

УДК 624.07

© П. С. Коваль, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-68-80

© P. S. Koval, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru

УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ И МАТЕРИАЛОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ

ACCELERATED METHOD FOR DETERMINING THE LONG-TERM STRENGTH OF WOOD AND WOOD-BASED MATERIALS

В работе предлагается ускоренный метод определения длительной прочности древесины и материалов на ее основе, базирующийся на кинетической концепции разрушения твердых тел. Испытание проводится с замедляющейся скоростью роста напряжений, что позволяет существенно отложить момент разрушения, тем самым увеличив экспериментально определяемое приведенное время по сравнению с известным методом испытания при линейно возрастающих напряжениях. Напряжения изменяются во времени нелинейно, с зависимостью, описываемой уравнением квадратичной параболы. Разработанный метод может быть использован для дальнейших исследований долговечности материалов на основе древесины и конструкций из них при различных напряженных состояниях.

Ключевые слова: материалы на основе древесины, длительная прочность, кинетическая концепция разрушения твердых тел.

The paper proposes an accelerated method for determining the long-term strength of wood and wood-based materials, which is based on the kinetic approach to fracture of solids. The test is carried out with a slowing rate of stress growth, which makes it possible to significantly delay the moment of fracture, thereby increasing the experimentally determined reduced time compared with the known test method at linearly increasing stresses. The stresses do not change over time linearly, with the dependence described by the quadratic parabola equation. The developed method can be used for further studies of the durability of wood-based materials and structures made of them under various stress-strain states.

Keywords: wood-based materials, long-term strength, kinetic approach to fracture of solids.

Введение

Расчет строительных конструкций из древесины и материалов на ее основе в соответствии с методом предельных состояний включает определение длительной прочности [1–3]. Для этого расчетное сопротивление умножается на коэффициент длительной прочности ($m_{дл}$), который принимается на основе табличных данных по действующей нормативной документа-

ции¹ в зависимости от режима нагружения в конкретной расчетной ситуации. Режим нагружения представляет собой специфическое сочетание нагрузок, характеризующееся определенными пропорциями напряжений, вызываемых нагрузками различной длительности. Действительным характером

¹ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с изменениями № 1–4). М.: Стандартинформ, 2024. 103 с.

переменных во времени нагрузок при этом пренебрегают, и нагружение считается квазистатическим. Указанный переход обеспечивается за счет понятия о приведенном времени действия нагрузки t_n , т. е. снижением ее расчетной длительности [4].

Исследования зависимости прочности материалов при различных напряженных состояниях от приведенного времени, т. е. при постоянно действующих нагрузках, широко представлены в научной литературе [5–21]. Принята гипотеза о справедливости для древесины и материалов на ее основе (таких как LVL, фанера, ДПК (древесина перекрестно-клееная), ОСП (ориентированно-стружечная плита) и т. п.) кинетической (термофлуктуационной) концепции разрушения твердых тел С. Н. Журкова и его научной школы [5, 22], Г. М. Бартенева [23, 24], а также последователей [25–28]. Время до разрушения образца (элемента конструкции) под постоянной нагрузкой определяется формулой

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT} \right], \quad (1)$$

где τ — долговечность (время до разрушения при постоянных напряжениях), с; τ_0 — период собственных колебаний атомов, 10^{-13} с; U_0 — начальная энергия активации, Дж/моль; γ — структурно-чувствительный коэффициент, определяемый материалом и видом НДС; σ — постоянно действующие напряжения, МПа; k — постоянная Больцмана, $1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T — абсолютная температура, К.

В нормативной и технической литературе^{1,2,3} по проектированию и исследованию деревянных конструкций кинетическая концепция разрушения твердых тел представлена в виде модели длительной

прочности древесины Ю. М. Иванова [9–11, 29–40] (рис. 1). Указанная модель предполагает, что:

- 1) деградация прочностных свойств материала необратима;
- 2) материал рассматривается как сплошной, квазигомогенный;
- 3) взаимосвязь прочности и времени нагружения не зависит от вида НДС и ориентации сил относительно направления волокон древесины, т. е. не наблюдается анизотропии долговечности;
- 4) прочность должна выражаться в относительных единицах, что и позволяет не учитывать анизотропию;
- 5) воздействия температуры и влажности при нестационарных условиях эксплуатации учитываются как постоянные;

6) все материалы на основе древесины, применяемые для строительных конструкций, разрушаются вследствие разрыва химических связей полимерных цепей целлюлозы, т. е. долговечность этих материалов характеризуется единой зависимостью (прямая длительной прочности пересекает ось абсцисс в точке $\lg A = 17,1$; ось ординат — в точке $m_{дл} = 1,03$).

Уравнение С. Н. Журкова (1) в модели длительной прочности Ю. М. Иванова принято в форме (полагается $\tau = t_n$)

$$t_n = A e^{-\alpha \sigma}, \quad (2)$$

где A и α — постоянные для данного материала и вида НДС, определяемые из экспериментальных данных по формулам

$$\left. \begin{aligned} A &= \tau_0 \cdot \exp \left[\frac{U_0}{kT} \right], \\ \alpha &= \frac{\gamma}{kT}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Относительные единицы выражения прочности представляют собой ранее упомянутые коэффициенты длительной прочности $m_{дл}$, зависящие от приведенного времени действия нагрузки и вычисляемые по формуле

¹ ГОСТ Р 57790–2017. Конструкции деревянные несущие. Методы испытаний на прочность и деформативность. М.: Стандартинформ, 2019. 18 с.

² ГОСТ Р 70877–2023. Конструкции деревянные. Методы определения длительной прочности древесины и древесных материалов. М.: ФГБУ «РСТ», 2023. 12 с.

$$m_{\text{дл}} = \frac{R_i^{\text{вп}}}{R_{\text{ст}}^{\text{вп}}}, \quad (4)$$

где $R_i^{\text{вп}}$ — прочность материала при рассматриваемом времени нагружения (режиме нагружения), МПа; $R_{\text{ст}}^{\text{вп}}$ — прочность материала при стандартных машинных испытаниях с линейно возрастающей нагрузкой, МПа.

Для древесины и всех материалов на ее основе в нормативно-технической документации^{1,2,3} принята единая система значений коэффициентов длительной прочности, что не может отражать действительного положения дел. Это уточнение особенно важно в случае инженерной древесины и композиционных материалов, содержащих в себе клеевые швы или матрицу. По имеющимся экспериментальным данным разрушение клеевых соединений может иметь не только адгезионный, но и когезионный характер [13]. Коэффициенты длительной прочности различных клеевых соединений различны, их значения могут быть меньше, чем

для древесины. Кроме того, существенное влияние на свойства композиционных материалов оказывает процентное отношение массы клея к массе древесины в материале. На границе раздела сред «древесина–клей» в шве возникает прослойка модифицированной древесины за счет пластификации ее клеем при изготовлении пакета. Например, в LVL при толщине слоев 3,1–3,3 мм толщина клеевой прослойки вместе с модифицированным слоем может достигать на отдельных участках 15–20 % от общей толщины листа. Для материалов, клеенных из шпона, важной особенностью структуры является отсутствие сплошности слоев, вызванное растрескиванием шпона при лущении. В пределах одного слоя микротрещины могут составлять до 5 % толщины. В отличие от древесины для различных материалов на ее основе не во всех случаях может быть принята трансверсально-изотропная схема анизотропии прочности. Например, LVL и ДПК

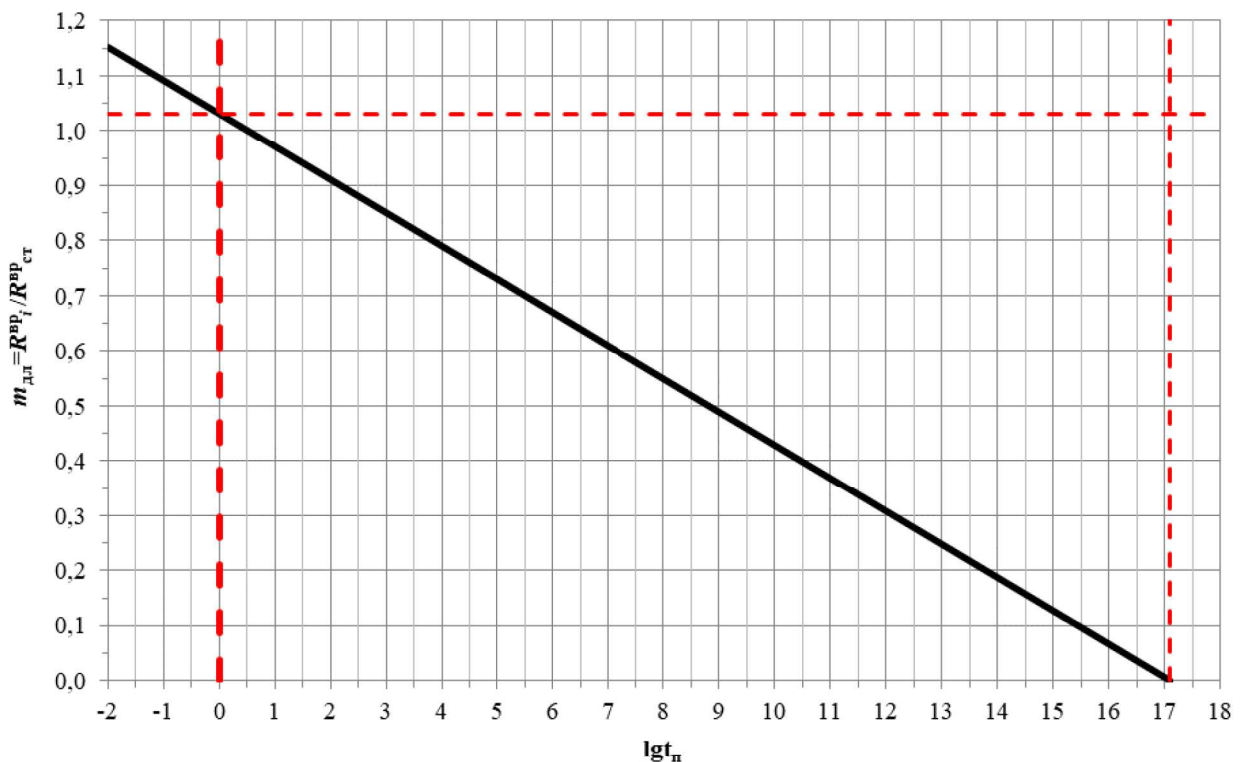


Рис. 1. Прямая длительной прочности древесины по Ю. М. Иванову [4, 9]

имеют выраженные три оси прочностной и упругой симметрии [41], что позволяет говорить о справедливости схемы ортотропии. Это заставляет сомневаться в справедливости допущения об отсутствии влияния ориентации сил относительно направления волокон древесины на длительную прочность материала, т. е. требуется экспериментальная проверка. При определении прочности LVL в ходе машинных испытаний отмечается, что характер разрушения при сжатии поперек волокон в плоскости слоев шпона («по кромке»⁴, фактически — в тангенциальном направлении) и перпендикулярно ей («по пласти»⁴, в радиальном направлении) существенно отличается. При действии нагрузки поперек листа наблюдаются большие пластические деформации, а явное разрушение отсутствует, в связи с чем в этом случае по аналогии с древесиной применимо понятие условной прочности (условного предела прочности). В то же время зависимости «нагрузка–деформация» при сжатии в плоскости листа вдоль и поперек волокон имеют общий вид и отличаются друг от друга только количественно. Вероятно, ориентация сил должна оказывать существенное влияние и на длительную прочность.

Таким образом, модель длительной прочности древесины Ю. М. Иванова не может применяться к материалам на основе древесины без дополнительной проверки и уточнения соответствующих зависимостей экспериментальным путем. Исследование прочности материала при постоянном уровне напряжений требует существенных затрат времени и материальных ресурсов. При этом испытание полномасштабных моделей конструкций ввиду больших требуемых значений нагрузок оказывается осложненным. Полученные результаты характеризуются существенным разбросом времени до разрушения при одинаковых нагрузках,

не позволяя учесть совместное действие переменных температуры-влажности и нагрузки ввиду необходимости поддержания постоянства условий, а также не могут дать полного представления о длительной прочности материала при эксплуатации, так как на практике нагружение конструкций не бывает полностью статическим.

Кроме того, следует отметить, что процесс длительного деформирования, как правило, нелинейный и может сопровождаться явлениями ползучести и релаксации [42–51], которыми зачастую нельзя пренебречь, что существенно осложняет анализ получаемых в результате эксперимента данных. Компенсировать часть указанных недостатков «прямого» метода определения длительной прочности представляется возможным путем проведения кратковременных опытов с растущим во времени уровнем напряжений, т. е. при машинных испытаниях. Этот подход применен в исследованиях Ю. М. Иванова [29–40]. В соответствии с ГОСТ Р 57790 определение несущей способности деревянных конструкций с учетом длительной прочности древесины также рекомендуется выполнять при кратковременных испытаниях с вычислением коэффициента безопасности k_6 .

Теоретической основой указанных работ стал метод анализа долговечности материала при кратковременных испытаниях С. Н. Журкова и Э. Е. Томашевского, представленный в [5, 22]. Авторами приводятся данные, подтверждающие, что «процесс разрушения является в своей основе единым как при статических, так и применяющихся нагрузках» [22]. Приведенное время до разрушения испытываемого образца определяется исходя из времени испытания и полученного временного сопротивления, при этом оно значительно меньше продолжительности опыта. Это позволило определять напряжения разрушения при долговечности (приведенном времени), составляющей 10^{-5} с.

⁴ ГОСТ 33124–2021. Брус многослойный клееный из шпона. Технические условия. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. 20 с.

Несмотря на теоретическое значение для выявления фундаментальных закономерностей разрушения твердых тел, данное обстоятельство представляется недостатком для экспериментальных исследований в области строительных конструкций. Продолжительность воздействий в строительстве относительно велика, что заставляет искать методы исследования длительной прочности для максимально возможного времени. Теми же авторами был поставлен эксперимент и проанализирована долговечность образцов в условиях непрерывного линейного разгружения. Показано, что таким образом возможно определять длительную прочность материала при настолько большой продолжительности действия нагрузки, измерить которую практически не представляется возможным [22]. Выдвинуто предположение об эффективности применения для исследования долговечности нелинейного (замедляющегося) разгружения.

В связи с указанными обстоятельствами целью настоящего исследования является разработка ускоренного метода определения длительной прочности древесины и материалов на ее основе, который позволит провести их всестороннее исследование при различных НДС, температурно-влажностных условиях. Это может повысить безопасность эксплуатации зданий с несущими конструкциями из указанных материалов.

Методы

При так называемом «мягком» режиме испытания, т. е. для случая с линейно возрастающей нагрузкой, напряжения в каждый момент времени определяются выражением

$$\sigma(t) = \nu t, \quad (5)$$

где $\sigma(t)$ — функция зависимости напряжений в образце от времени, МПа; ν — скорость роста напряжений, МПа/с; t — время, с.

Следовательно, скорость роста напряжений равна

$$\nu = \frac{d\sigma}{dt} = \text{const}. \quad (6)$$

Тогда время до разрушения образца (элемента конструкции) может быть вычислено по формуле (2) с соответствующей заменой $\sigma = \text{const}$ на $\sigma(t)$. С учетом (5) получаем

$$t_{\pi} = A \cdot \exp[-\alpha \sigma(t)] = A \cdot \exp[-\alpha \nu t]. \quad (7)$$

При переменных напряжениях повреждаемости в каждый момент времени суммируются между собой до полного разрушения образца, а в случае непрерывно меняющихся напряжений — интегрируются по времени, что выражается формулой (так называемый принцип Бейли [7, 52])

$$\int_0^{t_{\max}} \frac{dt}{t_{\pi}(\sigma[t])} = 1, \quad (8)$$

где $t_{\max}$ — время от начала нагружения до разрушения, с; $t_{\pi}(\sigma[t])$ — функция долговечности, зависящая от функции напряжений во времени, с.

Подставив (7) в выражение (8), можем записать:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{\max}} \frac{dt}{A \cdot \exp[-\alpha \nu t]} &= \frac{1}{A} \int_0^{t_{\max}} e^{\alpha \nu t} dt = \\ &= \frac{\exp[\alpha \nu t_{\max}] - 1}{A \alpha \nu} = \frac{1}{\alpha \nu} \left(\frac{1}{t_{\pi}} - \frac{1}{A} \right) = 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Следовательно,

$$\alpha \nu = \frac{1}{t_{\pi}} - \frac{1}{A}. \quad (10)$$

Тогда с учетом (7) получаем

$$t_{\pi} = \frac{1 - \exp[-\alpha \nu t_{\max}]}{\alpha \nu}. \quad (11)$$

Постоянная α может быть определена из экспериментальных данных по зависимости (2) при постоянных напряжениях и по зависимости (7) — при линейно возрастающих. Для этого необходимо провести испытания по меньшей мере для двух разных уровней нагружения (или скоростей нагружения). Указанный метод приведен в работах [13, 29, 31, 53]. Выражения (2) и (7) для двух разных случаев нагрузки можно совместно записать следующим образом:

$$\begin{cases} t_{\pi i} = A \exp[-\alpha \sigma_i]; \\ t_{\pi k} = A \exp[-\alpha \sigma_k]; \end{cases} \quad (12)$$

где индексы i и k относятся к различным уровням постоянных напряжений либо к различным скоростям их роста.

Прологарифмировав (12), получим

$$\left. \begin{aligned} \ln t_{\pi i} &= \ln A - \alpha \sigma_i; \\ \ln t_{\pi k} &= \ln A - \alpha \sigma_k. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Так как A — постоянная, не зависящая от способа нагружения, следовательно,

$$\ln t_{\pi i} + \alpha \sigma_i = \ln t_{\pi k} + \alpha \sigma_k, \quad (14)$$

откуда при постоянных напряжениях α определяется по формуле

$$\alpha = \frac{2,3 \cdot \lg t_{\pi k} / t_{\pi i}}{\sigma_i - \sigma_k}. \quad (15)$$

В случае с линейно возрастающими напряжениями аналогично (15) с учетом выражений (5) и (11) можно записать

$$\alpha = \frac{2,3}{\sigma_i - \sigma_k} \lg \left(\frac{v_i}{v_k} \frac{1 - \exp[-\alpha \sigma_k]}{1 - \exp[-\alpha \sigma_i]} \right). \quad (16)$$

Решение трансцендентного уравнения (16) для нахождения константы α может быть выполнено различными методами, как правило итерационными. Однако практически величина постоянной A превышает время t_{π} на несколько порядков [22], т. е.

$$t_{\pi} \ll A, \quad (17)$$

следовательно, с достаточной точностью можно записать

$$\frac{1}{t_{\pi}} - \frac{1}{A} \approx \frac{1}{t_{\pi}}. \quad (18)$$

Тогда (10) может быть упрощено:

$$\alpha v = \frac{1}{t_{\pi}}, \quad (19)$$

откуда с учетом (5) [22]

$$t_{\pi} = \frac{1}{\alpha v} = \frac{t_{\max}}{\alpha \sigma_{\max}}, \quad (20)$$

где $\sigma_{\max}$ — прочность образца, МПа.

Как было указано ранее, с точки зрения организации экспериментальных исследований длительной прочности материала (конструкции) для соблюдения постоянства условий испытания, возможности учета вязкоупругого поведения образца, а также для устранения некоторых других сложностей,

возникающих при опытах с постоянными напряжениями, представляется перспективным проведение машинных испытаний с растущей нагрузкой. В случае с линейным ростом напряжений определяемые продолжительности нагружения до разрушения образца достаточно малы при существенном разбросе значений прочности. С другой стороны, при нелинейном росте напряжений (замедляющемся) разрушение образца на финальных стадиях откладывается во времени. Это приводит к увеличению продолжительности эксперимента и существенно повышает значение определяемой долговечности.

Результаты и их обсуждение

Опыт с нелинейно растущими напряжениями (с замедляющимся ростом напряжений) фактически реализуется при так называемом «жестком» режиме испытания, т. е. для случая с линейно возрастающей деформацией, которая в каждый момент времени описывается функцией

$$\varepsilon(t) = wt, \quad (21)$$

где $\varepsilon(t)$ — функция зависимости деформаций образца от времени; w — скорость роста деформаций, с^{-1} .

Скорость роста деформаций равна

$$w = \frac{d\varepsilon}{dt} = \text{const}. \quad (22)$$

Испытания с «жестким» режимом нагружения позволяют показать точный вид кривой $\sigma(\varepsilon)$, включая нисходящую ветвь кривой, что позволяет, во-первых, расширить представления о процессе разрушения, во-вторых, выявить резервы несущей способности для элементов конструкций с повреждениями [54, 55]. Следует отметить, что перемещения, в отличие от напряжений, регистрируются непосредственным измерением. Таким образом, испытания по закону нагружения (21) представляются перспективными для исследования вопросов длительной прочности. Вместе с тем переход от линейной задачи к нелинейной существенно

усложняет математическую составляющую теории.

Диаграмма зависимости « $\sigma - \varepsilon$ » (рис. 2) до точки с максимальными напряжениями может быть аппроксимирована различными функциями. Наибольшее применение для этой цели нашли функции квадратной и кубической парабол. Последняя хорошо аппроксимирует диаграмму только при малых деформациях [50, 56], поэтому для древесины и материалов на ее основе рекомендуется квадратичная зависимость Ф. И. Герстнера

$$\sigma(\varepsilon) = E_0 \varepsilon - \frac{E_0^2 \varepsilon^2}{4\sigma_{\max}}, \quad (23)$$

где E_0 — начальный модуль упругости, МПа.

Выражение (23) с учетом (21) имеет вид [41]

$$\sigma(t) = E_0 \omega t - \frac{E_0^2 \omega^2 t^2}{4\sigma_{\max}}. \quad (24)$$

В исследованиях длительной прочности предпочтительно использовать нелинейную зависимость напряжений от времени $\sigma(t)$, которая также может быть аппроксимирована квадратной параболой без непосредственного учета упругих характеристик материала:

$$\sigma(t) = \frac{2\sigma_{\max} t}{t_{\max}} - \frac{\sigma_{\max} t^2}{t_{\max}^2}. \quad (25)$$

Подставляя (25) в (7), получим

$$t_{\Pi} = A \exp \left[-\alpha \left(\frac{2\sigma_{\max} t}{t_{\max}} - \frac{\sigma_{\max} t^2}{t_{\max}^2} \right) \right], \quad (26)$$

тогда критерий (8) приобретает следующий вид:

$$\frac{1}{A} \cdot \int_0^{t_{\max}} \exp \left[\frac{2\alpha\sigma_{\max} t}{t_{\max}} - \frac{\alpha\sigma_{\max} t^2}{t_{\max}^2} \right] dt = 1. \quad (27)$$

Следовательно,

$$A = \int_0^{t_{\max}} \exp \left[\frac{2\alpha\sigma_{\max} t}{t_{\max}} - \frac{\alpha\sigma_{\max} t^2}{t_{\max}^2} \right] dt. \quad (28)$$

Деформирование образца может происходить с любой сколь угодно малой скоростью, поэтому теоретически время испытания $t_{\max}$ стремится к бесконечности. Полагая,

что подынтегральная функция в выражении (28) относится к классу Хевисайда, т. е. для неположительных значений аргумента она тождественно равна нулю [45], возможно заменить пределы интегрирования:

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[\frac{2\alpha\sigma_{\max} t}{t_{\max}} - \frac{\alpha\sigma_{\max} t^2}{t_{\max}^2} \right] dt. \quad (29)$$

Проинтегрировав (29), получим

$$A = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha\sigma_{\max}}} t_{\max} \cdot \exp[\alpha\sigma_{\max}]. \quad (30)$$

Приведенное время t_{Π} (долговечность) определяется для момента разрушения образца, т. е. когда $t = t_{\max}$. Подставив (30) в (26) и выполнив математические преобразования, получим

$$t_{\Pi} = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha\sigma_{\max}}} t_{\max}. \quad (31)$$

Для поиска константы α подставим (31) в формулу (15):

$$\alpha = \frac{2,3}{\sigma_i - \sigma_k} \lg \left(\sqrt{\frac{\sigma_i}{\sigma_k}} \cdot \frac{t_k}{t_i} \right). \quad (32)$$

В случае определения константы α на основе испытаний, проводимых с большим количеством скоростей перемещения активного захвата машины, возможно получать результаты с высоким уровнем достоверности.

Выводы

1. Таким образом, на основе кинетической концепции разрушения твердых тел разработан ускоренный метод определения длительной прочности древесины и материалов на ее основе, который может быть использован для дальнейших исследований долговечности материалов и конструкций при различных напряженных состояниях и ориентации усилий. Отличительной особенностью разработанного метода является то, что он предусматривает разрушение стандартных образцов в испытательной установке по программе испытаний с линейно возрастающей деформацией, т. е. перемещением активного захвата машины с постоянной скоростью. Возникающие в образце напряжения изменяются во времени нелинейно, с зависимо-

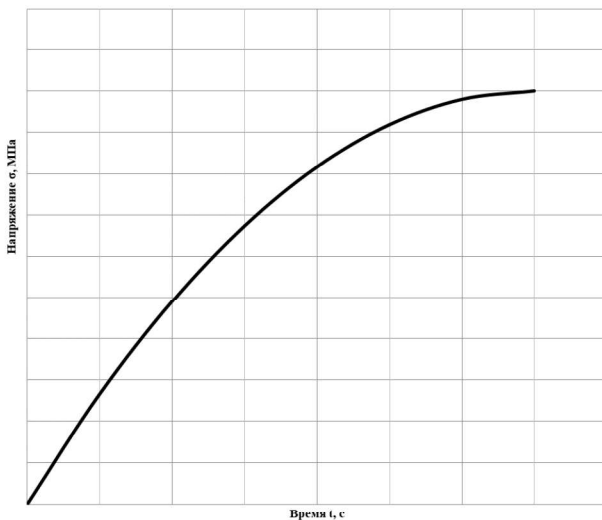


Рис. 2. Общий вид зависимости «напряжение–деформация» в случае линейного роста деформаций ($\epsilon(t) = wt$)

стью, описываемой уравнением квадратичной параболы. Фактически испытание проводится с замедляющейся скоростью роста напряжений, что позволяет существенно отложить момент разрушения, тем самым увеличив экспериментально определяемую долговечность по сравнению с известным методом испытания при линейно возрастающей нагрузке.

2. Преимуществом разработанного метода по сравнению с ускоренными методами исследования длительной прочности материалов в условиях непрерывного линейного разгрузки, а также нелинейного (замедляющегося) разгрузки, которые потенциально могут быть более эффективными, является одностадийность испытания. При испытаниях, включающих в себя стадии нагружения и разгрузки, необходимо учитывать вязкоупругие свойства материалов, что существенно усложняет анализ результатов эксперимента.

3. Основные преимущества разработанного метода исследования длительной прочности материалов на основе древесины в условиях нелинейного (замедляющегося) нагружения по сравнению с испытаниями при постоянном уровне напряжений заключают-

ся в значительном сокращении затрат времени; повышении стабильности условий проведения эксперимента в течение нагружения каждого образца; возможности проведения исследований полномасштабных моделей конструкций, а также возможности за счет указанных факторов существенно повысить количество испытываемых образцов, т. е. увеличить доверительную вероятность полученных результатов.

4. В действующих стандартах на испытания деревянных конструкций (ГОСТ Р 57790), а также на методы определения длительной прочности древесины и древесных материалов (ГОСТ Р 70877) переход от времени испытания с растущими напряжениями к приведенному времени $t_{\text{пр}}$ действия постоянных напряжений обеспечивается делением на 38,2. Указанный способ в действительности применим только для случая испытаний древесины вдоль волокон с линейным ростом нагрузки. Вычисление приведенного времени для материалов на основе древесины возможно выполнять с использованием зависимостей, выведенных в настоящей работе, что позволит более точно определять коэффициент безопасности k_6 в экспериментальных исследованиях деревянных конструкций.

5. Сочетание в исследовании различных ускоренных методов испытания, в частности испытаний в условиях линейного и нелинейного (замедляющегося) нагружения, ввиду их достаточного теоретического обоснования позволяет не только добиться указанных результатов, но и выполнить их верификацию в сокращенные сроки по сравнению с прямыми испытаниями.

Библиографический список

1. Коченов В. М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. М.: Госстройиздат, 1953. 320 с.
2. Коченов В. М. Расчет деревянных конструкций по расчетным предельным состояниям. М.: Госстройиздат, 1955. 48 с.

3. Погорельцев А. А. Порядок назначения расчетных сопротивлений древесины в СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 2 (21). С. 114–126.
4. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / разраб. и сост. Ю. М. Иванов; ЦНИИСК им. В. В. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1976. 28 с.
5. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
6. Кессених Р. М., Петров А. В. К вопросу о температурно-временной зависимости механической прочности полимеров // Известия Томского политех. ин-та. 1975. № 222. С. 30–39.
7. Гольденблат И. И., Бажанов В. Л., Копнов В. А. Длительная прочность в машиностроении. М.: Машиностроение, 1977. 248 с.
8. Бокшицкий М. Н. Длительная прочность полимеров. М.: Химия, 1978. 309 с.
9. Иванов Ю. М. Длительная прочность древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1972. № 4. С. 76–82.
10. Иванов Ю. М. Температурно-временная закономерность прочности древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1982. № 5. С. 73–77.
11. Иванов Ю. М. К анализу усадки древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1992. № 5. С. 69–72.
12. Хрулев В. М., Забурунов В. А., Шутлов Г. М. Испытание на старение клеевых соединений модифицированной древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1975. № 5. С. 77–81.
13. Фрейдин А. С., Вуба К. Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. М.: Лесная промышленность, 1980. 224 с.
14. Карпунин О. Н. Определение срока службы полимерного материала как физико-химическая проблема // Успехи химии. 1980. Т. XLIX, вып. 8. С. 1523–1553.
15. Слуцкер А. И. Атомный уровень флуктуационного механизма разрушения твердых тел (модельно-компьютерные эксперименты) // Физика твердого тела. 2005. Т. 47, вып. 5. С. 777–787.
16. Терехин А. В., Неповинных В. И., Русин М. Ю., Думанский А. М. Исследование долговечности эластомерных клеевых соединений в конструкциях летательных аппаратов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 5. С. 44–48.
17. Блазнов А. Н., Савин В. Ф., Волков Ю. П., Тихонов В. Б. Исследование прочности и устойчивости однонаправленных стеклопластиковых стержней при осевом сжатии // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 13, № 3. С. 426–440.
18. Обливин А. Н., Лопатников М. В. Длительная прочность композиционных материалов // Лесной вестник. 2012. № 7. С. 19–24.
19. Олодо Эссе Э., Аджови Э., Копнов В. А. Длительная прочность плиты из композита полиэстер-дерево // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 2. С. 44–48.
20. Caulfield D. F. A chemical kinetics approach to the duration-of-load problem in wood // Wood and fiber science. 1985. № 17 (4). Pp. 504–521.
21. Takanashi R., Ohashi Y., Ishihara W., Matsumoto K. Long-Term bending properties of cross-laminated timber made from Japanese larch under constant environment // Journal of wood science. 2021. № 67–65. DOI 10.1186/s10086-021-01997-1.
22. Журков С. Н., Томашевский Э. Е. Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения // Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 68–75.
23. Бартеков Г. М., Зуев Ю. С. Прочность и разрушение высокоэластических материалов. М., Л.: Химия, 1964. 388 с.
24. Бартеков Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
25. Ратнер С. Б., Ярцев В. П. Физическая механика пластмасс: Как прогнозируют работоспособность? М.: Химия, 1992. 320 с.
26. Потапова Л. Б., Ярцев В. П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии: как прогнозируют предельные напряжения? М.: Машиностроение-1, 2005. 244 с.
27. Ярцев В. П., Антипов Д. В. Прочность и долговечность клеелесных балок с учетом влажности, температуры и времени эксплуатации // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. 2011. Т. 17, № 3. С. 780–789.
28. Дунаев В. Ф., Мелехов В. И. Закономерность изменения механических свойств древесины во времени при деформировании // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2010. № 3. С. 101–109.
29. Иванов Ю. М. Влияние влажности на длительную прочность древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1975. № 5. С. 90–97.
30. Иванов Ю. М. О длительной прочности древесины по результатам испытаний образцов крупного размера // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1978. № 1. С. 77–83.
31. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю. Оценка длительной прочности древесины при изгибе по результатам кратковременных испытаний // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1981. № 2. С. 66–70.
32. Иванов Ю. М. О длительной прочности древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1981. № 5. С. 71–75.

33. Иванов Ю. М. Стесненное набухание древесины при циклическом изменении влажности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1983. № 5. С. 78–81.

34. Иванов Ю. М. О точности определения параметров длительной прочности древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1984. № 4. С. 62–66.

35. Иванов Ю. М. Парадокс сопротивления древесины изгибу // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1987. № 1. С. 56–60.

36. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю. К методике прогнозирования длительной прочности соединений древесины на фенольных клеях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1987. № 4. С. 66–71.

37. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю. Кратковременная прочность древесины при концентрации напряжений // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1988. № 5. С. 119–121.

38. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю., Цветков А. К. Влияние циклического изменения влажностных деформаций на процесс накопления повреждений в древесине клееных конструкций // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1989. № 1. С. 60–64.

39. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю., Цветков А. К. Снижение прочности древесины при циклическом изменении стесненных влажностных деформаций // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1989. № 5. С. 85–89.

40. Иванов Ю. М. Влияние размеров элементов на прочность конструкции при изгибе // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1994. № 1. С. 62–66.

41. Коваль П. С., Кушнир А. Э. Исследование длительного модуля упругости LVL при кратковременных воздействиях // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № 3. 11 с. URL: <https://esj.today/PDF/90SAVN324.pdf>.

42. Ржаницын А. Р. Теоретические предпосылки к построению методов расчета деревянных конструкций во времени // Исследования прочности и деформативности древесины (под ред. Г. Г. Карлсена). М.: Госстройиздат, 1956. С. 21–31.

43. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат, 1968. 416 с.

44. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.

45. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 383 с.

46. Бондаренко В. М., Римшин В. И., Рощина С. И., Шохин П. Б. Экспериментальное исследование характеристики и меры ползучести древесины // Инновации в отраслях народного хозяйства как фактор решения социально-экономических проблем современности.

Сб. докл. и материалов Междунар. науч.-практ. конф., 5–6 декабря 2011 г. Институт непрерывного образования, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства. М.: АНО ВО «Институт непрерывного образования», 2011. С. 13–16.

47. Рощина С. И., Римшин В. И. Расчет деформаций изгибаемых армированных деревянных элементов с учетом ползучести // Известия Юго-Западного гос. ун-та. 2011. № 1 (34). С. 121–124.

48. Михайлов В. В., Рощина С. И., Шохин П. Б. Экспериментальное определение меры ползучести древесины // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 5. С. 219–221.

49. Бондаренко В. М., Пятикрестовский К. П. Длительное силовое деформирование структурированных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 6. С. 45–48. DOI 10.22363/1815-5235-2017-6-45-48.

50. Пятикрестовский К. П. К вопросу о выборе модулей упругости при расчете деревянных конструкций на прочность, устойчивость и по деформациям // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 6 (245). С. 73–79.

51. Тюленева Е. М. Уточнение реологической модели древесины // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. 25, № 1–2. С. 179–183.

52. Орлович Р. Б., Найчук А. Я. О достоверности критерия Бейли при оценке длительной прочности древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1989. № 2. С. 124–126.

53. Синькевич Н. А. Определение длительной прочности горных пород с помощью кратковременных испытаний // Записки Горного института. 1966. № 1 (51). С. 111–116.

54. Тутурин С. В. Механическая прочность древесины // Физическая мезомеханика. 2004. № 7 (6). С. 85–88.

55. Тутурин С. В. Механическая прочность древесины. М.: Спутник+, 2007. 312 с.

56. Лукаш П. А. Основы нелинейной строительной механики. М.: Стройиздат, 1978. 204 с.

References

1. Kochenov V. M. *Nesushchaya sposobnost' elementov i soedineniy derevyannykh konstruktsiy* [Bearing capacity of elements and joints of wooden structures]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1953, 320 p.
2. Kochenov V. M. *Raschet derevyannykh konstruktsiy po raschetnym predel'nyim sostoyaniyam* [Calculation of wooden structures by design limit states]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1955, 48 p.
3. Pogorel'tsev A. A. *Poryadok naznacheniya raschetnykh soprotivleniy drevesiny v SP 64.13330.2017 «Derevyannye konstruktsii»* [Procedure for assigning design resistance of

wood in SP 64.13330.2017 "Wooden structures"]. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo» – Bulletin of SIC "Construction"*, 2019, no. 2 (21), pp. 114–126.

4. *Rekomendatsii po ispytaniyu derevyannykh konstruktсий* [Recommendations on testing of wooden structures]. Developed and comp. by Ivanov Yu. M.; TsNIISK im. V. V. Kucherenko. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976, 28 p.

5. Regel' V. R., Slutsker A. I., Tomashevskiy E. E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [Kinetic nature of strength of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 560 p.

6. Kessenikh R. M., Petrov A. V. *K voprosu o temperaturno-vremennoy zavisimosti mekhanicheskoy prochnosti polimerov* [Regarding the issue of temperature-time dependence of mechanical strength of polymers]. *Izvestiya Tomskogo politekhn. in-ta – Tomsk Polytechnic Institute Bulletin*, 1975, no. 222, pp. 30–39.

7. Gol'denblat I. I., Bazhanov V. L., Kopnov V. A. *Dlitel'naya prochnost' v mashinostroenii* [Long-term strength in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1977, 248 p.

8. Bokshitskiy M. N. *Dlitel'naya prochnost' polimerov* [Long-term strength of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1978, 309 p.

9. Ivanov Yu. M. *Dlitel'naya prochnost' drevesiny* [Long-term strength of wood]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1972, no. 4, pp. 76–82.

10. Ivanov Yu. M. *Temperaturno-vremennaya zakonomernost' prochnosti drevesiny* [Temperature-temporal regularity of wood strength]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1982, no. 5, pp. 73–77.

11. Ivanov Yu. M. *K analizu usadki drevesiny* [To the analysis of wood shrinkage]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1992, no. 5, pp. 69–72.

12. Khrulev V. M., Zaburunov V. A., Shutov G. M. *Ispytanie na starenie kleevykh soedineniy modifitsirovannoy drevesiny* [Aging test of glue joints of modified wood]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1975, no. 5, pp. 77–81.

13. Freydin A. S., Vuba K. T. *Prognozirovaniye svoystv kleevykh soedineniy drevesiny* [Prediction of properties of wood glue joints]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980, 224 p.

14. Karpukhin O. N. *Opredeleniye sroka sluzhby polimernogo materiala kak fiziko-khimicheskaya problema* [Determination of service life of polymeric material as a physico-chemical problem]. *Uspekhi khimii – Chemistry Achievements*, 1980, vol. XLIX, iss. 8, pp. 1523–1553.

15. Slutsker A. I. *Atomniy uroven' fluktuatsionnogo mekhanizma razrusheniya tverdykh tel (model'no-kompyuternye eksperimenty)* [Atomic level of the fluctuation mechanism of fracture of solids (model-computer experiments)]. *Fizika tverdogo tela – Physics of Solid Body*, 2005, vol. 47, iss. 5, pp. 777–787.

16. Terekhin A. V., Nepovinnikh V. I., Rusin M. Yu., Dumanskiy A. M. *Issledovanie dolgovechnosti elastomernykh kleevykh soedineniy v konstruktсийakh letatel'nykh apparatov* [Investigation of durability of elastomeric adhesive joints in aircraft structures]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Plant Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2015, vol. 81, no. 5, pp. 44–48.

17. Blaznov A. N., Savin V. F., Volkov Yu. P., Tikhonov V. B. *Issledovanie prochnosti i ustoychivosti odnonapravlennykh stekloplastikovyykh sterzhney pri osovom szhatii* [Investigation of strength and stability of unidirectional fiberglass rods under axial compression]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktсий – Mechanics of Composite Materials and Structures*, 2007, vol. 13, no. 3, pp. 426–440.

18. Oblivin A. N., Lopatnikov M. V. *Dlitel'naya prochnost' kompozitsionnykh materialov* [Long-term strength of composite materials]. *Lesnoy vestnik – Forestry Journal*, 2012, no. 7, pp. 19–24.

19. Olodo Esse E., Adzhovi E., Kopnov V. A. *Dlitel'naya prochnost' plity iz kompozita poliester-derevo* [Long-term durability of polyester-wood composite board]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy – Construction Mechanics of Engineering Facilities and Structures*, 2012, no. 2, pp. 44–48.

20. Caulfield D. F. A chemical kinetics approach to the duration-of-load problem in wood. *Wood and Fiber Science*, 1985, no. 17 (4), pp. 504–521.

21. Takanashi R., Ohashi Y., Ishihara W., Matsumoto K. Long-Term bending properties of cross-laminated timber made from Japanese larch under constant environment. *Journal of Wood Science*, 2021, no. 67–65. DOI 10.1186/s10086-021-01997-1.

22. Zhurkov S. N., Tomashevskiy E. E. *Vremennaya zavisimost' prochnosti pri razlichnykh rezhimakh nagruzheniya* [Time dependence of strength under different loading modes]. *Nekotorye problemy prochnosti tverdogo tela* [In: Some Problems of Solid Body Strength]. Moscow, AN SSSR Publ., 1959, pp. 68–75.

23. Bartenev G. M., Zuev Yu. S. *Prochnost' i razrusheniye vysokoelasticheskikh materialov* [Strength and fracture of highly elastic materials]. Moscow, Leningrad, Khimiya Publ., 1964, 388 p.

24. Bartenev G. M. *Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov* [Strength and fracture mechanism of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1984, 280 p.

25. Ratner S. B., Yartsev V. P. *Fizicheskaya mekhanika plastmass: Kak prognoziruyut rabotosposobnost'?* [Physical mechanics of plastics: How to predict the workability?]. Moscow, Khimiya Publ., 1992, 320 p.
26. Potapova L. B., Yartsev V. P. *Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii: kak prognoziruyut predel'nye napryazheniya?* [Mechanics of materials under complex stressed state: how to predict ultimate stresses?]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005, 244 p.
27. Yartsev V. P., Antipov D. V. *Prochnost' i dolgovechnost' kleederevyannykh balok s uchetom vlazhnosti, temperatury i vremeni ekspluatatsii* [Strength and durability of glued-wood beams taking into account humidity, temperature and time of operation]. *Vestnik Tambovskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 780–789.
28. Dunaev V. F., Melekhov V. I. *Zakonomernost' izmeneniya mekhanicheskikh svoystv drevesiny vo vremeni pri deformirovani* [Regularity of change of mechanical properties of wood in time during deformation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 2010, no. 3, pp. 101–109.
29. Ivanov Yu. M. *Vliyanie vlazhnosti na dlitel'nuyu prochnost' drevesiny* [Influence of humidity on long-term strength of wood]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1975, no. 5, pp. 90–97.
30. Ivanov Yu. M. *O dlitel'noy prochnosti drevesiny po rezul'tatam ispytaniy obraztsov krupnogo razmera* [On the long-term strength of wood based on the results of tests of large-size specimens]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1978, no. 1, pp. 77–83.
31. Ivanov Yu. M., Slavik Yu. Yu. *Otsenka dlitel'noy prochnosti drevesiny pri izgibe po rezul'tatam kratkovremennykh ispytaniy* [Estimation of long-term bending strength of wood by results of short-term tests]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1981, no. 2, pp. 66–70.
32. Ivanov Yu. M. *O dlitel'noy prochnosti drevesiny* [About long-term strength of wood]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1981, no. 5, pp. 71–75.
33. Ivanov Yu. M. *Stesnennoe nabukhanie drevesiny pri tsiklicheskom izmenenii vlazhnosti* [Constricted swelling of wood at cyclic change of humidity]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1983, no. 5, pp. 78–81.
34. Ivanov Yu. M. *O tochnosti opredeleniya parametrov dlitel'noy prochnosti drevesiny* [About accuracy of determination of parameters of long-term strength of wood]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1984, no. 4, pp. 62–66.
35. Ivanov Yu. M. *Paradoks soprotivleniya drevesiny izgibu* [Paradox of resistance of wood to bending]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1987, no. 1, pp. 56–60.
36. Ivanov Yu. M., Slavik Yu. Yu. *K metodike prognozirovaniya dlitel'noy prochnosti soedineniy drevesiny na fenol'nykh kleyakh* [Regarding the methodology of predicting the long-term strength of wood joints on phenolic adhesives]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1987, no. 4, pp. 66–71.
37. Ivanov Yu. M., Slavik Yu. Yu. *Kratkovremennaya prochnost' drevesiny pri kontsentratsii napryazheniy* [Short-term strength of wood at stress concentration]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1988, no. 5, pp. 119–121.
38. Ivanov Yu. M., Slavik Yu. Yu., Tsvetkov A. K. *Vliyanie tsiklicheskogo izmeneniya vlazhnostnykh deformatsiy na protsess nakopleniya povrezhdeniy v drevesine kleenykh konstruktsey* [Influence of cyclic change of humidity deformations on the process of damage accumulation in wood of glued structures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1989, no. 1, pp. 60–64.
39. Ivanov Yu. M., Slavik Yu. Yu., Tsvetkov A. K. *Snizhenie prochnosti drevesiny pri tsiklicheskom izmenenii stesnennykh vlazhnostnykh deformatsiy* [Reduction of wood strength at cyclic change of constrained moisture deformations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1989, no. 5, pp. 85–89.
40. Ivanov Yu. M. *Vliyanie razmerov elementov na prochnost' konstruktsey pri izgibe* [Influence of element sizes on strength of a structure at bending]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1994, no. 1, pp. 62–66.
41. Koval' P. S., Kushnir A. E. *Issledovanie dlitel'nogo modulya uprugosti LVL pri kratkovremennykh vozdeystviyakh* [Investigation of the long-term elasticity modulus of LVL under short-term impacts]. *Vestnik evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2024, vol. 16, no. 3, 11 p. Available at: <https://esj.today/PDF/90SAVN324.pdf>.
42. Rzhantsyn A. R. *Teoreticheskie predposylki k postroeniyu metodov rascheta derevyannykh konstruktsey vo vremeni* [Theoretical prerequisites for the construction of methods of calculation of wooden structures in time]. *Issledovaniya prochnosti i deformativnosti drevesiny* [In: Studies

of strength and deformability of wood]. Ed. by Karlsen G. G. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1956, pp. 21–31.

43. Rzhantsyn A. R. *Teoriya polzuchesti* [Theory of creep]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968, 416 p.

44. Rabotnov Yu. N. *Polzuchest' elementov konstruktsiy* [Creep of structural elements]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 752 p.

45. Rabotnov Yu. N. *Elementy nasledstvennoy mekhaniki tverdykh tel* [Elements of hereditary mechanics of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 383 p.

46. Bondarenko V. M., Rimshin V. I., Roshchina S. I., Shokhin P. B. *Eksperimental'noe issledovanie kharakteristiki i mery polzuchesti drevesiny* [Experimental study of the characteristic and extent of creep of wood]. *Innovatsii v otraslyakh narodnogo khozyaystva, kak faktor resheniya sotsial'no-ekonomicheskikh problem sovremennosti. Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 5–6 dekabrya 2011 g. Institut nepreryvnogo obrazovaniya, Moskovskaya gosudarstvennaya akademiya kommunal'nogo khozyaystva i stroitel'stva* [Innovations in the branches of national economy as a factor in solving socio-economic problems of our time. Proceedings of the Int. sci. – pract. conf., December 5–6, 2011. Institute of Continuing Education, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction]. Moscow, ANO VO Institut nepreryvnogo obrazovaniya Publ., 2011, pp. 13–16.

47. Roshchina S. I., Rimshin V. I. *Raschet deformatsiy izгибаемых армированных деревянных элементов с учетом ползучести* [Calculation of deformations of bending reinforced wooden elements with account of creep]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gos. un-ta – Bulletin of South-West State University*, 2011, no. 1 (34), pp. 121–124.

48. Mikhaylov V. V., Roshchina S. I., Shokhin P. B. *Eksperimental'noe opredelenie mery polzuchesti drevesiny* [Experimental determination of the extent of wood creep]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya – Technical Bulletin of the Volga River Region*, 2011, no. 5, pp. 219–221.

49. Bondarenko V. M., Pyatikrestovskiy K. P. *Dlitel'noe silovoe deformirovanie strukturirovannykh materialov*

[Prolonged force deformation of structured materials]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy – Construction mechanics of engineering facilities and structures*, 2017, no. 6, pp. 45–48. DOI 10.22363/1815-5235-2017-6-45-48.

50. Pyatikrestovskiy K. P. *K voprosu o vybore moduley uprugosti pri raschete derevyannykh konstruktsiy na prochnost', ustoychivost' i po deformatsiyam* [To the issue about choosing the elasticity modules in the calculation of wooden structures for strength, stability and deformations]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Construction mechanics and Calculation of Structures*, 2012, no. 6 (245), pp. 73–79.

51. Tyuleneva E. M. *Utochnenie reologicheskoy modeli drevesiny* [Refinement of the rheological model of wood]. *Khvoynye boreal'noy zony – Conifers of the Boreal Zone*, 2008, vol. 25, no. 1–2, pp. 179–183.

52. Orlovich R. B., Naychuk A. Ya. *O dostovernosti kriteriya Beyli pri otsenke dlitel'noy prochnosti drevesiny* [On the reliability of the Bailey criterion in estimating the long-term strength of wood]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – Higher School Proceedings. Russian Forestry Journal*, 1989, no. 2, pp. 124–126.

53. Sin'kevich N. A. *Opredelenie dlitel'noy prochnosti gornykh porod s pomoshch'yu kratkovremennykh ispytaniy* [Determination of long-term strength of rocks by means of short-term tests]. *Zapiski Gornogo instituta – Proceedings of the Mining Institute*, 1966, no. 1 (51), pp. 111–116.

54. Tuturin S. V. *Mekhanicheskaya prochnost' drevesiny* [Mechanical strength of wood]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2004, no. 7 (6), pp. 85–88.

55. Tuturin S. V. *Mekhanicheskaya prochnost' drevesiny* [Mechanical strength of wood]. Moscow, Sputnik Publ., 2007, 312 p.

56. Lukash P. A. *Osnovy nelineynoy stroitel'noy mekhaniki* [Fundamentals of nonlinear structural mechanics]. Moscow, Stroyizdat, 1978, 204 p.