

УДК 691.11

**ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ИЗГИБЕ**

© Д.К. Арленинов, д-р техн. наук, проф.

Д.А. Беккер, зав. лаб.

Московский государственный строительный университет, Ярославское ш., 26,
Москва, Россия, 129337; e-mail: dkarleninov@mail.ru; vonbeck@mail.ru

На ползучесть древесины под действием длительной нагрузки в значительной степени влияет уровень напряжения в конструкции. Ранее деформационные свойства исследовались в меньшей степени, и в стадии нелинейной ползучести. Поэтому отсутствуют экспериментальные данные длительных испытаний при небольших уровнях напряжений, позволяющих получить зависимость «напряжение–относительные деформации». Цель проводимых исследований – получение количественных оценок ползучести древесины, выраженных в полных (упругих и остаточных) относительных деформациях при проектных уровнях напряжений. Длительные испытания четырех деревянных образцов ели, выпиленных из одной доски, проводили в режиме «изгиб» при разных уровнях напряжений (от 2 до 13 МПа) в сухом теплом помещении при стабильном температурно-влажностном режиме. Влажность образцов при испытаниях составляла 6 %. Достоверность результатов испытаний, приведенных к 12 % влажности по известным формулам, оценивали сравнением вычисленных значений кратковременного и длительного модулей упругости с нормативными значениями. Полученные результаты подтвердили предпосылку о влиянии уровня напряжений на ползучесть и продолжительность процесса. При малых уровнях нормальных напряжений в середине пролета затухание ползучести произошло в течение первого месяца, при напряжениях, близких к расчетному сопротивлению, – по истечении шести месяцев. В течение седьмого месяца нарастание прогиба не наблюдалось. По замерам прогибов в течение всего времени испытаний вычисляли фактические значения полных относительных деформаций. Полученные данные были использованы для построения графиков «полные относительные деформации–продолжительность выдержки» для каждого образца. Эти графики легли в основу представленной в статье зависимости «напряжение–полные относительные деформации», которую можно применить для определения модуля деформаций. В заключении сделан вывод, что для построения достоверной эмпирической зависимости и дальнейшей аппроксимации исследования надо продолжить, увеличив количество образцов и расширив диапазон напряжений.

Ключевые слова: ползучесть древесины, длительная нагрузка, модуль упругости, относительные деформации.

В настоящее время при нелинейных расчетах деревянных конструкций используется аппроксимирующая зависимость диаграммы сжатия древесины, полученная при стандартных прессовых испытаниях. Таким образом, влияние ползучести древесины при этом не учитывается. Цель данной работы – предложить алгоритм построения экспериментальных диаграмм, учитывающих влияние ползучести.

Известно, что на ползучесть древесины под действием длительной нагрузки наиболее значительно влияют два фактора: напряжение, которое перемененно по длине изгибаемого и сжато-изгибаемого элемента, и влажность древесины, которая практически равномерна по длине.

Анализ российских публикаций показывает, что в проводимых ранее экспериментальных исследованиях длительной нагрузкой изгибаемых деревянных элементов изучались, в основном, либо вопросы длительной прочности древесины [2, 5] в том числе клееной [3, 8, 10], либо вопросы длительной прочности клеевых соединений [1]. Однако по ряду причин результаты этих исследований не могут использоваться при практическом изучении деревянных конструкций в процессе эксплуатации зданий и сооружений. В частности, в исследованиях [1] величина приложенной нагрузки была значительно больше расчетной, вследствие чего нормальные напряжения в расчетных сечениях были выше расчетных сопротивлений древесины при изгибе и сдвиге в 1,5–1,6 раза. В других исследованиях либо нагрузки выдерживали неподолжительное время [3], либо клееные деревянные балки использовали как контрольные образцы для сравнительных анализов. Например, в [8] основной целью являлась работа составных балок по высоте, в [10] исследовалось напряженно-деформированное состояние балок, армированных стальной арматурой, которая клеивалась на эпоксидно-цементном клее. С точки зрения оценки ползучести клееной древесины эти результаты были интересны, так как испытания проводили длительное время, вплоть до затухания деформаций нагрузками, близкими к расчетным, при постоянном температурно-влажностном режиме в лабораторных условиях. Результаты этих испытаний при стабильной влажности древесины показали приращение прогибов во времени, величина которых зависит от уровня напряжений. Наиболее интересные экспериментальные исследования по оценке ползучести древесины хвойных пород были опубликованы в работе [6]. Исследования были проведены в режиме сжатия, причем напряжение в образцах составляло 100, 125 и 150 кг/см² при влажности образцов 9 %. Результаты этих испытаний показали, что развитие пластических деформаций довольно достоверно описывается линейно-степенной зависимостью Ф.И. Герстнера. Проведение соответствующих исследований в режиме изгиба не обнаружено. На отсутствие экспериментальных данных по оценке ползучести древесины ссылаются и другие авторы как прямо [9], так и косвенно [7], объясняя это большим разбросом величин полученных при испытании образцов древесины. С этим сложно согласиться, так как стандартные прессовые испытания на прочность также имеют большой разброс в показателях.

Что касается экспериментальных исследований по влиянию влажности на ползучесть древесины при различных уровнях напряжений, то они в России целенаправленно не проводились. Необходимо лишь отметить исследование И.М. Линькова в 70-х гг. XX в. по деформативности клефанерных плит с деревянными ребрами, нагруженными равномерно-распределенной нагрузкой

100 кг/м², что соответствовало, по нормам тех лет, нормативной снеговой нагрузке для 3-го снегового района СССР. Испытания проходили на открытом воздухе в течении 3 лет. К сожалению, результаты замеров деформаций были утеряны. Автор был техническим участником тех испытаний и в его памяти осталось, что после разгрузки и «отдыха» полные прогибы значительно превышали упругие. Кроме того, в эксперименте получен следующий интересный результат. После разгрузки и «отдыха» панелей из деревянных ребер были вырезаны образцы, которые испытывали по стандартной методике на прочность и для определения кратковременного модуля упругости. Результаты прессовых испытаний соответствовали результатам таких же испытаний образцов, вырезанных из исходного пиломатериала, который использовали для изготовления плит, т. е. ползучесть древесины не сказывалась на кратковременной прочности образцов

Известны теоретические исследования [4, 11], в которых использованы эмпирические зависимости, показывающие влияние влажности на ползучесть деревянных элементов в эксплуатируемых конструкциях при напряжениях в них, близких к расчетному сопротивлению древесины. Для оценки этого явления оба автора рекомендуют вводить так называемый длительный модуль упругости, который у обоих авторов отличается по величине незначительно. По данным Ю.М. Иванова длительный модуль упругости за период эксплуатации под нагрузкой в течение 50 лет должен снизиться от 10 000 до 6 920 МПа при влажности древесины 15 %, которая, как считает автор, имеет место в помещениях с нормальным режимом эксплуатации при относительной влажности воздуха 60... 75 % и обычных сезонных колебаниях температуры и влажности. По данным В.А. Цапаева при влажности древесины 15 % длительный модуль упругости следует назначать 6 400 МПа, при влажности 9...12 % – 6 900 МПа. Таким образом, суммируя влияние ползучести древесины от увлажнения и уровня напряжений, можно утверждать, что введенная в СНиП 11-25–80 нормативная величина длительного модуля упругости для расчета деревянных конструкций по деформированной схеме и для расчета на устойчивость, равная 4000 МПа, справедлива, несмотря на критику многих специалистов.

Учитывая отсутствие экспериментальных данных по влиянию уровня напряжений на ползучесть древесины при напряжениях, не превышающих расчетного сопротивления в зоне максимальных изгибающих моментов, в которой бы определялись остаточные деформации, были проведены длительные испытания на изгиб четыре образцов длиной 146 см, вырезанных из одной еловой доски, чтобы избежать фактора неоднородности древесины. Испытания проводились в подвальном помещении учебно-лабораторного корпуса МГСУ. Образцы выдерживали в помещении до равновесной влажности, которая составляла 6 %. Сечение образцов составляло 10,0×2,7 см. Образцы испытывали в положении, при котором кромка была высотой сечения, пласть –

его шириной. Такое нестандартное положение балочных образцов объяснялось тремя факторами:

минимизацией влияния сдвига на прогибы образцов;

наличием в наиболее напряженных зонах сечения максимального количества волокон;

исключением фактора плоской формы деформирования при изгибе.

Нагружение осуществляли по стандартной методике двумя сосредоточенными силами, расположенными в третях пролета. В первом образце две силы по 32,28 кг вызывали напряжение в расчетном сечении 13 МПа. Во втором, третьем и четвертом образцах силы составляли 27,28; 7,98; 5,98 кг, напряжения – соответственно 12,0; 3,4; 2,4 МПа соответственно. Замеры абсолютных деформаций осуществляли прогибомерами Максимова (цена деления шкалы 0,1 мм), закрепленными в середине пролета. На первом и втором образцах относительные деформации измеряли пятью тензодатчиками сопротивления с базой 20 мм, наклеенными на каждый образец: четыре датчика наклеивали по длине пролета в зоне от опоры до сосредоточенной силы с одинаковым интервалом 9,6 см, пятый – в зоне постоянного изгибающего момента.

Полученные результаты испытаний и вычисленные относительные деформации приведены в табл. 1, 2. Упругие относительные деформации вычисляли по значению прогиба в момент нагружения, длительные относительные деформации – ежемесячно по результатам замеров при выдерживании нагрузки:

$$\varepsilon = 28,17 \frac{\sigma f}{Pl^3},$$

где σ , P – напряжение и нагрузка в зоне чистого изгиба каждого образца;

f – соответствующие прогибы в процессе испытаний.

Таблица 1

Прогибы испытываемых образцов в течение первого месяца эксперимента

№ образца	Напряжение, МПа	Упругий прогиб, см	Продолжительность испытаний, нед.	Полный прогиб, см
1	13,0	1,56	1	1,68
			2	1,96
			3	2,79
			4	2,82
2	12,0	1,40	1	1,60
			2	1,68
			3	1,72
			4	1,79
3	3,4	0,33	1	0,37
			2	0,39
			3	0,40
			4	0,40
4	2,4	0,31	1	0,32
			2	0,32
			3	0,33
			4	0,33

Таблица 2

**Прогибы и относительные деформации испытываемых образцов
в течение всего срока эксперимента**

№ образца	Напряжение, МПа	Упругая стадия		Полная стадия		Продолжительность испытаний, мес.
		Прогиб, см	Относительная деформация	Полный прогиб, см	Полная относительная деформация	
1	13,0	1,56	0,00093	2,82	0,00168	1
				3,04	0,00182	2
				–	–	3
				3,17	0,00189	4
				3,19	0,00191	5
				3,20	0,00192	6
2	12,0	1,4	0,00089	1,79	0,00117	1
				2,05	0,00134	2
				–	–	3
				2,24	0,00146	4
				2,25	0,00148	5
				–	–	6
3	3,4	0,33	0,00021	0,40	0,00026	1
				0,40	0,00026	2
				–	–	3
				0,40	0,00026	4
				–	–	5
				–	–	6
4	2,4	0,31	0,00018	0,33	0,00019	1
				0,33	0,00019	2
				–	–	3
				0,33	0,00019	4
				–	–	5
				–	–	6

По данным испытаний построены графики для каждого образца в координатах «длительные относительные деформации–продолжительность действия нагрузки» (рис. 1).

На основании результатов экспериментов, проведенных в течение шести месяцев, можно сделать первые выводы.

При малых уровнях напряжений (2,4 и 3,4 МПа) деформации ползучести увеличиваются незначительно, причем максимальный рост отмечен на первой неделе наблюдений (см. табл. 1). Далее (в течение пяти месяцев) прироста прогибов не было. На основании этого можно предположить, что при малых уровнях напряжений влияние фактора ползучести для расчета пренебрежимо мало, и его можно не учитывать. При напряжениях 12,0 и 13,0 МПа,

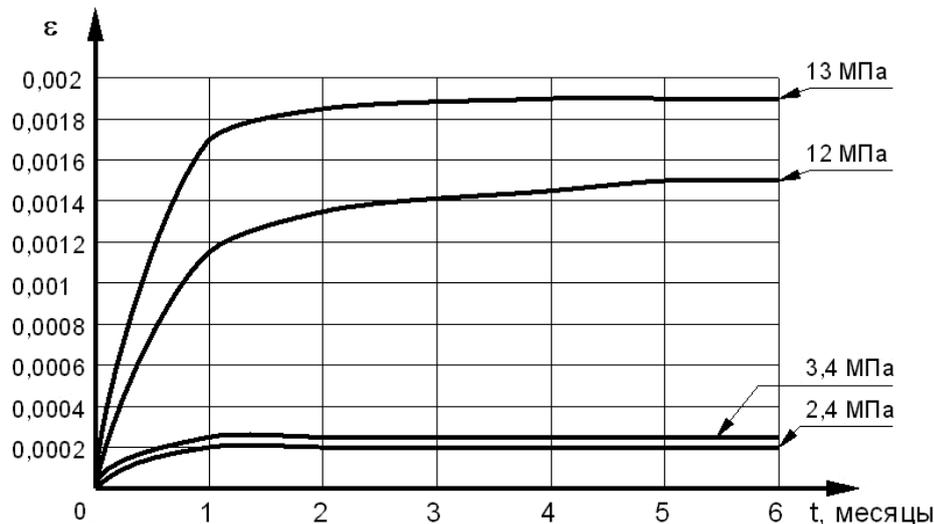


Рис. 1. Зависимость полных относительных деформаций (ε) образцов от времени (t) действия нагрузки

близких к расчетному сопротивлению, деформации начинают затухать к шестому месяцу. При этом их интенсивный рост проявляется в первый месяц, еще до конца третьей недели испытаний. По истечении шести месяцев видно, что значения прогибов близки к стабилизации.

Итоговым результатом экспериментальных исследований является зависимость «напряжения – длительные относительные деформации», которая используется для нелинейных расчетов. Эту зависимость получим, используя диаграммы, представленные на рис. 1 для одного и того же срока. Построим данную диаграмму (рис. 2) для заданной длительности действия нагрузки, при которой ползучесть древесины в изгибающем элементе стабилизируется, т. е. для шести месяцев.

Поскольку точность данной диаграммы зависит от количества испытуемых образцов, эксперимент следует продолжить с увеличением количества образцов и поставить образцы при других уровнях напряжений.

Оценим корректность полученных результатов испытаний путем сравнения с нормативными значениями модуля упругости древесины хвойных пород. Для нормирования прочностных и деформационных характеристик древесины результаты испытаний образцов разной влажности приводят к стандартной влажности 12 % по следующей формуле:

$$E_{12} = \frac{E_w}{1\alpha(W \cdot 12)},$$

где для изгибаемых элементов $\alpha = 0,04$.

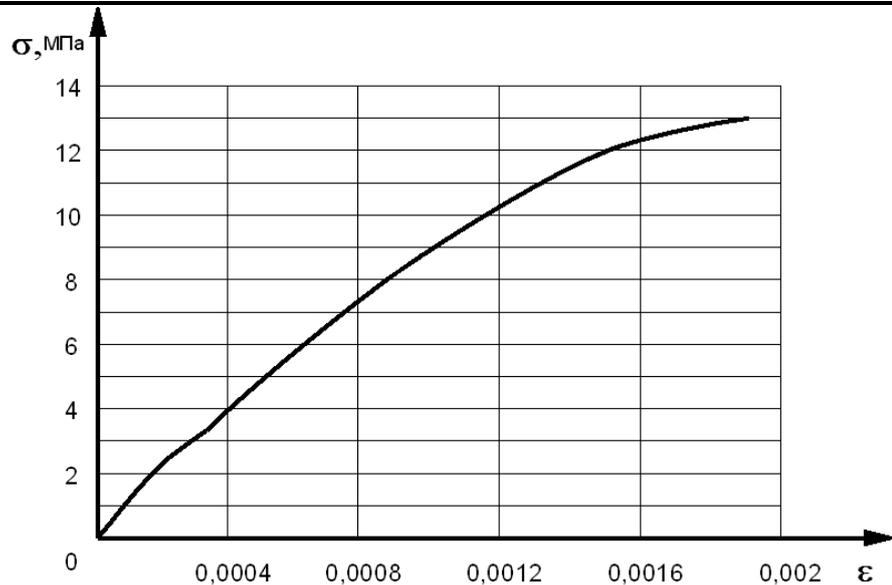


Рис. 2. Связь между полными относительными деформациями образцов и уровнем напряжений

У нашего образца влажностью 6 %, максимальное напряжение в котором при испытании было 13,0 МПа, т. е. равно расчетному сопротивлению древесины, модуль упругости в момент нагружения составил $\frac{13,0}{0,00093} = 13\,978,0$ МПа. Пересчитаем на стандартную влажность:

$$E_{12} = \frac{13\,978,0}{1 \cdot 0,04(6 \cdot 12)} = 11\,273,0 \text{ МПа.}$$

Таким образом, значение модуля упругости образца близко к нормативному значению кратковременного модуля упругости, равному 10 000 МПа.

Для этого образца получена аналогичная картина и с длительным модулем упругости, который по истечении шести месяцев составил $\frac{13,0}{0,00191} = 6\,806$ МПа. Приведем его к стандартной влажности:

$$E_{12} = \frac{6\,806,0}{1 \cdot 0,04(6 \cdot 12)} = 5\,488,0 \text{ МПа.}$$

Тогда, если привести к влажности 15 %, как рекомендуют авторы [4] и [11], длительный модуль упругости образца будет равен 5 000,0 МПа. Эти результаты показывают достаточно близкую сходимость с нормативным значением длительного модуля упругости, равного 300R (4 000,0 МПа), которое принимают для расчета деревянных элементов по деформированной схеме и на устойчивость, т. е. практически для всех деревянных конструкций за исключением балок.

Выполненные эксперименты подтвердили влияние уровня напряжений на рост ползучести древесины. Ползучесть при малых уровнях напряжений незначительна и, по-видимому, при расчетах может не учитываться. Для окончательных выводов необходимо провести системные испытания большого количества образцов при разных уровнях напряжений в условиях обеспечения стабильной влажности древесины в течение всего времени испытаний. Полученная аппроксимирующая зависимость при разных уровнях влажности древесины позволит производить расчеты деревянных конструкций на более высоком теоретическом уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балтрушайтис А.В. Прочность и стойкость деревянных клееных конструкций с различной толщиной слоев: дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 182 с.
2. Белянкин Ф.П. Длительное сопротивление древесины. М.: Стройиздат, 1934. 345 с.
3. Зубарев Г.Н. Разработка и исследования клееных конструкций для покрытий промышленных зданий: дис. ... канд. техн. наук. М., 1954. 202 с.
4. Иванов Ю.М. К методике определения деформаций деревянных конструкций в покрытиях зданий// Строительство. 1990. № 6. С. 107–109.
5. Иванов Ю.М. О предельных состояниях деревянных элементов, соединений и конструкций. М.: Стройиздат, 1947. 280 с.
6. Иванов А.М. Прикладная теория ползучести древесины: сб. науч. тр. Воронеж: ВоронежИСИ, 1957. № 6. 87 с.
7. Клименко В.З. Феноменологический подход к расчету сжато-изгибаемых деревянных элементов//Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 1. С. 7–11.
8. Линьков Н.В. Несущая способность и деформативность соединений деревянных конструкций композиционным материалом на основе матрицы и стеклоткани: дис. ... канд. техн. наук. МГСУ, 2010. 154 с.
9. 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. 73–79.
10. Рощина С.И. Прочность и деформативность клееных армированных конструкций при длительном действии нагрузки: дис. д-ра техн. наук. Владимир, 2009. 259 с.
11. Цепяев В.А. Оценка модуля упругости древесины конструкций//Жилищное строительство. 2003. № 2. С.11–13.

Поступила 22.05.15

UDC 691.11

Effects of Stress Level on Wood Creep under Bending

D.K. Arleninov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

D.A. Bekker, Head of Laboratory

Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: dkarleninov@mail.ru; vonbeck@mail.ru

The stress level in the structure largely influences on the rate of wood creep under the steady load. Previously deformation properties were investigated in a lesser extent, in the stage of nonlinear creep. Therefore, there are no experimental data of long-term tests at low stress levels, allowing us to obtain the “stress – strain” dependence. The purpose of the experimental studies is to obtain the quantitative estimates of wood creep, expressed in total (elastic and residual) strain at the design stress levels of various rates. Long-term tests of four spruce samples, sawn from one board, were carried out in the mode of “bending” at different stress levels of 2 uA ... 13 uA. The tests were carried out in a dry and warm room under the stable thermal and moist conditions. Samples moisture content during the tests was 6 %. The test validity, reduced to 12 % of moisture by the known formulas, was estimated by comparing the calculated values of short-term and long-term modulus of elasticity and the standard values. The study results confirmed the prerequisite about the impact of the stress level on the value and period of the creep process. At low levels of normal stress the creep attenuation in the midspan occurred within the first month. At stresses close to the calculated resistance the creep attenuation in the samples occurred in six months. During the seventh month the increase of deflection was not observed. According to the measurements of deflections at the test period the actual values of total strains were calculated. These values were used for “total strain – hold time” plotting for each sample. These graphs were the basis of the presented in the paper dependence “stress – total strain”, which can be used to determine the modulus of deformation. It is concluded, that for the construction of reliable empirical dependence and further approximation it is necessary to continue the research by increasing the number of samples and the range of stress levels.

Keywords: wood creep, steady load, modulus of elasticity, strain.

REFERENCES

1. Baltrushaytis A.V. *Prochnost' i stoykost' derevyannykh kleennykh konstruksiy s razlichnoy tolshchinoy sloev*: dis. kand. tekhn. nauk [Strength and Resistance of Wooden Glued Structures with Different Thickness of Layers: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 1986. 182 p.
2. Belyankin F.P. *Dlitel'noe soprotivlenie drevesiny* [Continuous Resistance of Wood]. Moscow, 1934. 345 p.
3. Zubarev G.N. *Razrabotka i issledovaniya kleennykh konstruksiy dlya pokrytiy promyshlennykh zdaniy*: dis. ... kand. tekhn. nauk [Development and Research of Glued Structures for Industrial Buildings Coating: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 1954. 202 p.
4. Ivanov Yu.M. K metodike opredeleniya deformatsiy derevyannykh konstruksiy v pokrytiyakh zdaniy [To the Technique of Strain Definition of Wooden Structures in the Building Covering]. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1990, no. 6, pp. 107–109.
5. Ivanov Yu.M. *O predel'nykh sostoyaniyakh derevyannykh elementov, soedineniy i konstruksiy* [On Limit States of Wooden Elements, Compounds and Constructions]. Moscow, 1947. 280 p.
6. Ivanov A.M. Prikladnaya teoriya polzuchesti drevesiny [Applied Theory of Wood Creep]. *Sbornik nauchnykh trudov Voronezhskogo ISI* [Proc. Civil Engineering Institute of Voronezh], 1957, no. 6. 87 p.

7. Klimenko V.Z. Fenomenologicheskiy podkhod k raschetu szhato-izgibaemykh derevyannykh elementov [Phenomenological Approach to the Calculation of Beam Wooden Column]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2011, no. 1, pp. 7–11.

8. Lin'kov N.V. *Nesushchaya sposobnost' i deformativnost' soedineniy derevyannykh konstruktsiy kompozitsionnym materialom na osnove m atritsy i steklotkani*: dis. ... kand. tekhn. nauk [Load Bearing Capacity and Deformability of Joints of Wooden Structures by Composite Materials on the Basis of Matrix and Fiberglass: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 2010. 154 p.

9. Pyatikrestovskiy K.P. K voprosu o vybore moduley uprugosti pri raschete derevyannykh konstruktsiy na prochnost', ustoychivost' i po deformatsiyam [On the Selection of the Elastic Moduli in the Calculation of Timber Structures for Strength, Stability and Deformation]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2012, no. 6, pp. 73–79.

10. Roshchina S.I. *Prochnost' i deformativnost' kleenykh armirovannykh konstruktsiy pri dlitel'nom deystvii nagruzki*: dis. ... dokt. tekhn. nauk [Strength and Deformability of Glued Reinforced Structures under Long-Term Loads: Doc. Eng. Sci. Diss.]. Vladimir, 2009. 259 p.

11. Tsepaev V.A. Otsenka modulya uprugosti drevesiny konstruktsiy [Evaluation of the Modulus of Elasticity of Wooden Structures]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2003, no. 2, pp. 11–13.

Received on May 22, 2015

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.6.128
