



УДК 691.112

**Арленинов Д.К.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [dkarleninov@mail.ru](mailto:dkarleninov@mail.ru)

**Линьков Н.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [nicklinkov@gmail.com](mailto:nicklinkov@gmail.com)

**Московский Государственный Строительный Университет**

Адрес организации: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

### **Предложения по методике испытаний для оценки ползучести древесины**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Для учета ползучести возникает необходимость экспериментальных исследований прочности древесины при длительном влиянии нагрузки.

*Результаты.* Получена возможность при испытаниях на поперечный изгиб вычислять полные относительные деформации древесины с учётом ползучести. Предложена методика испытания образцов на поперечный изгиб.

*Выводы.* Значимость предлагаемой методики для строительной отрасли заключается в формировании подхода к определению дифференцированных значений модуля упругости древесины в зависимости от эксплуатационных факторов и длительности действия нагрузки. Полученные результаты позволят объективно учитывать процесс ползучести древесины при расчёте деревянных конструкций.

**Ключевые слова:** ползучесть, относительные деформации, длительные испытания, древесина, прогиб.

Интенсивное развитие вычислительной техники позволяет учитывать процесс ползучести древесины при расчёте деревянных конструкций. Однако, для реализации этих расчётов необходимы экспериментальные данные исследований древесины под длительной нагрузкой при различных уровнях напряжений. Ранее таких исследований было крайне мало, в первую очередь, в связи с отсутствием стандартных методик, а также с большими затратами на установки и стационарные измерительные приборы. Предлагается методика проведения длительных испытаний в режиме «изгиб», отличающаяся от методик проводимых ранее аналогичных испытаний на рычажных или пружинных установках в режиме «сжатие» и «растяжение». Схема приложения нагрузки при изгибе позволяет вычислять полные относительные деформации древесины с учётом ползучести, по всей длине пролёта образца, посредством замера фактического прогиба после затухания деформаций. Предлагается алгоритм вычисления относительных деформаций при испытаниях. Приводятся результаты пробных образцов, относительные деформации которых сравниваются с нормативными данными. Предложенная методика позволяет визуальные замеры относительных деформаций заменить вычислениями, а также позволяет обойтись без значительных материальных затрат на изготовление рычажных и пружинных установок и стационарных измерительных приборов.

Ограниченные объёмы применения деревянных конструкций в прошлом веке, основную номенклатуру которых составляли статически определимые конструкции, сказались и на научно-исследовательских работах по оценке механических свойств древесины. Приоритетным направлением являлась прочность древесины, и в первую очередь длительная прочность, чему были посвящены в основном как теоретические, так и экспериментальные исследования. Вопросы деформационных характеристик отходили на второй план и, по большому счёту, ограничивались стандартными испытаниями для определения модулей упругости, коэффициентов Пуассона вдоль и поперёк волокон, а также построениями диаграммы «напряжения – относительные деформации» при прессовых испытаниях для попыток нелинейных расчётов. Длительных испытаний для оценки ползучести древесины было крайне мало, а построением диаграмм нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями во времени, а также их аппроксимаций с целью практического применения не занимались в силу ограниченности применения численных методов расчётов. В линейных расчётах деревянных элементов на устойчивость и по деформированной схеме ползучесть учитывалась в нормах проектирования

деревянных конструкций СНиП II-25-80 длительным модулем упругости, равным  $300R$ , либо, при расчёте на прогиб понижающим коэффициентом  $0,7$  к жёсткости изгибаемой конструкции. Эти нормативные величины предполагают  $12\%$ -ю стандартную влажность древесины, основной показатель влияющий на ползучесть древесины. В основу этих расчётных предпосылок были положены как теоретические исследования, так и результаты экспериментальных исследований при длительном действии нагрузки, проведённые более полувека тому назад, которые ныне вызывают сомнения у ряда специалистов. В последнее время все чаще встречаются публикации по уточнению и совершенствованию нормативной методики расчета деревянных элементов по деформированной схеме и на устойчивость [1-9]. Основным объектом дискуссии является так называемый длительный модуль упругости, которым учитываются пластические деформации древесины в линейных расчетах. В этих работах, построенных, к сожалению, исключительно на теоретических исследованиях, предлагаются как различные фиксированные значения модуля упругости в  $4000$ ,  $6500$  и  $7500$  МПа, так и переменные значения в зависимости от уровня напряжения. Высказывалось также мнение о дифференциации модуля упругости в зависимости от сорта или класса прочности древесины и условий эксплуатации, породы древесины. Наконец, предлагается полная отмена расчетов сжато-изгибаемых древесных элементов в линейной постановке и замена их точными методами с углом нелинейных зависимостей. В результате всех этих дискуссий в последней редакции норм СП 64.13330.2011, как может показаться совершенно необоснованно, волевым путем, без проведения исследований, было почти в  $2$  раза завышено значение длительного модуля упругости. Чтобы получить научно-обоснованную величину длительного модуля упругости и подтвердить или опровергнуть все сомнения необходимо проведение длительных испытаний большего количества образцов из древесины. Окончательным результатом этих исследований должна быть также диаграмма работы древесины с учётом ползучести для нелинейных расчётов, которые ныне требуются в связи с широким распространением статически неопределимых клеёных деревянных конструкций. В связи с этим была поставлена задача предложить методику проведения длительных испытаний древесины при постоянной влажности, чтобы получить достоверные результаты, необходимые для построения нелинейной зависимости между напряжениями и относительными деформациями при уровне напряжений, не превышающих расчётные сопротивления древесины. В тоже время проводились теоретические исследования [9, 10, 11, 12], в которых оценивалось значительное влияние влажности древесины на снижение модуля упругости во времени при эксплуатации деревянных конструкций в течении  $50$ -ти лет. Но в этих исследованиях не акцентировалось влияние уровня напряжений на снижение модуля упругости. Как считал Ю.М. Иванов в своей работе «К методике определения деформаций деревянных конструкций», опубликованной в «Известиях вузов» раздел «Строительство», а так же рано ушедший из жизни В.А. Цепаев [10], в помещениях с нормальным режимом эксплуатации при относительной влажности воздуха  $60-75\%$  и с обычными сезонными колебаниями температуры и влажности, древесина будет иметь пятнадцатипроцентную влажность. Для оценки влияния влажности при длительной эксплуатации оба автора рекомендуют снижать величину модуля упругости. По мнению Ю.М. Иванова величина модуля упругости должна снизиться с  $10000$  МПа, до  $6900$  МПа. По данным В.А. Цепаева модуль упругости при тех же условиях эксплуатации должен снизиться до  $6400$  МПа.

Поэтому одним из основных факторов при проведении длительных испытаний древесины является выбор помещения с его температурно-влажностным режимом. Наличие постоянного температурно-влажностного режима в помещении, при котором образцы имели бы равновесную влажность не более  $6-7\%$  обязательно, т.к. при большей влажности будет искажаться действительное влияние уровня напряжений на деформативность. В идеале нужно стремиться к более «сухим» помещениям, но практически невозможно найти их для решения данной задачи.

Вторым важным фактором при проведении исследований ползучести древесины является режим нагружения. Обычно, при аналогичных по целям и задачам исследованиях, испытания проводятся на рычажных установках в режимах сжатия или растяжения. На образцах жёстко фиксируется измерительная база, и на этой базе измеряются деформации измерительным прибором с требуемой точностью. Следует отметить, что при испытании в режиме сжатия и растяжения всё сечение образцов находится под одинаковой нагрузкой.

Но с другой стороны, эти режимы испытаний требуют дорогостоящих и громоздких рычажных установок со стационарными, закреплёнными на образцах, несъёмными измерителями деформаций с ценой деления 0,001 см и менее. Сами приборы и крепление их на образцах требует также значительных материальных и трудовых затрат, а незначительная неточность при установке этих приборов даёт большую погрешность при измерении относительных деформаций. Поэтому предлагается альтернатива. Проводить длительные испытания в режиме «изгиб», при котором длительный модуль упругости вычисляется по формулам сопромата, подставляя в них зафиксированную величину прогиба в середине пролёта после затухания его во времени.

Для схемы с одной сосредоточенной силой, приложенной в середине пролёта:

$$E_{\text{дл}} = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot f} \quad (1)$$

Для схемы с двумя сосредоточенными силами, размещёнными на одинаковом расстоянии от опор:

$$E_{\text{дл}} = \frac{P \cdot a \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2)}{24 \cdot J \cdot f} \quad (2)$$

где  $f$  – замеренная величина прогиба в середине пролёта, после затухания процесса приращения прогиба;

$l$  – пролёт образца;

$a$  – расстояние от опор до ближайших сосредоточенных сил;

$E_{\text{дл}}$  – длительный модуль упругости.

Получив фактическое значение длительного модуля упругости образца, относительные деформации можно вычислять, а не измерять. Вычисляются относительные деформации для крайних волокон в растянутой и сжатой зонах. Алгоритм вычисления относительных деформаций в любой момент проведения испытаний заключается в следующем. Независимо от схемы приложения и величины нагрузки одной или двух сосредоточенных сил определялись максимальные нормальные напряжения, которые затем усреднялись по длине пролёта, т.е. за базу для вычислений принимался весь пролёт. Такой подход объясняется предположением, что при изгибе накопление остаточных деформаций происходит линейно в зависимости от величины нормального напряжения на отдельных интервалах по длине пролёта (при этом не исключается, что такое предположение не вполне верное и накопление остаточных деформаций в зависимости от уровня напряжений нелинейно). Например, при схеме нагружения с двумя сосредоточенными силами, остаточные деформации по длине зоны «чистого изгиба» имеют максимум и накапливаются равномерно. Величина их значительно больше, чем деформации на интервалах от опор до точек приложения этих сил, которые накапливаются от нуля до максимума. А поскольку замеренный прогиб является фактическим показателем для единой оси деформирования, то за величину полных относительных деформаций следует принимать их усреднённые значения, которые зависят от усреднённых величин нормальных напряжений по длине пролёта и определяются по формуле основного закона механики:

$$e_{\text{уср}} = \frac{S_{\text{уср}}}{E_{\text{дл}}}, \quad (3)$$

где усреднённые напряжения определяются для схемы испытаний с одной сосредоточенной силой в середине пролёта по формуле:

$$S_{\text{уср}} = \frac{S_{\text{max}}}{2}, \quad (4)$$

а для схемы испытаний с двумя сосредоточенными силами, размещёнными на одинаковом расстоянии от опор:

$$S_{\text{уср}} = \frac{S_{\text{max}} \cdot (l - 2 \cdot a) + 2 \cdot \left(\frac{S_{\text{max}}}{2} \cdot a\right)}{l} \quad (5)$$

Преимущество проведения испытаний в режиме «изгиб» заключается, во-первых, в простоте проведения эксперимента в части приложения нагрузки, закрепления образцов, замера прогиба. При этом, правда, не всё сечение работает под расчётной нагрузкой, а только крайние волокна. Но, с другой стороны, и 90 % деревянных конструкций

работают в режиме «изгиб» и «сжатие с изгибом», когда лишь волокна в крайних зонах работают под расчётной нагрузкой. Во-вторых, вычисления всегда дают более точные результаты, чем измерения, тем более, учитывая при этом наличие лишь устаревших измерительных приборов на кафедрах вузов. Образцы при испытаниях «на изгиб» предлагается устанавливать в положение, где «пласть» является шириной сечения, а «кромка» высотой сечения. Таким образом, большее количество волокон древесины максимально включается в работу, чем при традиционных балочных испытаниях.

Проведение испытания в режиме «изгиб» по двум схемам нагружения сосредоточенными силами, позволяет также регулировать уровень напряжений от минимального до расчётного сопротивления древесины, что необходимо для построения диаграммы. Испытания в режиме «изгиб» с одной сосредоточенной силой предпочтительнее производить для определения относительных деформаций при малых уровнях напряжений, а испытания с двумя сосредоточенными силами предпочтительнее проводить для определения относительных деформаций при больших уровнях напряжений, близких к расчётному сопротивлению древесины.

Для апробации этой методики в МГСУ проведены в рамках обучения магистрантов длительные испытания деревянных образцов с целью учёта ползучести при расчёте деревянных конструкций, как в линейной, так и в нелинейной постановке.

Исходя из принципа приспособляемости к существующим возможностям для проведения длительных испытаний было выбрано помещение с постоянным температурно-влажностным режимом в подвальном этаже УЛК МГСУ, где в течение года температура и влажность практически не меняется. Образцы древесины, хранящиеся в отсеке кафедры МДК, имели стабильную влажность 6 %.

Выбор сечения образцов  $10 \times 2,0$  (h), см объяснялся геометрическим подобием с размером доски, которая принимается для подавляющего количества клеёных деревянных конструкций. Точный размер поперечного сечения определялся штангенциркулем по среднему значению замеров в трёх местах – в третях и в середине пролёта. Пролёт был принят длиной 1,5 м, исходя из необходимости получения максимальных нормальных напряжений, близких по величине к расчётному сопротивлению древесины, используя при этом стандартные грузы весом 10 и 20 кг. Древесина образцов – подмосковная ель с малым отношением «поздней» древесины к «ранней», что характерно для древесины, произрастающей в Московской области в течение последних десятилетий с короткими зимами. По местоположению и размерам сучков образцы можно отнести к 1-му сорту древесины.

Замер прогибов в середине пролёта осуществлялся прогибомерами Максимова с ценой деления 0,1 мм. Замеры прогибов осуществлялись до полного затухания приращения деформаций, т.е. в течение 8-ми месяцев. Один образец был испытан с приложением нагрузки сосредоточенной силой 20 кг в середине пролёта. Два образца испытывались с приложением 2-х сосредоточенных сил по 20 и 30 кг на расстоянии 37,5 и 25 см от опор. Таким образом, максимальные напряжения были близки к расчётному сопротивлению древесины. Результаты испытаний приведены в табл.

Таблица

1	№ образцов	Ц-1	Ц-2	Ц-3	
2	Сечение образцов, см	9,4×1,91 (h)	9,3×1,87 (h)	9,2×1,92 (h)	
3	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{ср}}$ МПа	13,2/6,6	13,9/10,4	13,3/16,1	
4	Фактический прогиб, см	$F_{\text{нпр}}$	2,61	4,01	4,48
		$F_{\text{дл}}$	2,34	5,47	6,15
5	Фактический модуль упругости, МПа	E	9868	9610	83500
		$E_{\text{дл}}$	7711	6972	6082
6	Полные относительные деформации во времени $\epsilon_{\text{дл}}$	0,00085	0,00149	0,00182	
7	Приведение результатов испытаний к древесине стандартной влажности	$E_{\text{дл}} 12$ МПа	6218	5622	4905
		$\epsilon_{\text{дл}} 12$	0,00106	0,00185	0,00226
8	Нормативные полные относительные деформации для древесины 1-го сорта	$\sigma=6,6$ МПа	0,00157		
		$\sigma=10,42$ МПа		0,00247	
		$\sigma=11,121$ МПа			0,00264

При этом, значения длительного модуля упругости образцов в табл. приведены к 12 %-й влажности по формуле:

$$E_{12} = \frac{E_w}{1 - k \cdot (w - 12)}, \quad (6)$$

где  $k = 0,04$  (при изгибе);  $w$  – влажность образцов в процессе испытаний.

Для оценки достоверности результатов проведённых испытаний сравним значения величин полных относительных деформаций образцов, приведённых к 12 %-й влажности, с нормативными значениями полных относительных деформаций, вычисленных для тех же уровней напряжений. В образце при уровне усреднённых напряжений, равных 11,1 МПа, фактические полные относительные деформации составили 0,00226. Нормативное значение этих деформаций при данном уровне напряжений равно 0,00264. Эта величина вычислялась по формуле (3), где за длительный модуль упругости принималось нормативное значение 300R для 1-го сорта древесины, которое учитывает ползучесть древесины во времени. Расхождение величин составило 15 %, что говорит о корректности предлагаемой методики испытаний для оценки ползучести древесины под нагрузкой. В образцах с меньшим уровнем напряжений расхождение фактических результатов с нормативными значениями увеличивается. Этот факт требует дополнительных испытаний образцов и дальнейшего осмысления.

Используя данную методику длительных испытаний можно в самых скромных условиях проводить исследования и накапливать результаты для создания базы данных, использование которой в дальнейшем позволит более достоверно учитывать процесс ползучести древесины в линейных и нелинейных расчётах.

### Список библиографических ссылок

1. Линьков В. И. Моделирование работы деревянных балок составного сечения на податливых связях с применением теории составных стержней А.Р. Ржаницына // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 5. С. 30–35.
2. Линьков Н. В. Напряженно-деформированное состояние деревянных балок составного сечения на КМ-соединениях при длительном действии нагрузки // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 44–48.
3. Погорельцев А. А., Пятикрестовский К. П. Обоснование нормируемых значений модулей упругости при расчетах деревянных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 33–35.
4. 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. С. 7.
5. Крылов С. К., Арленинов П. Д. Особенности моделирования составной конструкции из металла и железобетона на примере электрических порталов Зейской ГЭС, крановой эстакады Саяно-Шушенской ГЭС, короны винтовой высотной башни «Эволюция» // Науч. тр. II Междунар. Конф. По бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.). М. : МГСУ. 2014. Т. 4. С. 121–128.
6. Арленинов Д. К. О новом нормативном значении модуля упругости древесины // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 3. С. 19–20.
7. Цапаев В. А. Оценка модуля упругости древесины конструкций // Жилищное строительство. № 2. 2003. С. 11–13.
8. Клименко В. З. Расчет деревянных конструкций по деформациям и на прочность по деформируемой схеме // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 6. С. 67–73.
9. Клименко В. З., Михайловский Д. В., Коваленко М. С. Поиск истины в модулях упругости древесины при расчете сжато-изгибаемых элементов : сб. науч. тр. / ОГАСА. Одесса, 2012. С. 115–123.
10. Клименко В. З. Феноменологический подход расчету сжато-изгибаемых деревянных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 1. С. 7–11.
11. Михайловский Д. В., Коваленко М. С., Клименко В. З. Расчет верхних поясов ферм из клееной древесины : сб. научных трудов / ОГАСА. Одесса, 2010. С. 157–162.
12. Стоянов В. В., Острый Р. А., Масляненко Е. В., Богаченко А. В., Топалов П. П. Экспериментальные исследования деревянной балки с глубокой подрезкой на опоре : сб. научных трудов / ОГАСА. Одесса, 2006. С. 209–214.

**Arleninov D.K.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [dkarleninov@mail.ru](mailto:dkarleninov@mail.ru)

**Linkov N.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [nicklinkov@gmail.com](mailto:nicklinkov@gmail.com)

**Moscow State University of Civil Engineering**

The organization address: 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26

### Methods of experimental research to value for the creep of the wood

#### Abstract

*Problem statement.* In order to take creep into account, there is a need for experimental studies of the strength of the wood with a prolonged effect of the load.

*Results.* It is possible to calculate the total relative deformations of wood in the tests for transverse bending taking creep into account. A technique for testing specimens for transverse bending is proposed.

*Conclusions.* The importance of the proposed methodology for the construction industry is to form an approach to the definition of differentiated values of the modulus of elasticity of wood, depending on operational factors and the duration of the load. The obtained results will allow to take into account objectively the creep process of wood when calculating wooden structures.

**Keywords:** creep of wood, relative deformations, durable loading, wood, flexure.

#### References

1. Linkov V. I. Simulation of wooden beams on the composite section of compliant connections with the theory of composite bars // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2011. № 5. P. 30–35.
2. Linkov N. V. Intense-deformed condition of the wooden beams of the composite section by KM-connection with long-term loading // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. № 7. P. 44–48.
3. Pogorelcev A. A. Justification of standardized values in the calculation of the elastic moduli of wooden structures // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2013. №10. P. 33–35.
4. Pyatikrestovsky K. P. On the choice of elastic moduli in the calculation of wooden structures for strength, stability and deformation // *Stroitel'naya mekhanika I raschet sooruzhenii*. 2012. № 6. P. 7.
5. Krylov S. B., Arleninov P. D. The engineering approach to solving the problem of bending elastically creeping rod // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2013. № 2. P. 9–11.
6. Arleninov D. K. Calculation of wooden structures on the deformed scheme // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. № 1. P. 43–46.
7. Cepaev V. A. Modulus of elasticity evaluating for wood structures // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2003. № 2. P. 11–13.
8. Klimenko V. Z. Calculation of timber structures on the deformation and strength on the deformable circuit // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2012. P. 69–73.
9. Klimenko V. Z., Mikhailovsky D. V., Kovalenko M. S. The search for truth in the modules of the elasticity of wood in the calculation of compressed-bent elements : Coll. of sci. papers / OGASA. Odessa, 2012. P. 115–123.
10. Klimenko V. Z. Phenomenological approach to the calculation of squeezed-bent wooden elements // *Stroitel'naya mekhanika I raschet sooruzhenii*. 2011. № 1. P. 7–11.
11. Mikhaylovskiy D. V., Kovalenko M. S., Klimenko V. Z. Calculation of the upper belts of glued timber : Coll. of sci. papers / OGASA. Odessa, 2010. P. 157–162.
12. Stoyanov V. V., Ostryy R. A., Maslyanenko E. V., Bogachenko A. V., Topalov P. P. Experimental studies of a wooden beam with deep trimming on the support: Coll. of sci. papers / OGASA. Odessa, 2006. P. 209–214.