

УДК 624.011.1(075)

**ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КЛЕЕДЕРЕВЯННЫХ
БАЛОК С УЧЕТОМ ВЛАЖНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ
И ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В.П. Ярцев, Д.В. Антипов

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
kzis@nnt.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: долговечность; клееные деревянные балки; напряженно-деформированное состояние; термофлуктуационная теория прочности.

Аннотация: Длительная прочность и долговечность клееных деревянных балок с учетом действия внешних факторов описана с позиций термофлуктуационной концепции. Получены зависимости, описывающие деформирование клеедеревянных элементов в широком интервале температур и напряжений и учитывающие время эксплуатации. Приведены результаты исследований изменения напряженно-деформированного состояния клеедеревянных балок при повышении температуры и изменении времени нагружения.

За последние несколько лет объем вводимых в эксплуатацию зданий и сооружений с применением клееных деревянных конструкций (КДК) увеличился более чем в 10 раз.

Конструкции из клееной древесины в процессе эксплуатации могут подвергаться действию повышенной и пониженной температур, влаги, солнечной радиации, агрессивных сред. Влияние повышенной и пониженной температур, а также влияние неблагоприятных внешних факторов на кратковременную прочность клеедеревянных элементов широко исследовано отечественными и зарубежными учеными. Известно, что эти воздействия изменяют механические и физические свойства древесины [1]. В нормативной литературе [2] воздействие неблагоприятных физических факторов, а также слоистость конструкций учитывается снижающими коэффициентами. Длительные механические характеристики клееной древесины изучены недостаточно.

Из вышесказанного следует, что существует необходимость исследовать изменение длительной прочности, долговечности и деформативности в реальных условиях эксплуатации.

В качестве объекта исследований были приняты клееные балки, так как они являются одним из наиболее освоенных типов КДК. Они применяются в зданиях и сооружениях различного назначения, а также в пешеходных и автодорожных мостах.

Исходя из особенностей работы балок и анализа условий их эксплуатации были выбраны виды исследований (поперечный изгиб, скалывание, деформирование изгибом и сжатием поперек волокон) и неблагоприятные воздействия окружающей среды (повышенная температура и влажность, УФ-облучение, циклические температурно-влажностные воздействия, длительное термостарение, агрессивные жидкие среды).

Для проведения исследований были изготовлены образцы, модели и крупномасштабные конструкции из цельной и клееной древесины. Их изготовили с применением мочевиноформальдегидного клея (ММФ) производства AkzoNobel. Этот клей широко применяется в отечественной промышленности для производства КДК. Клей ММФ и конструкции, изготовленные на его основе, сертифицированы отечественными и зарубежными исследовательскими институтами.

Проведено сравнение кратковременной прочности при поперечном изгибе образцов, изготовленных с применением этого клея, с образцами на основе карбамидоформальдегидного клея марки КФ-Ж, акрилового и казеинового клеев. Испытания проводили на цельных, двух- и четырехслойных образцах с размерами $300 \times 10 \times 20$ (h) мм.

Результаты испытаний показали, что прочность изгибаемых образцов из клееной древесины меняется непрерывно при изменении температуры. Строительные нормы проектирования [2] учитывают падение прочности деревянных конструкций от повышенной температуры при ее значении выше 35°C . Следует заметить, что уже при 30°C падение прочности достигает 25 %.

По прочности и требованию равнопрочности клеевого шва и древесины и разрушающей нагрузке клей ММФ не уступает результатам клея КФ-Ж, рекомендуемого строительными нормами. Дальнейшие исследования проводили на образцах и конструкциях, изготовленных с применением клея ММФ.

По результатам испытаний при поперечном изгибе было подобрано оптимальное давление прессования образцов и толщина клеевого шва.

За основу для описания закономерностей изменения прочности и долговечности нагруженных элементов была принята термофлуктуационная концепция разрушения твердого тела [3].

При длительных механических испытаниях поперечным изгибом получена зависимость долговечности τ образцов из клееной древесины от напряжения σ и температуры T (рис. 1). Она описывается обобщенным уравнением С.Н. Журкова [3]

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (1)$$

где τ_m – период колебаний кинетических единиц, с; T_m – предельная температура существования материала, К; U_0 – максимальная энергия активации разрушения, кДж/моль; γ – структурно-механическая константа, кДж/(моль·МПа); R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К).

Из экспериментальных зависимостей определили термофлуктуационные константы, значения которых приведены в табл. 1.

Соответствие температуры полюса температуре разложения полимерной клеевой прослойки, а также близость значений максимальной энергии активации трехслойных образцов к энергии активации разрушения целлюлозы указывает на влияние клеевой прослойки на прочность и долговечность клеедеревянных образцов.

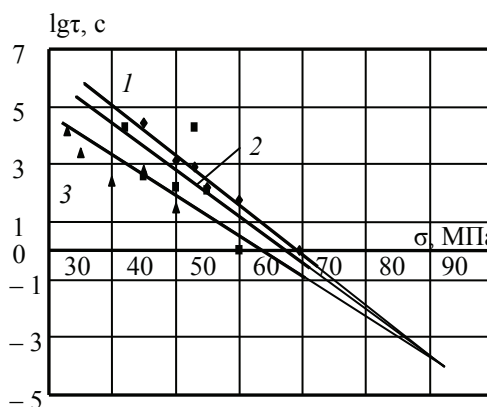


Рис. 1. Зависимости долговечности от напряжения при поперечном изгибе для двухслойных клееных образцов при температуре, °С: 1 – 20; 2 – 50; 3 – 80

Таблица 1

Эмпирические и физические термофлуктуационные константы образцов из древесины при разрушении поперечным изгибом

Вид древесины	Количество слоев	$\tau_m(\tau_m^*)$, с	$T_m(T_m^*)$, К	$U_0(U_0^*)$, кДж/моль	$\gamma(\gamma^*)$, кДж/(МПа·моль)
Цельная	–	10^7	160	–131	–1,7
Клееная	2	$9,46 \cdot 10^{-5}$	–	100,5	1,1
	3	$2,51 \cdot 10^{-3}$	437,6	301,3	4,38

Таблица 2

Коэффициенты линейного термического расширения древесины α , $\times 10^{-6}$ 1/°C

Скорость нагрева, °C/мин(α)	Цельная	Клееная двухслойная	Клееная четырехслойная
1,65	2,83	–	–
1,875	–	1,84	1,78

При исследовании влияния повышенной температуры на термическое расширение клееной древесины были построены дилатометрические кривые. Рассчитанные значения коэффициентов линейного термического расширения представлены в табл. 2.

Коэффициент температурного расширения клееной древесины меньше, чем для цельной. Это вызвано взаимным сдерживанием деформаций различными слоями дерева и клея, что создает дополнительные напряжения в материале (на границе клей–древесина) и должно влиять на несущую способность. Это подтверждают экспериментальные результаты при поперечном изгибе – при температуре 80 °C до 50 % образцов разрушались по клеевому шву.

Зависимость долговечности от напряжения и температуры при скальвании стандартных образцов [4] представлена на рис. 2. Она имеет линейный характер и образует так называемый «обратный пучок», который описывается уравнением [3]

$$\tau = \tau_m^* \exp\left(\frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left(\frac{T_m^*}{T} - 1\right)\right), \quad (2)$$

где τ_m^* , T_m^* , U_0^* , γ^* – эмпирические константы.

Значения полученных констант представлены в табл. 3.

Трансформация экспериментальной зависимости при изменении вида нагрузки, по-видимому, связана с особенностями микро- и макроструктуры древесины. Следует отметить, что при температуре выше 40 °C до 50 % образцов разрушались по клею.

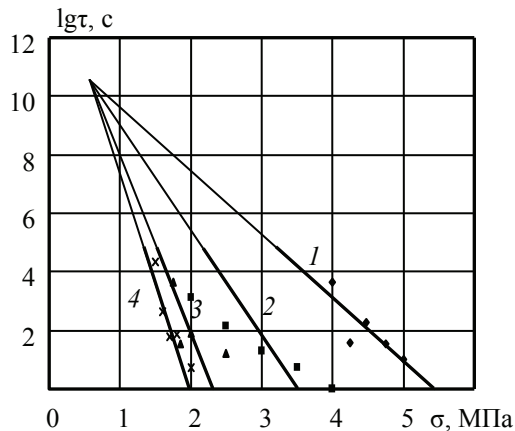


Рис. 2. Зависимость долговечности от напряжения при скальвании двухслойных клееных образцов при температуре, °C:
1 – 18; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 80

Значения эмпирических констант клееных образцов при скалывании

Вид образцов	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8
Прогибы								
Цельные	$-6,39 \cdot 10^{-4}$	$3,59 \cdot 10^{-4}$	$2,95 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	1,88	$3,54 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	-0,08
Клееные	$-1,39 \cdot 10^{-3}$	$4,45 \cdot 10^{-4}$	$5,43 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	-0,98	$8,97 \cdot 10^{-2}$	$4,46 \cdot 10^{-2}$	-0,034
Сжатие								
2-слойные	-7,16	2,14	$9,15 \cdot 10^{-2}$	1,13	-0,14	$-3,93 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$	
4-слойные	-3,26	1,79	$5,48 \cdot 10^{-2}$	2,95	-0,74	$-6,3 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$	

Результаты определения модуля упругости и времени достижения заданного прогиба образцов из цельной и клееной древесины при поперечном изгибе указывают на повышенную деформативность клееных элементов.

Для изучения закономерностей деформирования цельных и клееных образцов были построены кинетические кривые прогибов и деформаций сжатия поперек волокон в координатах – относительная деформация от времени (ε – τ). Функции, описывающие экспериментальные кривые, имеют следующий вид:

– при изгибе

$$\varepsilon = (k_1 + k_2\sigma + k_3T) - k_4(k_5 + k_6\sigma + k_7T)e^{k_8\tau}; \quad (3)$$

– при сжатии

$$\varepsilon = k_1 + k_2\sigma^2 + k_3T + (k_4 + k_5\sigma + k_6T + k_7\sigma T)\ln \tau, \quad (4)$$

где k_1, \dots, k_8 – коэффициенты (табл. 4); T – температура, °С; σ – напряжения, МПа; τ – время, мин.

По уравнениям (3) и (4) можно прогнозировать прогибы и деформации сжатия поперек волокон клееных деревянных элементов.

По результатам определения линейного термического расширения при повышенной влажности и линейного набухания установлено, что взаимодействие влаги с водой приводит к сложным деформационным процессам в клееных образцах, что должно вызывать появление дополнительных напряжений.

В связи с этим, было изучено влияние температурно-влажностных воздействий на прочность образцов при поперечном изгибе: повышенная влажность, длительное воздействие пресной и соленой воды, циклические температурно-влажностные воздействия (замачивание–высушивание и замораживание–оттаивание).

Экспериментальные зависимости для клееной древесины не описываются теоретической формулой. Прямолинейные линии падения расчетных значений кратковременной прочности σ можно задать функциями

$$\sigma_W = \sigma_{12}\alpha_i, \quad (5)$$

Таблица 4

Значения коэффициентов для функций относительных прогибов и деформаций сжатия поперек волокон деревянных элементов

τ_m^* , с	T_m^* , К	U_0^* , кДж/моль	γ^* , кДж/(МПа·моль)
$3,63 \cdot 10^{10}$	274	-100,8	-175

где коэффициент влияния для клееных образцов:

– при повышенной влажности:

$$2\text{-слойные} \quad \alpha_W = -0,011W + 1,134; \quad (6)$$

$$4\text{-слойные} \quad \alpha_W = -0,012W + 1,141; \quad (7)$$

– при циклическом замачивании–высушивании:

$$2\text{-слойные} \quad \alpha_n = -0,021n + 1; \quad (8)$$

$$4\text{-слойные} \quad \alpha_n = -0,038n + 1; \quad (9)$$

– при циклическом замораживании–оттаивании:

$$\alpha_n = -0,014n + 1. \quad (10)$$

Установлено, что кратковременная прочность клееных образцов, подверженных УФ-облучению и термостарению, меняется. Для описания изменения прочности клееных элементов после старения с позиций термофлуктуационной концепции были проведены длительные механические испытания образцов при поперечном изгибе (рис. 3) и получены термофлуктуационные константы, приведенные в табл. 5 [4].

По результатам испытаний поперечным изгибом образцов, подверженных действию агрессивных органических и неорганических растворов, были определены поправки в виде функциональных зависимостей (табл. 6).

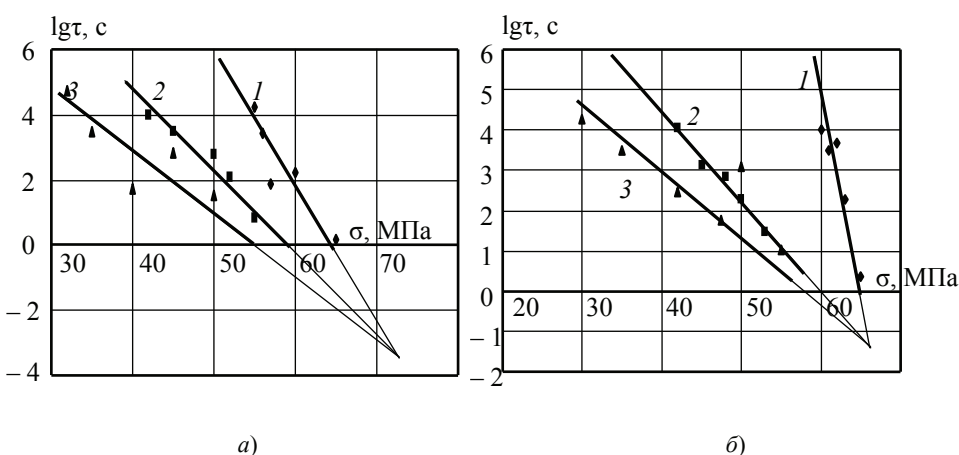


Рис. 3. Зависимости логарифма долговечности от напряжений при длительных испытаниях двухслойных образцов из клееной древесины изгибом при температуре, °С:
a – после УФ-облучения; *б* – после термостарения; 1 – 20; 2 – 50; 3 – 80

Таблица 5

Значения физических термофлуктуационных констант состаренной древесины при поперечном изгибе

Вид воздействия	$T, ^\circ\text{C}$	τ_m, c	T_m, K	$U_0, \text{кДж/моль}$	$\gamma, \text{кДж/(МПа}\cdot\text{моль)}$
УФ-облучение	–	$3,72 \cdot 10^{-4}$	427	533	7,25
Термостарение	20...50	$4,07 \cdot 10^{-2}$	332	3297	50,55
	50...80		480	309	6,49

**Влияние длительного действия агрессивных сред на прочность
двухслойных образцов из клееной древесины**

Жидкая среда	Функциональные зависимости отношения остаточной к первоначальной прочности от длительности действия активных сред, $\alpha_{a,c}$
Каустическая сода (концентрация 10 %)	$1,0276\tau^{-0,319}$
Азотная кислота (концентрация 10 %)	$0,5056\tau^{-0,0241}$
Серная кислота (концентрация 10 %)	$0,6588\tau^{-0,0318}$
Соляная кислота (концентрация 10 %)	$0,4997\tau^{-0,0585}$
Уксусная кислота	$0,5142\tau^{-0,0298}$

Чтобы учитывать воздействие агрессивных сред следует умножать уравнение (1) на поправки, представленные в табл. 6.

Полученные результаты являются основой для прогнозирования длительной прочности, долговечности и деформативности клееных деревянных балок. Применение термофлуктуационного подхода позволяет учитывать значения температуры, напряжений и времени без громоздких вычислений.

Коэффициент γ в уравнении (1) при расчете долговечности и длительной прочности клеедеревянных балок отражает чувствительность материала к нагрузке и, как было показано в [3], для поперечного изгиба определяется зависимостью

$$\gamma = d\gamma_d = \frac{\gamma_d}{2}, \quad (11)$$

где $d = 0,5$ – при изгибе; γ_d – компонента, описывающая изменение формы тела при нагружении.

Коэффициент d был вычислен теоретически [3], исходя из постоянства объема тела при малых нагрузках. Компонента γ_d будет отражать нестабильность линейных перемещений под нагрузкой во времени и при изменении температуры.

Для изучения влияния температуры при воздействии нагрузки на распределение деформаций нормальных поперечному сечению были проведены испытания на моделях клееных восьмислойных деревянных балок пролетом 1000 мм с размерами поперечного сечения $b \times h = 80 \times 40$ мм. Продольные деформации по высоте сечения в середине пролета балки определяли с помощью тензометрии [5–7]. Экспериментальные результаты представлены на рис. 4.

Из рисунка видно, что с повышением температуры и нагрузки значения фактических деформаций не совпадают с расчетными, а эпюры деформаций в крайних зонах меняют наклон.

При повышении температуры нейтральный слой смещается к нижней зоне, а при фиксированной – с увеличением нагрузки меняется незначительно.

Зависимость превышения фактическими деформациями ε_f расчетных ε_p в относительных единицах $\varepsilon_f/\varepsilon_p$ для сжатой части сечения можно описать аналитически функцией

$$\omega_T = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_p} = 0,0014T^2 + 0,0052T + 0,4402, \quad (12)$$

где T – температура, °С.

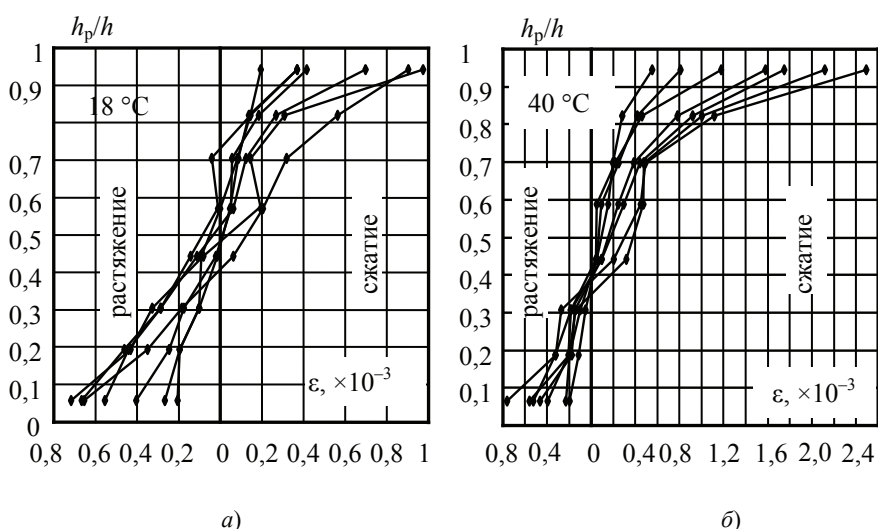


Рис. 4. Эпюры относительных деформаций по высоте моделей клееных деревянных балок в интервале расчетных максимальных напряжений 3...15 МПа:
 h_p – расстояние от наиболее растянутого волокна до тензорезистора; h – высота модели балки

Эти зависимости также были проверены на дощатоклеенной балке пролетом 2,6 м и сечением 135×210 мм (рис. 5) [8].

При длительных интервалах времени действия нагрузки (рис. 6) происходит перераспределение деформаций по сечению клееной балки. Максимальные деформации сжатия уменьшаются, а растягивающие увеличиваются. При этом положение нейтрального слоя перемещается к верхним слоям модели балки.

Осредненную кривую для отношения фактических деформаций ϵ_ϕ к расчетным ϵ_p во времени можно описать функцией

$$\omega_\tau = \frac{\epsilon_\phi}{\epsilon_p} = 0,0003\tau^2 + 0,0089\tau + 0,9798, \quad (13)$$

где τ – время, сутки.

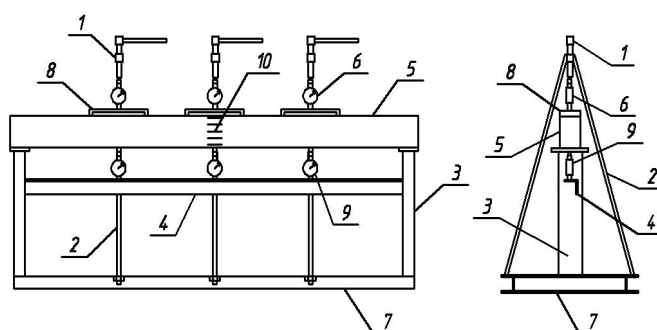


Рис. 5. Стенд для испытания клееной деревянной балки:
 1 – натяжные винты; 2 – тяги; 3 – стойки; 4 – опорный уголок; 5 – испытываемая конструкция; 6 – динамометр; 7 – рама; 8 – двухопорные силовые балки; 9 – индикаторы часового типа; 10 – тензорезисторы

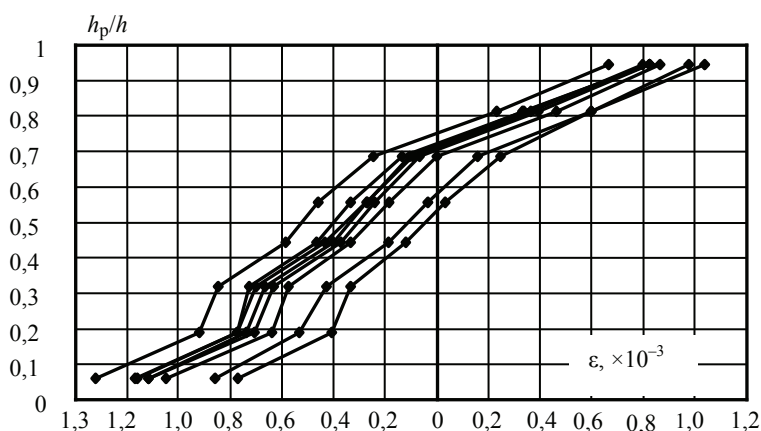


Рис. 6. Эпюра относительного изменения во времени продольных деформаций по высоте сечения модели клееной балки:

h_p – расстояние от наиболее растянутого волокна до тензорезистора;
 h – высота модели балки

Полученные зависимости (12), (13) необходимо использовать для введения поправок к структурно-механическому фактору при вычислении долговечности и длительной прочности клееных деревянных балок.

Для различных изделий и конструкций из органических материалов было установлено [3], что при изменении напряженно-деформированного состояния и габаритов меняется только γ . При этом должны выполняться соотношения:

$$\gamma_M = \frac{\text{tg}\beta_M}{\text{tg}\beta_0} \gamma_0 = k_M \gamma_0; \quad \gamma_b = \frac{\text{tg}\beta_b}{\text{tg}\beta_0} \gamma_0 = k_b \gamma_0, \quad (14)$$

где β_M , β_b – угол наклона прямой долговечности модели или балки; β_0 – угол наклона прямой долговечности образцов из материала исследуемого изделия или конструкции; γ_M , γ_b – структурно-механический фактор для модели или балки; γ_0 – структурно-механический фактор образцов; k_M – коэффициент к структурно-механическому фактору для модели; k_b – коэффициент реальной конструкции клеедеревянной балки.

Для учета влияния масштабного фактора на прогнозируемую долговечность клеедеревянных балок при поперечном изгибе получены экспериментальные зависимости долговечности моделей клееных деревянных балок и образцов от напряжений при температуре 20 °С (рис. 7). На рис. 6 также приведена аналогичная зависимость для клееной балки пролетом 2,6 м и сечением 135×210 мм. Она построена исходя из величины разрушающего напряжения при стандартных испытаниях.

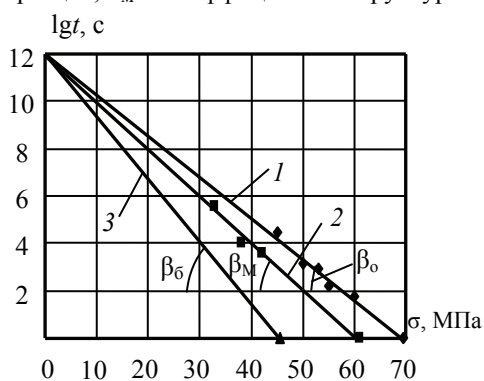


Рис. 7. Зависимость долговечности от действующей нагрузки:

1 – образцов из клееной древесины;
 2 – моделей клееных деревянных балок;
 3 – клееных деревянных балок

Применение этой поправки позволяет использовать полученные ранее термофлуктуационные константы для расчета крупномасштабных балок с различным количеством слоев.

Прогнозирование прочности и долговечности клееных деревянных балок с применением кинетической концепции позволяет использовать постоянные величины, полученные экспериментально, с вариацией переменных эксплуатационных параметров (температура, напряжение, время).

Список литературы

1. Стрельцов, Д.Ю. Исследование несущей способности длительно эксплуатируемых деревянных конструкций : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Стрельцов Денис Юрьевич. – Москва, 2003. – 168 с.
2. Деревянные конструкции : СНиП II-25-80. Утв. Госстроем РФ 18.12.80. – Изд. офиц. – М. : ГУП ЦПП, 2002. – 30 с.
3. Ратнер, С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. – М. : Химия, 1992 – 320 с.
4. ГОСТ 16483.5–73. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон. – Введ. 1974–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 7 с.
5. Глаговский, Б.А. Электротензометры сопротивления / Б.А. Глаговский, И.Д. Пивен. – М.–Л. : Энергия, 1964. – 72 с.
6. Клокова, Н.П. Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки / Н.П. Клокова. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
7. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Разд. II. / под ред. Е.А. Чудакова. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1947. – Т. 3. – 712 с.
8. Антипов, Д.В. Прочность и деформативность клеелесной балки с учетом времени, влажности и температуры эксплуатации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Д.В. Антипов. – Воронеж, 2010. – 18 с.

Strength and Durability of Laminated Glued Timbers with Allowance for Humidity, Temperature and In-Service Time

V.P. Yartsev, D.V. Antipov

*Department "Construction of Buildings and Structures", TSTU;
kzis@nmm.tstu.ru*

Key words and phrases: durability; laminated glued timber; mode of deformation; thermal fluctuation strength theory.

Abstract: The paper describes the long-term strength and durability of laminated glued timber taking into account the influence of external factors from the positions of thermal fluctuation concept. Dependences which describe the deformation of glued wooden elements in a wide interval of temperatures and the pressure, considering the in-service time are received. The results of the research on the change of mode of deformation of laminated timber are resulted under the rise in temperature and changing the loading time.

Festigkeit und Haltbarkeit der Leimholzbalken mit Berücksichtigung der Feuchtigkeit, der Temperatur und der Ausnutzungszeit

Zusammenfassung: Lange Festigkeit und die Haltbarkeit der Leimholzbalken sind mit Berücksichtigung der Außenfaktoren von den Positionen der thermofluktuationalen Konzeption beschrieben. Es sind die Anhängigkeiten, die die Deformierung der Leimholzelementen im breiten Intervall der Temperaturen und der Spannungen beschrieben und die Ausnutzungszeit berücksichtigen, erhalten. Es werden die Resultate der Untersuchungen der Veränderung des gespannt-deformierten Zustandes der Leimholzbalken bei der Erhöhung der Temperatur und bei der Veränderung der Belastungszeit angeführt.

Solidité et durabilité des poutres de colle et de bois compte tenue de l'humidité, de la température et du temps de l'exploitation

Résumé: Une longue solidité et durabilité des poutres de colle et de bois compte tenue de l'action des facteurs extérieures est décrite des positions de la conception thermofluctuationnelle. Sont reçues les dépendences décrivant la déformation des éléments de colle et de bois dans un vaste intervalle des températures et tensions et compte tenue du temps de l'exploitation. Sont cités les résultats des études du changement de l'état de tension et de déformation des poutres de colle et de bois lors de l'augmentation de la température et du changement du temps de la charge.

Авторы: *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструкции зданий и сооружений»; *Антипов Денис Вячеславович* – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Монастырев Павел Владиславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», декан архитектурно-строительного факультета, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
