
35. EN 350:2016. Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. Brussels, CEN, 2016.
36. EN 335:2013. Durability of wood and wood-based products – Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products. Brussels, CEN, 2013.
37. Roshchina S. I. Armirovanie – sposob povysheniya nadyozhnosti i dolgovechnosti derevyannykh konstruktsiy [Reinforcement as a method to improve the reliability and durability of timber structures]. Lesnoy zhurnal, 2008, no. 2, pp. 71–75. (in Russian)
38. Ghazijahani T. G. et al. Durability of FRP-wood composite members: An overview. Composite Structures, 2022.
39. Custódio J., Broughton J., Cruz H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, vol. 29, no. 2, pp. 173–185.
40. Kavelin A. S., Tyutina A. D., Nuriev V. E., Koltakova V. A. Armirovanie derevyannykh konstruktsiy [Reinforcement of timber structures]. Inzhenernyy vestnik Dona, 2019, no. 8. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6156 (accessed 15.03.2024). (in Russian)
41. Potapova T. V. K voprosu usileniya ekspluatiruemykh derevyannykh konstruktsiy kompozitnymi materialami [On strengthening in-service timber structures with composite materials]. Inzhenernyy vestnik Dona, 2022, no. 3. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7533 (accessed 15.03.2024). (in Russian)

42. Ellingwood B., Galambos T. V. et al. Probability-based load criteria: load factors and load combinations. *Journal of the Structural Division (ASCE)*, 1982, vol. 108, no. 5, pp. 978–997.
43. Melchers R. E., Beck A. T. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 3rd ed. Chichester, John Wiley & Sons, 2018. 528 p.
44. GOST 27751-2014. Nadyozhnost' stroitel'nykh konstruktsiy i osnovaniy. Osnovnye polozheniya [Reliability of building structures and foundations. Basic principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. (in Russian)
45. Korol'kov D. I. Otsenka ostatochnogo resursa stroitel'nykh konstruktsiy [Assessment of the residual life of building structures]. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2020. 168 p. (in Russian)
46. Ross R. J. *Nondestructive Evaluation of Wood*. 2nd ed. Madison, USDA Forest Products Laboratory, 2015. 176 p.
47. Riggio M. et al. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 749–766.
48. SP 64.13330.2017. Derevyannye konstruktsii [Timber structures]. Moscow, Minstroy Rossii, 2017. (in Russian)