

КЭ-МОДЕЛЬ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВЫПОЛНЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ОСЕВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

Е. В. Маркечко¹, А. Я. Найчук²

¹ М. т. н., старший преподаватель кафедры строительных конструкций
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: bk-2112@mail.ru

² Д. т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: atnya@yandex.ru

Реферат

В статье приведено обоснование КЭ-модели соединения элементов деревянных конструкций с использованием винтов, воспринимающих осевые усилия растяжения, базирующееся на результатах сопоставления данных численных и экспериментальных исследований напряженного состояния древесины. Выполнен анализ изменения напряжений в древесине в зависимости от длины анкеровки и расстояния от оси винта.

Ключевые слова: древесина, винт, прочность, напряжение, конечный элемент.

FE-MODEL OF TIMBER CONNECTION WITH SCREWS SUBJECTED TO AXIAL TENSION

E. V. Markechko, A. Ya. Naichuk

Abstract

FE-Model of timber joints with screw subjected to axial tension is described in this paper. FE-Model Evaluation and Validation is based on comparison between the results of experimental and FE-analysis of timber stressed state in joint. The relationship between the wood stress values and the anchorage length and the distance from the screw axis is presented and analyzed.

Keywords: timber, screw, strength, stress, final element.

Введение

Использование винтов в соединениях элементов деревянных конструкций позволяет уменьшить влияние пороков древесины (сучков, свилеватости и косослоя) на их несущую способность, а по сравнению с клееными стержнями сократить сроки их изготовления и монтажа. Вместе с тем накопленный опыт строительства зданий из деревянных конструкций с соединениями такого типа показывает, что в процессе эксплуатации они не всегда удовлетворяют требованиям надежности и долговечности из-за образования продольных трещин в древесине соединяемых элементов в зонах обрыва растянутых стержней. Это свидетельствует о несовершенстве существующих методик расчета таких соединений.

Известно, что несущая способность конструкции зависит от прочности используемого материала, напряженного состояния как ее элементов, так и элементов соединений. Следовательно, для соединений элементов деревянных конструкций с использованием винтов определение напряженного состояния древесины, расположенной в зоне установки винта, является актуальной задачей. Сложность решения данной задачи состоит в том, что все компоненты напряжений должны быть определены не только на поверхности элемента, но и по ширине и длине соединяемых элементов [1, 2]. Решение данной задачи экспериментальным путем довольно проблематично из-за ограниченных возможностей измерения деформаций в массиве древесины соединяемых элементов посредством винтов. Поэтому решение этой задачи возможно с использованием численных методов (например, метода конечных элементов) с соответствующим обоснованием экспериментальным путем принятых расчетных моделей.

Целью данных исследований являлось обоснование КЭ-модели узлового соединения элементов деревянных конструкций с использованием винтов, воспринимающих осевые усилия растяжения.

Методика экспериментальных и численных исследований напряженного состояния соединения

Исследуемый образец соединения представлял собой деревянный элемент Д1 составного поперечного сечения с установленным

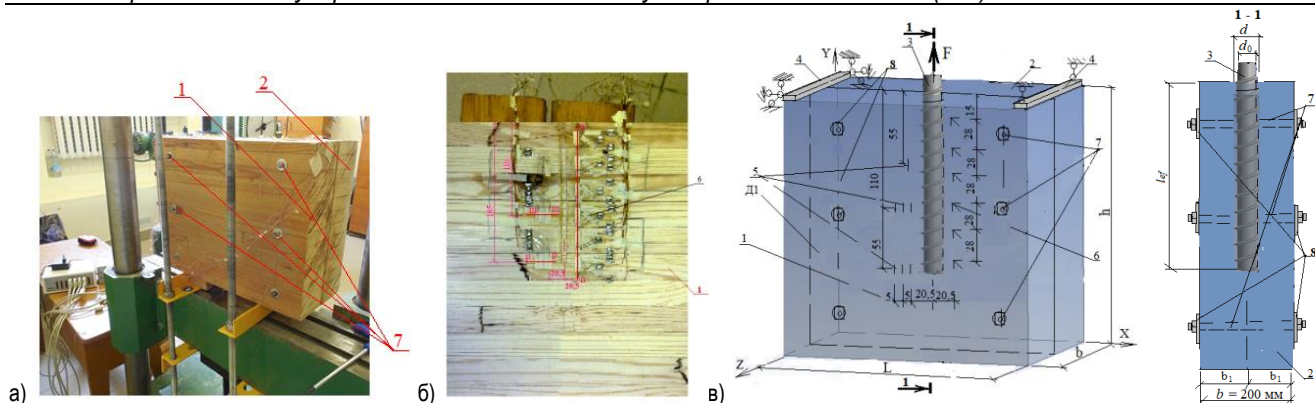
перпендикулярно волокнам винтом 3 (рисунок 1). Винт 3 располагался посередине длины L и ширины b поперечного сечения деревянного элемента Д1, состоящего из двух элементов 1 и 2 клееной древесины. Наружный диаметр винта $d = 11$ мм (рисунок 1). Варьируемым параметром как в КЭ-моделях, так и в испытываемом образце являлась длина анкеровки l_{ef} винта 3 в деревянном элементе Д1, значение которой принималось равным $l_{ef1} = 110$ мм и $l_{ef2} = 165$ мм (рисунок 1). Размеры поперечного сечения элементов 1 и 2 $L \times h \times b_1 = 400 \times 500 \times 100$ мм. В экспериментальном образце элементы 1 и 2 соединялись между собой с помощью 6 стяжных стальных шпилек 7 диаметром $d_b = 10$ мм (рисунок 1). Между гайками стальных шпилек и наружными плоскостями деревянного элемента Д1 располагались шайбы наружным диаметром 16 мм. Значение усилия натяжения стяжных шпилек 7 принималось, исходя из условия прочности древесины под шайбами при ее сжатии поперек волокон. Винт 3 в элементе Д1 устанавливался в предварительно просверленное отверстие диаметром $d_0 = 6,5$ мм. Продольная ось просверленного отверстия была перпендикулярна горизонтальной линии сплачивания элементов 1 и 2.

После высверливания в элементе Д1 предварительного отверстия глубину (длину) анкеровки $l_{ef2} = 165$ мм элементы 1 и 2 разъединялись и на внутреннюю поверхность элемента 1 наклеивались тензодатчики в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1в. База тензодатчиков составляла 10 мм. Для исключения повреждения тензодатчиков при сплачивании элементов 1 и 2 в элементе 2 были выфрезерованы вертикальные пазы глубиной 3 мм и шириной 14 мм.

Для измерения относительных деформаций все тензодатчики подключались к компьютерному измерительному комплексу «ТИССА-В-485/65».

После сплачивания элементов 1 и 2 выполнялось завинчивание винта на заданную длину анкеровки l_{ef} и фиксация показаний по тензодатчикам.

Испытание образца выполнялось в испытательной машине УМЭ-10ТМ в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1в. Для испытаний был изготовлен 1 опытный образец.



Д1 – деревянный элемент; 1, 2 – элементы из клееной древесины $L \times b \times h = 500 \times 100 \times 200$ мм; 3 – винт диаметром $d = 11$ мм; 4 – упорные стальные пластины $h_1 \times b_1 \times l_0 = 20 \times 70 \times 200$ мм; 5 – тензодатчики базой 10 мм; 6 – тензорозетки базой 10 мм; 7 – стяжные стальные шпильки диаметром $d_b = 10$ мм; 8 – стальные шайбы диаметром 16 мм

а) – общий вид испытываемого образца; б) – общий вид расположения тензодатчиков по линиям «п-п», «т-т» и «р-р» элемента 1; в) – схема испытаний

Рисунок 1 – Общий вид и схема испытываемого образца соединения

На основании измеренных в сечениях досок клееного элемента значений относительных деформаций $\varepsilon_{xy,i}$, $\varepsilon_{yx,i}$ и $\varepsilon_{45,i}$ напряжения $\sigma_{x,i}$, $\sigma_{y,i}$ и $\tau_{xy,i}$ определялись по формулам (1–3) [3].

$$\sigma_{x,i} = E_{x,i} \left(\frac{\varepsilon_{x,i} + \nu_{yx,i} \cdot \varepsilon_{y,i}}{1 - \nu_{xy,i} \cdot \nu_{yx,i}} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_{y,i} = E_{y,i} \left(\frac{\varepsilon_{y,i} + \nu_{xy,i} \cdot \varepsilon_{x,i}}{1 - \nu_{xy,i} \cdot \nu_{yx,i}} \right), \quad (2)$$

$$\tau_{xy,i} = G_{xy,i} \left[2 \cdot \varepsilon_{45,i} - (\varepsilon_{x,i} + \varepsilon_{y,i}) \right], \quad (3)$$

где $E_{x,i}$ и $E_{y,i}$ – модуль упругости древесины вдоль и поперек волокон i -той доски клееного элемента соответственно;

$\nu_{xy,i}$ и $\nu_{yx,i}$ – коэффициенты поперечной деформации древесины i -й доски клееного элемента;

$G_{xy,i}$ – модуль сдвига древесины i -й доски клееного элемента;

$\varepsilon_{x,i}$, $\varepsilon_{y,i}$ и $\varepsilon_{45,i}$ – относительные деформации вдоль, поперек и под углом 45° к волокнам древесины i -й доски клееного элемента соответственно.

Значения упругих характеристик древесины i -й доски клееного элемента определялись на основе результатов испытаний маломасштабных образцов [4–7], вырезанных из досок клееного пакета элемента 1. На основании результатов испытаний маломасштабных образцов средние значения упругих характеристик древесины досок клееного элемента 1 оказались равны: $E_{x,mean} = 11440$ МПа; $E_{y,mean} = 733$ МПа; $G_{xy,mean} = 632$ МПа; $\nu_{xy} = 0,44$; $\nu_{yx} = 0,028$.

Испытания опытного образца соединения винта с элементом Д1 по определению напряженного состояния проводились в четыре этапа. На каждом этапе испытаний по показаниям тензодатчиков, расположенных вдоль вертикальной «п-п» и горизонтальных «т-т» и «р-р» линий на внутренней поверхности элемента 1 (рисунок 1б), фиксировались относительные деформации в древесине. Вертикальная линия «п-п» находилась на расстоянии 20,5 мм от продольной оси винта, а горизонтальные линии «т-т» и «р-р» с началом в горизонтальном направлении 20,5 мм от продольной оси винта и в вертикальном направлении на расстоянии 110 мм и 165 мм от верхней грани элемента Д1, что соответствовало длине анкеровки l_{ef1} и l_{ef2} винта.

На первом этапе испытаний определялось распределение напряжений в древесине элемента 1 по длине вертикальной линии «п-п» и горизонтальной «т-т» при $l_{ef1} = 110$ мм (рисунок 1в) сразу после ввинчивания винта, а также спустя 12 и 48 часов.

На втором этапе испытаний после истечения 48 часов от момента ввинчивания винта при $l_{ef1} = 110$ мм к нему прикладывалось растягивающее усилие $F = 10,1$ кН с фиксацией показаний по всем тензодатчикам и последующей разгрузкой.

На третьем этапе испытаний после разгрузки и выдержки его в течении 24 часов выполнялось дальнейшее ввинчивание винта на глубину $l_{ef2} = 165$ мм и фиксация показаний по всем тензодатчикам.

На четвертом этапе испытаний к ввинченному винту при $l_{ef2} = 165$ мм прикладывалось растягивающее усилие $F = 10,1$ кН с фиксацией показаний по всем тензодатчикам.

При определении напряженно-состояния узловых соединений с винтами, воспринимающими действие осевых усилий, использовался метод конечных элементов в среде «ANSYS Workbench».

Для построения КЭ-модели соединения использовались следующие КЭ:

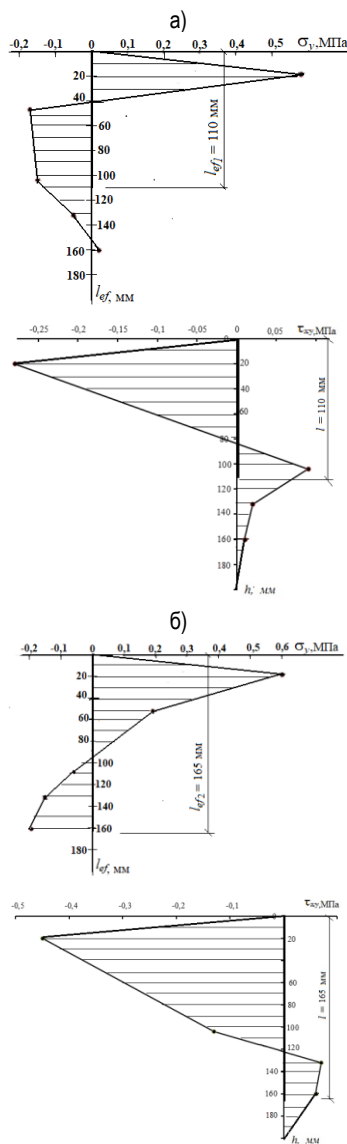
- для моделирования винта принимались КЭ типа SOLID186, которые определяются двадцатью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлениях осей x , y и z . Данный КЭ позволял учитывать такие свойства моделируемого материала, как пластичность, гиперэластичность, которые учитываются в функциях аппроксимации поля перемещений;
 - при моделировании деревянного элемента соединения применялись КЭ типа SOLID187, которые определяются десятью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X , Y , Z системы координат;
 - для моделирования контактного взаимодействия между винтом и древесиной применялась пара КЭ типа CONTA174/TARGE170. Контакт происходит при внедрении контактного узла CONTA174 в элемент ответной поверхности TARGE170. Размеры контактных элементов определяются связанными с ними конечными элементами соответствующего поверхностного слоя модели. Модель взаимодействия «поверхность-поверхность». КЭ типа CONTA174 использовалась для моделирования контакта и скольжения между трехмерными целевыми поверхностями и деформируемой поверхностью, определяемой этим элементом.
- В данной КЭ-модели древесина рассматривалась как трансверсально изотропный материал с упругими характеристиками равными средним значениям, определенным при испытании досок клееного элемента 1. Значения коэффициентов трения между контактирующими поверхностями элементов 1 и 2 принималось равным 0,6 [8]. Что же касается значения коэффициента трения между поверхностями винта и древесины, то оно принималось равным нулю. Усилие обжатия элементов 1 и 2, создаваемое от натяжения шпилек, в численной модели моделировалось сосредоточенными силами, приложенными перпендикулярно боковым плоскостям элемента Д1 в точках расположения шпилек.

Анализ напряженного состояния узлового соединения

В результате испытаний образца на первом и третьем этапах было установлено, что после ввинчивания винта древесина, расположенная вблизи него, находится в сложном напряженном состоянии (рисунок 2). Возникновение внутренних напряжений σ_y и τ_{xy} в древесине обусловлено ее расклиниванием при проникновении резьбы в ее массив. Вследствие расклинивания древесины резьбой в ней возникает растяжение поперек и скалывание вдоль волокон. Следует отметить, что характер распределения напряжений зависит от длины анкеровки винта.

Максимальных значений нормальные σ_y и касательные τ_{xy} напряжения достигают у верхней грани образца (рисунок 2). С увеличением длины анкерки l_{ef} максимальные значения напряжений σ_y и τ_{xy} возрастают, что обусловлено изменением жесткости деформируемого массива древесины по направлению продольной оси винта при его ввинчивании.

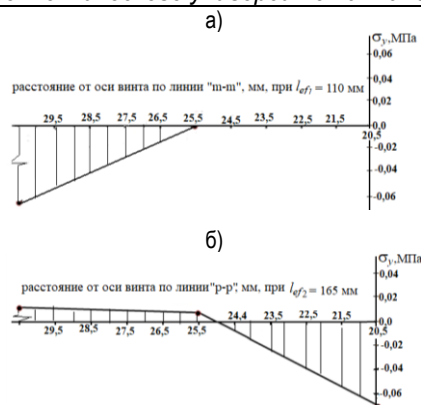
В результате измерений относительных деформаций спустя 12 часов после ввинчивания винта (первый этап испытаний) было установлено, что значения относительных деформаций ε_y поперек волокон уменьшились в среднем на 8 % по сравнению с их первоначальным значением. Что же касается изменения значений деформаций ε_y в последующие 48 часов, то они практически не изменялись.



а) – при длине анкерки $l_{ef1} = 110$ мм;
б) – при длине анкерки $l_{ef2} = 165$ мм

Рисунок 2 – Распределение напряжений σ_y и τ_{xy} в древесине по длине линии «п-п» после ввинчивания винта

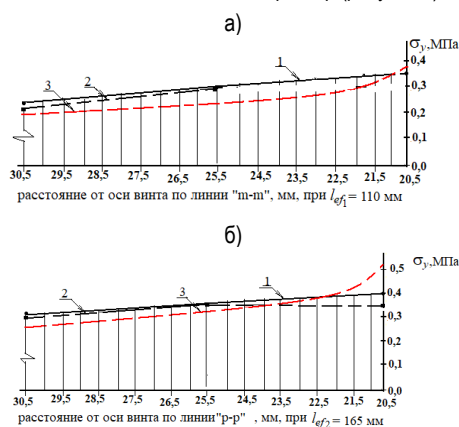
Что же касается напряжений σ_y , возникающих в древесине по длине горизонтальных линий «т-т» и «р-р», расположенных на уровне обрыва анкерки винта, то их значения незначительны (рисунок 3). Вместе с тем при длине анкерки $l_{ef1} = 110$ мм на расстоянии $2,5 d$ от продольной оси винта древесина испытывает сжатие поперек волокон, а при $l_{ef2} = 165$ мм – незначительное растяжение, которое по своему значению в 20 раз меньше прочности $f_{t,90}$ древесины при растяжении поперек волокон [9]. Отсутствие напряжений σ_y по длине линии «т-т» на участке от 20,5 мм до 25,5 мм (рисунок 3) объясняется тем, что предварительное отверстие для установки винта было просверлено на глубину $l_{ef2} = 165$ мм.



а) – при длине анкерки $l_{ef1} = 110$ мм;
б) – при длине анкерки $l_{ef2} = 165$ мм;

Рисунок 3 – Распределение напряжений σ_y в древесине в зоне обрыва винта по длине линий «т-т» и «р-р» после его ввинчивания

При приложении к винту растягивающего усилия F , значения напряжений σ_y в древесине, расположенной в зоне обрыва анкерки (линии «т-т» и «р-р»), увеличиваются (рисунок 4), вызывая ее растяжение поперек волокон, что существенно может сказаться на несущей способности соединения (рисунок 2). Сопоставляя экспериментальные и численные значения напряжений σ_y , можно отметить, что первые больше вторых в среднем на 20–25 %. Это можно объяснить тем, что в численной модели принимались средние значения упругих характеристик древесины, а в эксперименте – значения упругих характеристик, определенных для каждой доски клееного пакета. Что же касается распределения напряжений σ_y по длине линий «т-т» и «р-р», полученных экспериментальным путем и в результате численных расчетов, то они имеют один и тот же характер (рисунок 4).

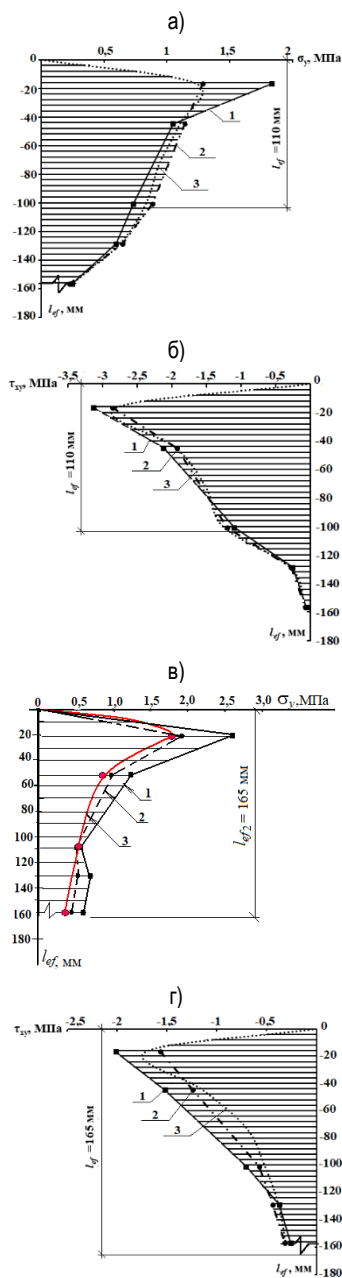


1 – экспериментальные значения напряжений после ввинчивания и действия усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; 2 – экспериментальные значения напряжений от усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; 3 – численные значения напряжений от усилия выдергивания $F = 10,1$ кН;
а) – при длине анкерки винта $l_{ef1} = 110$ мм;
б) – при длине анкерки винта $l_{ef2} = 165$ мм

Рисунок 4 – Распределение напряжений σ_y в древесине в зоне обрыва винта по длине горизонтальных линий «т-т» и «р-р»

При приложении к винту растягивающего усилия F , распределение напряжений σ_y и τ_{xy} в древесине образца по линии «п-п» (высоте образца), полученных экспериментальным путем, имеют один и тот же характер, что и по методу КЭ (рисунок 5). При этом в некоторых точках экспериментальное значение на 25 % больше их численных значений. Это объясняется тем, что в численной модели не учитывался эффект расклинивания древесины при проникновении резьбы в ее массив, наличием вертикального паза (выборки) по линии «п-п» в элементе 2 составного элемента Д1, а также отличием в значениях упругих характеристик досок клееного пакета. Следует отметить, что

для случая действия на винт растягивающего усилия F (без учета напряжений от ввинчивания), расхождение между экспериментальными и численными значениями напряжений уменьшается и находится в пределах от 5 % до 15 % (рисунок 5).



1 – экспериментальные значения напряжений после ввинчивания и действия усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; 2 – экспериментальные значения напряжений от усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; 3 – численные значения напряжений от усилия выдергивания $F = 10,1$ кН; а) – при длине анкеровки винта $l_{ef1} = 110$ мм; б) – при длине анкеровки винта $l_{ef2} = 165$ мм

Рисунок 5 – Распределение напряжений σ_y и τ_{xy} в древесине по длине вертикальной линии «n-n»

Заключение

В результате проведенных экспериментальных и численных исследований было установлено:

- принятая КЭ-модель соединения отражает действительную его работу и может быть использована при исследовании напряженного состояния соединений элементов деревянных конструкций с винтами, воспринимающими осевые усилия;
- определенные экспериментальным путем численные значения и распределение напряжений в древесине, расположенной

в зоне винта, имеют хорошую сходимость с результатами численных исследований;

- с увеличением длины анкеровки винта неравномерность распределения напряжений в древесине увеличивается;
- в зоне обрыва анкеровки винта в древесине возникает растяжение поперек волокон, которое должно учитываться при определении несущей способности соединения в качестве дополнительного условия.

Список цитированных источников

1. Найчук, А. Я. Численное исследование напряженного состояния древесины в зоне винтов, работающих на выдергивание поперек волокон / А. Я. Найчук, Е. В. Лещук // Строительная наука-2014: теория, образование, практика, инновации : сборник трудов международной научно-технической конференции посвящается 55-летию ИСиА САФУ, Архангельск, 22–23 мая 2014 г. / под ред. Б. В. Лабудина. – Архангельск, 2014. – С. 276–282.
2. Найчук, А. Я. Напряженно-деформированное состояние древесины при ввинчивании винта поперек волокон / А. Я. Найчук, Е. В. Маркечко // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. научных трудов. – Одесса, 2016. – С. 90–95.
3. Ашкенязи, Е. К. Анизотропия конструкционных материалов: справочник / Е. К. Ашкенязи, Э. В. Ганов. – Ленинград : Машиностроение, 1980. – 248 с.
4. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии вдоль волокон : ГОСТ 16483.24-73. – Введ. 01.01.1975. – М : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 4 с.
5. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии поперек волокон : ГОСТ 16483.25-73. – Введ. 01.01.1975. – М : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 6 с.
6. Древесина. Метод определения коэффициентов поперечной деформации : ГОСТ 16483.29-73. – Введ. 01.01.1975. – М : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 7 с.
7. Древесина. Метод определения модулей сдвига : ГОСТ 16483.30-73. – Введ. 01.01.1975. – М : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 7 с.
8. Карлсен, Г. Г. Конструкции из дерева и пластмасс: учебник для вузов / Г. Г. Карлсен, Ю. В. Слишкоухов. – М. : Стройиздат, 1986. – 543 с.
9. Деревянные конструкции : СП 5.05.01-2021. – Введ. 01.06.2021. – Минск : М-во архит. и строит. Республики Беларусь, 2021. – 115 с.

References

1. Najchuk, A. Ya. Chislennoe issledovanie napryazhennogo sostoyaniya drevesiny v zone vintov, rabotayushchih na vydergivanie poperek volokon / A. Ya. Najchuk, E. V. Leshchuk // Stroitel'naya nauka-2014: teoriya, obrazovanie, praktika, innovacii : sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii posvyashchaya 55-letiyu ISiA SAFU, Arhangel'sk, 22–23 maya 2014 g. / pod red. B. V. Labudina. – Arhangel'sk, 2014. – S. 276–282.
2. Najchuk, A. Ya. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie drevesiny pri vvinchivanii vinta poperek volokon / A. Ya. Najchuk, E. V. Markechko // Sovremennye stroitel'nye konstrukcii iz metalla i drevesiny : sb. nauchnyh trudov. – Odessa, 2016. – S. 90–95.
3. Ashkenazi, E. K. Anizotropiya konstrukcionnyh materialov: spravochnik / E. K. Ashkenazi, E. V. Ganov. – Leningrad : Mashinostroenie, 1980. – 248 s.
4. Drevesina. Metod opredeleniya modulya uprugosti pri szhatii vdol' volokon : GOST 16483.24-73. – Vved. 01.01.1975. – M : IPK lzdatel'stvo standartov, 1999. – 4 s.
5. Drevesina. Metod opredeleniya modulya uprugosti pri szhatii poperek volokon : GOST 16483.25-73. – Vved. 01.01.1975. – M : IPK lzdatel'stvo standartov, 1999. – 6 s.
6. Drevesina. Metod opredeleniya koeffitsientov poperechnoj deformacii : GOST 16483.29-73. – Vved. 01.01.1975. – M : IPK lzdatel'stvo standartov, 1999. – 7 s.
7. Drevesina. Metod opredeleniya modulej sdviga : GOST 16483.30-73. – Vved. 01.01.1975. – M : IPK lzdatel'stvo standartov, 1999. – 7 s.
8. Karl'sen, G. G. Konstrukcii iz dereva i plastmass: uchebnik dlya vuzov / G. G. Karl'sen, Yu. V. Slickouhov. – M. : Stroizdat, 1986. – 543 s.
9. Derevyannye konstrukcii : SP 5.05.01-2021. – Vved. 01.06.2021. – Minsk : M-vo arhit. i stroit. Respubliki Belarus', 2021. – 115 s.

Материал поступил 15.01.2023, одобрен 21.02.2023, принят к публикации 21.02.2023