

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ БРУСА, КЛЕЕННОГО ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ШПОНА (LVL)

Черных А.Г., Григорьев К.С., Коваль П.С., Данилов Е.В., Бакрышева В.В., Кашапов И.Т.

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4).

Проведен сравнительный анализ методов расчета нагельных соединений деревянных конструкций, изготовленных из LVL марки Ultralam-R российского производства. На первом этапе была определена расчетная несущая способность нагельных соединений для различных размерных схем (75×100×75, 51×100×51, 51×75×51), диаметров нагелей (12 мм, 16 мм, 20 мм) и направлений приложения нагрузки (0°, 45° и 90°). Расчетные значения несущей способности нагельных соединений для различных сочетаний переменных факторов были определены по СП 64.13330.2011 и Eurocode 5. Затем образцы нагельных соединений были подвергнуты испытаниям по методике ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко для определения фактической несущей способности нагельных соединений. Фактическая несущая способность исследованных нагельных соединений оказалась выше расчетной несущей способности, определенной по российским и европейским нормам. Проведенные исследования подтвердили необходимость модернизации российских норм, приведения их к международному уровню, что позволит существенно расширить применение перспективного материала LVL в строительстве.

Ключевые слова: нагельные соединения, клеенный из однонаправленного шпона брус, Ultralam-R, несущая способность.

TO DETERMINATION OF BEARING CAPACITY OF DOWELTYPE CONNECTIONS IN LVL STRUCTURES

Chernykh A. G., Grigorjev K. S., Koval P. S., Danilov E. V., Bakrysheva V. V., Kashapov I. T.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), St. Petersburg, Russia (190005, St. Petersburg, 2-nd Krasnoarmeiskaya St., 4).

The comparative analysis of design method of dowel type connections was conducted from the timber structures, made of LVL brand Ultralam-R of Russian production. On the first phase the design bearing capacity of dowel type connections was defined for different dimensional sketches (75×100×75, 51×100×51, 51×75×51), diameter of dowels (12 mm, 16 mm, 20 mm) and loads direction (0°, 45° and 90°). The design values of bearing capacity of dowel type connections for different combinations of variable factors were defined according to SP 64.13330.2001 and Eurocode 5. After that, samples of dowel type connections were tested by the procedure of CNISK im. V. A. Kucherenko. Actual bearing capacity of tested dowel type connections showed up higher that design bearing capacity of tested dowel type connections, specified on Russian and European standards. Leading research confirmed the necessity of modernization of Russian standards, their reduction to international level, which permit considerably expands the usage of perspective material LVL in construction.

Key words: doweltype connections, LVL, Ultralam-R, bearing capacity.

Введение. Широкий ряд достоинств LVL позволяет применять его в ответственных конструкциях (стойках, главных и второстепенных балках, ригелях, поясах и решетке ферм). Однако физико-механические свойства данного материала изучены не в полном объеме. Поэтому LVL применяется лишь в простейших конструкциях, причем зачастую с многократным запасом прочности, что в свою очередь увеличивает стоимость строительства и ограничивает повсеместное использование. Российские строительные нормы не учитывают ряд факторов при расчете нагельных соединений, в первую очередь фактические

прочностные характеристики LVL, ввиду недостатка информации и практических прочностных исследований нового перспективного материала [1].

Одним из широко применяемых видов соединения элементов из LVL является нагельное. Узлы деревянных конструкций с использованием стальных цилиндрических нагелей по виду зависимости упругой деформации от прилагаемой нагрузки в диапазоне расчетной несущей способности относятся к соединениям II группы и характеризуются нелинейной зависимостью упругой деформации от нагрузки. Разрушение образцов таких соединений при нагружении за верхней границей области упругих деформаций (F_{I-II}) характеризуется развитием нелинейных деформаций и их непрерывным ростом без изменения величины нагрузки. Сопоставление реальной несущей способности для разных размерных схем нагельных соединений из Ultralam-R, при варьировании диаметров нагелей и вариантов приложения нагрузки даст возможность оценить реальный прочностной ресурс исследуемого материала.

Целью настоящей работы явилось определение фактической несущей способности нагельных соединений из LVL марки Ultralam-R [4] и сравнение её с расчетной, вычисленной по российским и европейским нормам.

На первом этапе несущая способность нагельных соединений с использованием Ultralam-R определялась расчетным путем по [3] и [7].

На втором этапе исследований производилось сопоставление фактической несущей способности для разных размерных схем нагельных соединений из Ultralam-R при варьировании диаметров нагелей и вариантов приложения нагрузки. Испытания нагельных соединений и определение фактической несущей способности конструкции осуществлялось в соответствии с [2] и [6].

В качестве размерных схем были использованы толщины крайних и средних элементов в следующих вариациях: 75×100×75, 51×100×51, 51×75×51. Диаметры нагелей были приняты 12, 14, 16, 20 мм. Возможные варианты угла направления волокон среднего элемента относительно накладок принимались равными 0°, 45° и 90° (рис. 1).

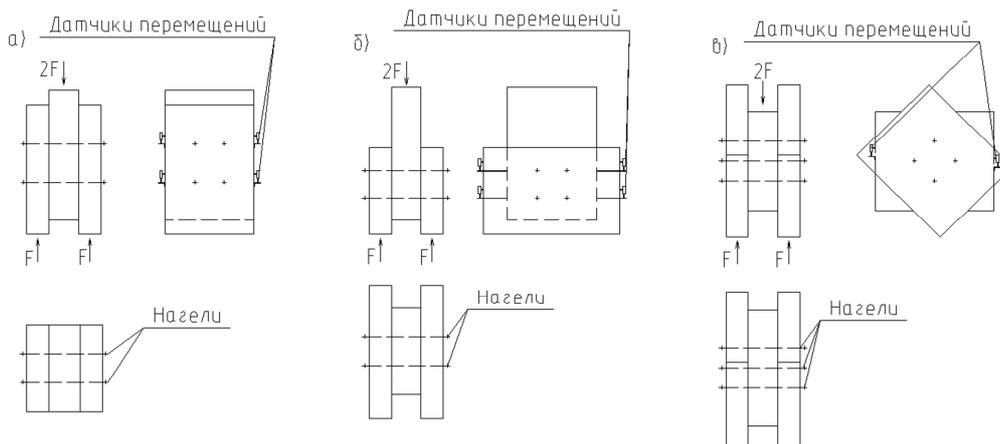


Рис. 1. Схемы образцов соединений и приложения нагрузки:
 а – сжатие соединения вдоль волокон; б – сжатие соединения с перпендикулярным расположением волокон; в – сжатие под углом 45° к волокнам.

Для проведения испытаний образцов соединений, приведенных на рис. 1, использовалась испытательная разрывная машина, обеспечивающая необходимую скорость загрузки образца. При испытании образцов соединений на сжатие сжимающее усилие от нагружающего устройства к образцу передавалось через стальной двутавр, фиксирующий точки приложения сил в плоскости, перпендикулярной плоскостям сдвига элементов соединения. Образцы с углом приложения нагрузки 45° испытывались в специальных кондукторах.

Расчетная несущая способность соединения на цилиндрических нагелях определялась согласно [3] как наименьшая из условий смятия в средних элементах (1), смятия в крайних элементах (2), изгиба нагеля (3):

$$T_{см}^c = 0,5cdk_{\alpha} \quad (1)$$

$$T_{см}^a = 0,8adk_{\alpha} \quad (2)$$

$$T_{изг} = (1,8d^2 + 0,02a^2)\sqrt{k_{\alpha}} \leq 2,5d^2\sqrt{k_{\alpha}} \quad (3)$$

где: c – толщина среднего элемента, a – толщина крайнего элемента, d – диаметр нагеля, k_{α} – угловой коэффициент.

Требуемая надежность из условия скалывания обеспечивается соблюдением шага расстановки нагелей. Рекомендуется подбирать диаметр нагеля таким образом, чтобы несущая способность соединения определялась равнопрочной работой нагельного соединения по смятию и по изгибу или только по изгибу нагеля. Результаты расчета несущей способности нагельных соединений приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетная несущая способность нагельных соединений элементов из Ultralam-R по СП 64.13330-2011, Eurocode 5 и их фактическая несущая способность по результатам испытаний

№ опыта	Параметры соединения			Несущая способность, кН		
	Размерная схема, мм	Угол, град	Диаметр нагеля, мм	T (СП 64.13330-2011)	F_d (Eurocode 5)	T_ϕ
1	75×100×75	0	20	75,967	90,074	104,028
2	51×75×51	0	20	66,093	72,345	111,257
3	75×100×75	90	20	56,339	70,037	85,227
4	51×75×51	90	20	49,016	59,197	93,650
5	75×100×75	0	12	28,800	39,071	47,535
6	51×75×51	0	12	28,800	39,071	46,821
7	75×100×75	90	12	28,800	35,789	43,650
8	51×75×51	90	12	24,455	31,870	31,940
9	75×100×75	45	16	49,400	56,751	60,067
10	51×75×51	45	16	40,569	45,398	49,981
11	51×100×51	0	16	45,357	55,092	62,343
12	51×100×51	90	16	36,568	44,659	49,719
13	51×100×51	45	20	58,184	60,109	90,261
14	51×100×51	45	12	26,948	32,427	50,593

При расчете несущей способности нагельного соединения по [7] задаются условия разрушения симметричного двухсрезного соединения элементов из LVL: смятие в крайних элементах, смятие в среднем элементе, изгиб нагеля, изгиб нагеля с растяжением при значительном его закреплении в крайних элементах.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases}, \quad (4)$$

где: $f_{h,i,k}$ – нормативное сопротивление смятию LVL крайнего ($i=1$) и среднего ($i=2$) элементов, t_i – толщина элементов, d – диаметр нагеля, $M_{y,Rk}$ – нормативный момент пластической деформации нагеля, β – масштабный коэффициент для нормативного сопротивления смятию LVL.

При этом считается, что стальной цилиндрический нагель с контролируемым максимальным усилием затяжки гаек работает как болт на изгиб без учета эффекта нити, т.е. его нормативное сопротивление выдергиванию $F_{ax,Rk}=0$, а $M_{y,Rk}$ и $f_{h,i,k}$ рассчитывалось в соответствии с п. 8.5.1.1 [7]. Для различных схем соединений задаются углы приложения нагрузки 0° , 45° и 90° к волокнам крайних и среднего элементов отдельно.

Из полученных значений несущей способности выбиралось наименьшее, которое представляет собой нормативную несущую способность одного нагеля в одной плоскости среза F_{vRk} . Для получения расчетной несущей способности соединения необходимо это значение умножить на количество нагелей и число срезов одного нагеля, коэффициент модификации $k_{mod}=0,55$ по п. 3.1.3 [7] и разделить на частный коэффициент свойств материала (LVL) $\gamma_m=1,2$ по п. 2.4.1 [7]. Результаты расчета приведены в табл. 1.

В ходе расчетов было выяснено, что несущая способность, рассчитанная по [3] и [7] для одних и тех же соединений имеет разные значения. При расчете по [7] значения несущей способности в зависимости от параметров нагельного соединения оказались выше на 30–40%, чем при расчете по [3] (табл. 1). Расхождения в результатах расчетов по российским и европейским нормам, вероятно, можно объяснить тем, что методика расчета по [7] более полно учитывает работу элементов соединения и прочностные характеристики материалов, используемых в нагельном соединении, а также учитывает момент пластической деформации нагеля и условия защемления нагеля.

Экспериментальные исследования по определению фактической несущей способности нагельных соединений выполнялись с использованием оптимальных планов второго порядка реализации многофакторных экспериментов (План Бокса-3) [5] и графо-аналитических методов определения фактической несущей способности нагельных соединений, принятых в России [2].

В качестве входных постоянных факторов для проведения многофакторного эксперимента были использованы: материал соединений LVL Ultralam-R, материал нагеля – сталь марки 40X, температурно-влажностный режим – $20\pm 5^\circ\text{C}$, $65\pm 5\%$, точность измерений – до 0,01 кН, до 0,01 мм. В качестве выходных параметров – разрушающее усилие, верхняя граница упругой стадии деформации, относительное перемещение элементов соединения при достижении F_{I-II} . Определение верхней границы упругих деформаций, перемещений и максимальной нагрузки производилось графо-аналитическим методом по построенным зависимостям «нагрузка–деформация» (рис. 2).

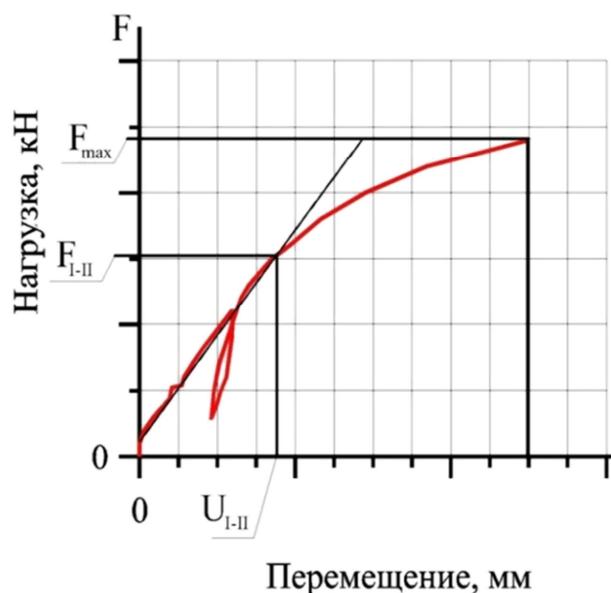


Рис. 2. Методика определения верхней границы упругих деформаций F_{I-II} .

Таким образом, были получены значения F_{I-II} и U_{I-II} для каждого образца. Значения максимальной нагрузки F_{max} определялись в момент появления трещин или характерного треска. Для каждой серии из 3 образцов одной размерной схемы с одинаковым диаметром нагелей находились средние значения F_{I-II} , U_{I-II} , F_{max} .

Оценка длительной прочности соединений произведена на основании сопоставления фактической несущей способности T_ϕ , с расчетной несущей способностью F_d , которая была определена в соответствии с требованиями [3]. Фактическая несущая способность T_ϕ находилась приведением нагрузки, соответствующей верхней границе упругих деформаций, к длительной, в соответствии с [2]:

$$T_\phi = \gamma_m F_{I-II} , \quad (5)$$

где: γ_m – коэффициент надежности по материалу, найденный по формуле [3]:

$$\gamma_m \geq \frac{(1-\eta_n \nu)}{(1-\eta_p \nu)} \quad (6)$$

Полученные значения сравнивались с расчетными значениями несущей способности по [3] и [7]. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Диаграмма полученных значений фактической и расчетной несущей способности представлена на рис. 3. Фактическая несущая способность T_ϕ выше расчетных значений по [3] (T) и [7] (F_d). При этом расхождение между теоретической и фактической несущими способностями варьируется в зависимости от параметров соединения. Следовательно, методики расчета как по [3], так и по [7] недостаточно адекватно учитывают свойства материала Ultralam-R при различных отношениях толщин соединяемых элементов и различных углах приложения нагрузки.

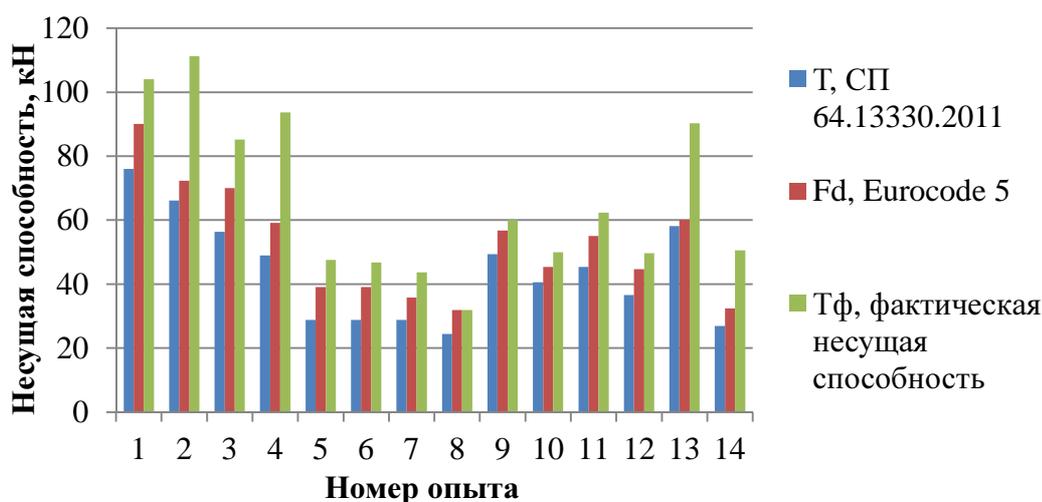


Рис. 3. Диаграмма фактических и расчетных несущих способностей нагельных соединений из Ultralam-R.

В результате математической обработки многофакторного эксперимента получено уравнение регрессии в нормализованном виде, которое связывает переменные факторы и выходной параметр (фактическая несущая способность):

$$T_{\phi}(x_1, x_2, x_3) = 54,725 + 7,280 \cdot x_2 + 26,889 \cdot x_3 + 15,723 \cdot x_3^2 - 4,136 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2,831 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (7)$$

при условии, что:

$$\begin{cases} -1 \leq x_1 \leq +1 \\ -1 \leq x_2 \leq +1 \\ -1 \leq x_3 \leq +1 \end{cases}$$

Математическая модель удовлетворяет условию адекватности при уровне значимости 0,05, т.е. построенная модель будет предсказывать значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента в области допустимых значений исследованного факторного пространства.

Из анализа полученных в ходе обработки результатов коэффициентов регрессионного уравнения можно судить о влиянии каждого из факторов на значение фактической несущей способности. Тип схемы соединения практически не оказывает влияния на фактическую несущую способность, вследствие чего в математической модели он не учитывается.

Для интерпретации результатов обработки многофакторного эксперимента были построены графические зависимости фактической несущей способности от угла приложения нагрузки и диаметра нагеля (рис. 4). По ним можно сделать выводы о нелинейной

возрастающей зависимости несущей способности от угла приложения нагрузки, т.е. при увеличении угла увеличивается и несущая способность. Наибольшее влияние на величину выходного параметра оказывает диаметр нагеля. На графике видна явно выраженная нелинейная зависимость фактической несущей способности от диаметра нагеля.

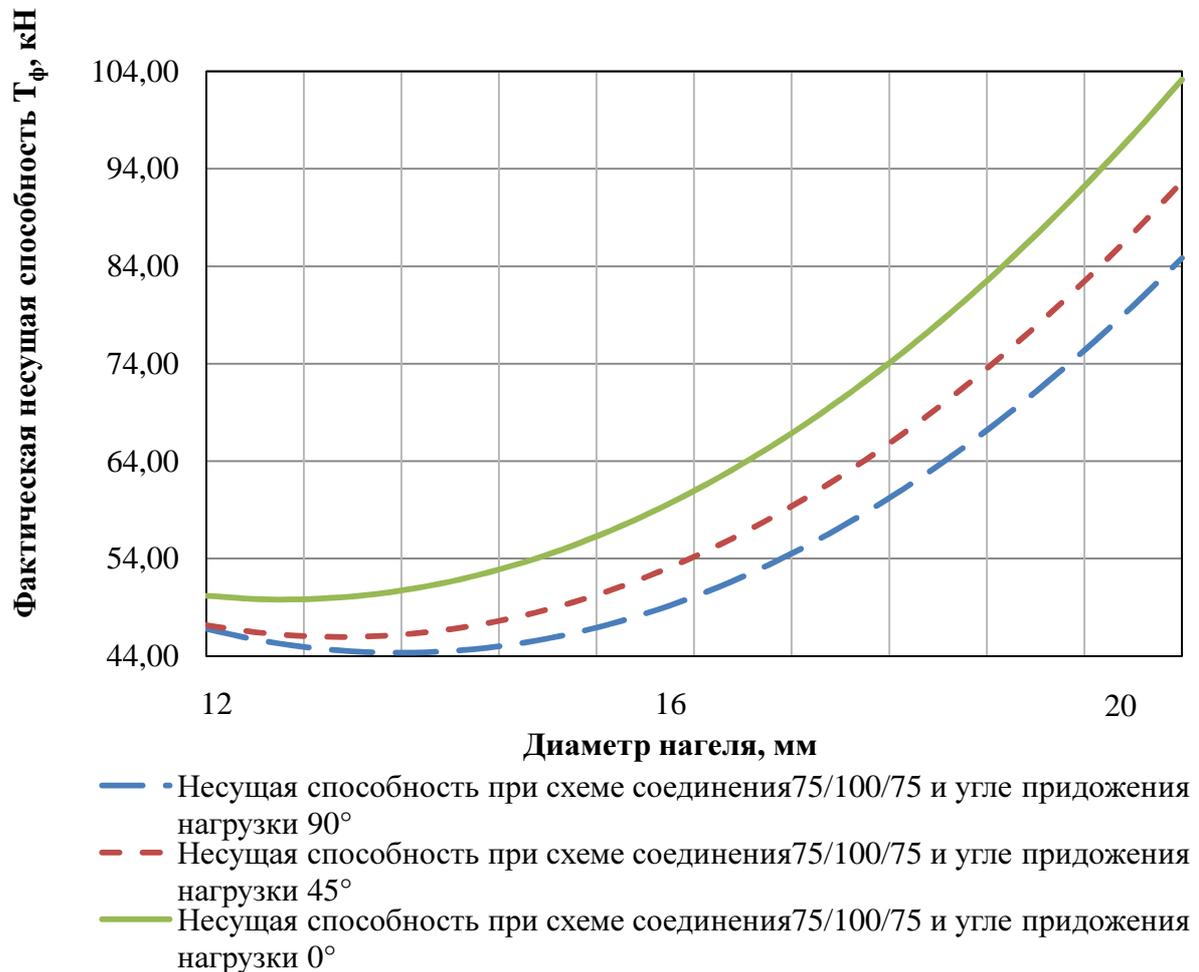


Рис. 4. Зависимость фактической несущей способности от диаметра нагеля.

Изначально, при росте величины диаметра, наблюдается небольшое снижение несущей способности, но далее функция резко возрастает, что свидетельствует о сильном увеличении несущей способности.

Выводы

1. Несущая способность нагельного соединения из Ultralam-R, рассчитанная по Eurocode 5, оказалась выше на 30–40%, чем при расчете по СП 64.13330.2011.
2. Фактическая несущая способность T_f оказалась выше расчетных значений, полученных расчетным путем по СП 64.13330.2011 и Eurocode 5, что свидетельствует о сверхнормативном запасе прочности при расчете нагельных соединений из Ultralam-R.

3. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что для повышения конкурентной способности нагельных соединений из LVL необходимо уточнить основные прочностные характеристики этого материала и гармонизировать методику их прочностного расчета с европейскими нормами.

Список литературы

1. Животов Д.А. Применение бруса, клеенного из однонаправленного шпона, в плоских балочных фермах : автореферат дис. ... канд. техн. наук. – СПб. : СПбГАСУ, 2009. – 22 с.
2. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1981. – 41 с.
3. СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.
4. СТО 36554501-021-2010 Деревянные конструкции. Многослойный клееный из шпона материал Ultralam (Ультралам). Общие технические требования. – М. : ОАО НИЦ «Строительство», 2010. – 19 с.
5. Черных А.Г. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. Учебное пособие. – Братск : БрИИ, 1996. – 59 с.
6. EN 1380:2009 Timber structures – Test methods – Load bearing nails, screws, dowels, and bolts.
7. EN 1995-1-1:2004 (E) Eurocode 5 Design of timber structures.

Рецензенты

Серов Е.Н., д.т.н., профессор кафедры конструкций из дерева и пластмасс ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург.

Глухих В.Н., д.т.н., профессор кафедры теории механизмов, деталей машин и подъемно-транспортных устройств ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург.