

Математическая модель деформации нагельных соединений с когтевыми шайбами при действии изменяющихся нагрузок

Е.В. Данилов, Ш.М. Мамедов, Р.В. Хохрин, О.С. Цой

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

Аннотация: В работе рассматриваются теоретические исследования деформированного состояния нагельного соединения с когтевыми шайбами в конструкциях из ЛВЛ (от англ. LVL – Laminated Veneer Lumber). Разработана математическая модель снеговой нагрузки. Приводится методика теоретических вычислений ползучести от действия периодической нагрузки на основе ранее выполненных экспериментов.

Ключевые слова: когтевая шайба, клееный брус, соединение, деформация, математическая модель, нагрузка, уравнение регрессии, влажность, ползучесть.

Введение

Конструкции из ЛВЛ (от англ. LVL – Laminated Veneer Lumber) активно применяются в строительстве и являются перспективной областью для дальнейшего подробного изучения с точки зрения работы соединений таких конструкций [1, 2]. В частности, существуют соединения с когтевыми шайбами, которые являются разновидностями шпоночных и нагельных соединений. Физико-механические характеристики таких соединений высоки и требуют дополнительного изучения внутри конструкций [3, 4].

Нагельные соединения с когтевыми шайбами имеют высокую прочность и жесткость, и могут быть эффективно использованы в сквозных конструкциях из ЛВЛ, где требуется восприятие значительной нагрузки при малых площадях для размещения соединителей. Существующие методы расчета по деформациям для таких соединений описывают поведение конструкции во времени недостаточно точно и требуют совершенствования. [5 – 7].

Методология

При действии неизменной нагрузки на соединение из ЛВЛ с когтевыми шайбами с течением времени могут постепенно увеличиваться деформации

(рис.1) [8, 9], что может быть объяснено свойствами упругого последействия в таких узлах [10]. Данный фактор может являться приоритетным при учете долговечности конструкций здания, а уравнение упругого последействия $\delta_{\text{п}}$ может быть описано уравнением:

$$\delta_{\text{п}} = \delta_{\text{к}} \varphi(\tau),$$

где $\delta_{\text{к}}$ – кратковременная деформация соединения, возникающая в момент приложения нагрузок; $\varphi(\tau)$ – уравнение, описывающее характеристику ползучести нагельного соединения с когтевыми шайбами.

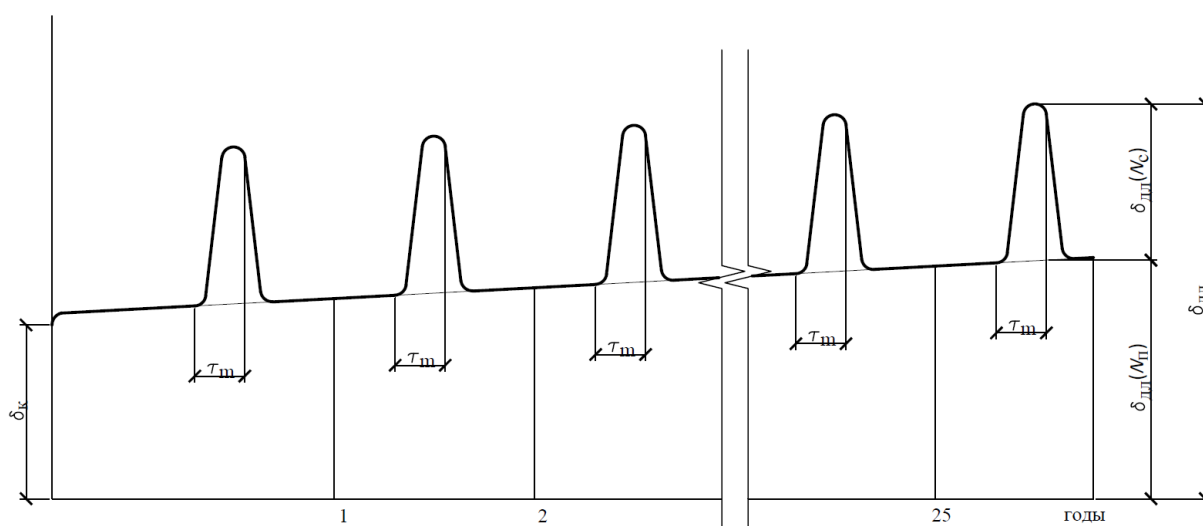


Рис. 1. – Деформации соединений конструкции под воздействием изменяющихся нагрузок

Соединения воспринимают постоянные нагрузки от собственного веса $g_{\text{п}}$ и периодичную снеговую нагрузку $g_{\text{с}}$. При этом в узле возникают соответствующие усилия $N_{\text{п}}$ и $N_{\text{с}}$. Расчетная несущая способность соединения принимается равной T . Усилия $N_{\text{п}}$ и $N_{\text{с}}$ не могут суммарно превышать T , и принимаются долями от расчетной несущей способности: $N_{\text{п}} = B_{\text{п}} T$; $N_{\text{с}} = B_{\text{с}} T$, где $B_{\text{п}}$ и $B_{\text{с}}$ коэффициенты учета постоянной и периодичной снеговой нагрузки.

В зимнее время деформации конструкции увеличиваются из-за воздействия снеговых нагрузок в период выпадения снега. После снеготаяния деформации уменьшаются и в зависимости от уровня нагружения возвращаются (или приближаются) к значениям деформаций от постоянной нагрузки g_n . При этом полная деформация может быть определена суммированием деформаций от усилий постоянных и снеговых нагрузок:

$$\delta_{\text{дл}} = \delta_{\text{дл}}(N_n) + \delta_{\text{дл}}(N_c). \quad (1)$$

Так же, согласно [11] полная деформация соединений к моменту наблюдения τ может быть определена:

$$\delta(\tau) = \delta_y [1 + \varphi(\tau)],$$

где δ_y – упруго-мгновенная деформация соединения.

Полная длительная деформация от действия N_n за время τ :

$$\delta_{\text{дл}}(N_n) = \delta_k(N_n) [1 + \varphi(\tau)]. \quad (2)$$

Изменение снеговой нагрузки за зимний период могут быть описаны диаграммами ступенчатого вида по данным снегосъёмов. Усредненные значения распределения таких воздействий представлены на рис.2.

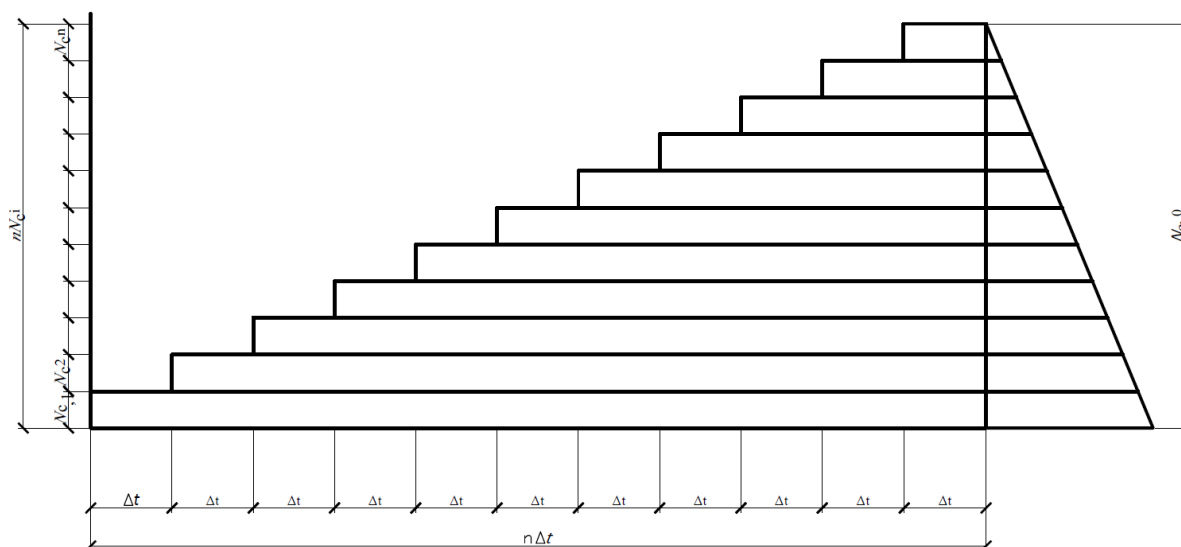


Рис. 2. – Расчетная модель снеговой нагрузки [11]

Согласно исследованиям [12, 13], каждую декаду происходит неравномерный прирост снеговой нагрузки, однако, с упрощением расчетной модели распределения снеговой нагрузки, и с принятием прироста равномерным на величину S_i , результат не сказывается на итоговой деформации по окончании цикла снеготаяния.

Результаты

Ранее было исследовано поведение когтя шайбы при действии длительной нагрузки [5]. Экспериментально были определены кривые ползучести (рис.3, 4) для треугольного штампа различных размеров ($h=11,5$ и 6 мм) для различной влажности ($W=9,8\%$; $11,2\%$).

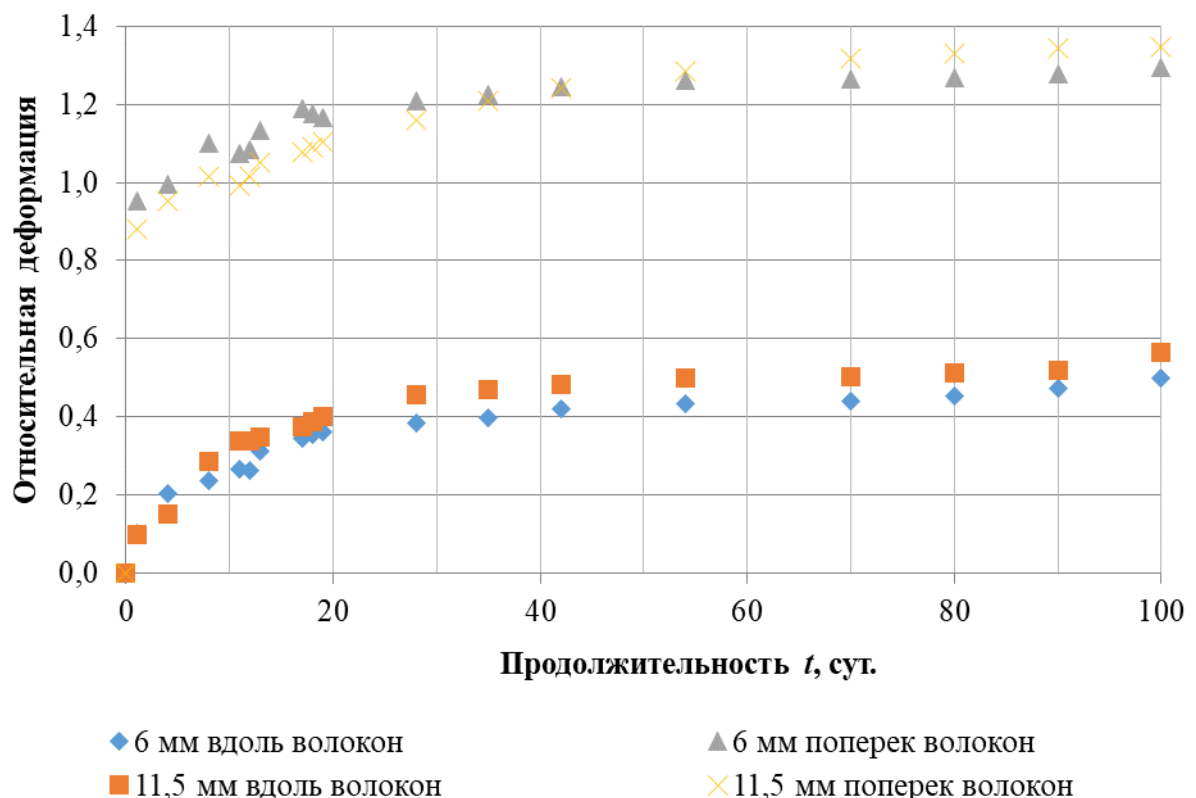


Рис. 3. – Экспериментальные зависимости ползучести от времени для треугольного штампа в ЛВЛ при влажности $W=9,8\%$ [5]

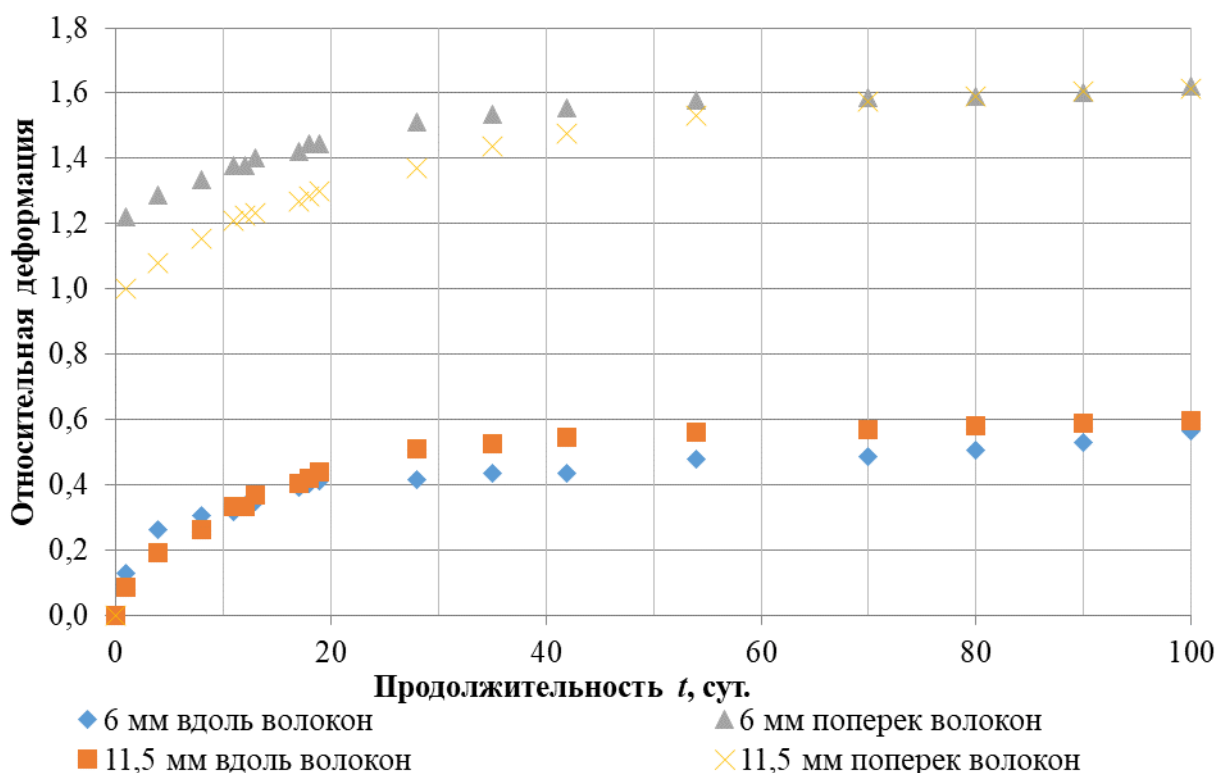


Рис. 4. – Экспериментальные зависимости ползучести от времени для треугольного штампа в ЛВЛ при влажности $W=11,2\%$ [5]

Кривые ползучести успешно согласовываются с применением уравнения регрессии в виде:

$$\varphi^{0,90}(\tau) = A(a \cdot \ln(\tau) + b),$$

где A , a , b – постоянные уравнения (1); τ – время определения ползучести.

Для учета влияния влажности образцов W на результаты исследования, был использован параметр A , выражающий зависимость от изменения влажности в образцах. Кривые зависимости при действии нагрузки вдоль волокон $\varphi^0(\tau)$ удовлетворительно описываются уравнением регрессии при коэффициентах $a = 0,105$; $b = 0,048$, а для нагрузки поперек волокон $\varphi^{90}(\tau)$ коэффициенты $a = 0,082$; $b = 0,923$, при этом:

$$A^{0,90} = 0,123 W - 0,205.$$

Уравнение зависимости $\varphi(\tau)$ принимает вид:

$$\varphi^0(\tau) = (0,123 W - 0,205) \cdot (0,105 \cdot \ln(\tau) + 0,048);$$

$$\varphi^{90}(\tau) = (0,123 W - 0,205) \cdot (0,082 \cdot \ln(\tau) + 0,923).$$

Учитывая выражения (2), для срока службы деревянных конструкций, равного $\tau = 25$ лет (9131 сут.) и влажности $W = 12\%$ полная длительная деформация от постоянной нагрузки составит:

$$\delta_{\text{дл}}^0(N_{\text{п}}) = \delta_{\text{к}}(N_{\text{п}}) [1 + 1,278] = 2,278 \delta_{\text{к}}(N_{\text{п}});$$

$$\delta_{\text{дл}}^{90}(N_{\text{п}}) = \delta_{\text{к}}(N_{\text{п}}) [1 + 2,124] = 3,124 \delta_{\text{к}}(N_{\text{п}}).$$

Полная длительная деформация от действия N_c за время τ можно представить, как сумму длительных деформаций $\delta_{\text{дл}}(N_c)$ от воздействия S_1, S_2, \dots, S_n , в периоды времени $t_1 = n \Delta t, t_2 = (n - 1) \Delta t, t_n = \Delta t$. Деформации от действия снега в каждую декаду при $W=12\%$ вдоль волокон:

$$\delta_{\text{дл}}^0(N_{c,1}) = \delta_{\text{к}}(N_{c,1}) + 1,271 \cdot (0,105 \cdot \ln(n \Delta t) + 0,048) \delta_{\text{к}}(N_{c,1});$$

$$\delta_{\text{дл}}^0(N_{c,2}) = \delta_{\text{к}}(N_{c,2}) + 1,271 \cdot (0,105 \cdot \ln[(n - 1)\Delta t] + 0,048) \delta_{\text{к}}(N_{c,2});$$

.....

$$\delta_{\text{дл}}^0(N_{c,n}) = \delta_{\text{к}}(N_{c,n}) + 1,271 \cdot (0,105 \cdot \ln(\Delta t) + 0,048) \delta_{\text{к}}(N_{c,n}).$$

где n – количество декад.

$$\delta_{\text{дл}}^{90}(N_{c,1}) = \delta_{\text{к}}(N_{c,1}) + 1,271 \cdot (0,082 \cdot \ln(n \Delta t) + 0,923) \delta_{\text{к}}(N_{c,1});$$

$$\delta_{\text{дл}}^{90}(N_{c,2}) = \delta_{\text{к}}(N_{c,2}) + 1,271 \cdot (0,082 \cdot \ln[(n - 1)\Delta t] + 0,923) \delta_{\text{к}}(N_{c,2});$$

.....

$$\delta_{\text{дл}}^{90}(N_{c,n}) = \delta_{\text{к}}(N_{c,n}) + 1,271 \cdot (0,082 \cdot \ln(\Delta t) + 0,923) \delta_{\text{к}}(N_{c,n}).$$

Полную длительную деформацию от действия N_c за время τ можно представить, как сумму длительных деформаций $\delta_{\text{дл}}(N_{c,i})$:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{дл}}^0(N_c) &= \sum_{i=1}^n \delta_{\text{дл}}^0(N_{c,i}) = \\ &= \delta_{\text{дл}}^0(N_{c,0}) + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{\text{дл}}^0(N_{c,0})}{n} \cdot 1,271 \cdot (0,105 \cdot \ln(\Delta t) + 0,048) = \\ &= \delta_{\text{дл}}^0(N_{c,0}) \cdot \left[1 + \frac{1}{n} \cdot 1,271 \cdot (0,105 \cdot \ln(\Delta t) + 0,048) \sum_{i=1}^n i \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_{\partial t}^{90}(N_c) &= \sum_{i=1}^n \delta_{\partial t}^{90}(N_{c,i}) = \\ &= \delta_{\partial t}^{90}(N_{c,0}) + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{\partial t}^{90}(N_{c,0})}{n} \cdot 3,124 \cdot (0,082 \cdot \ln(\Delta t) + 0,923) = \\ &= \delta_{\partial t}^{90}(N_{c,0}) \cdot \left[1 + \frac{1}{n} \cdot 3,124 \cdot (0,082 \cdot \ln(\Delta t) + 0,923) \sum_{i=1}^n i \right].\end{aligned}$$

В случае косоугольного изгиба результирующие длительные деформации от N_{Π} и N_c могут находиться по формуле:

$$\delta_{\partial t}^{\alpha} = \sqrt{(\delta_{\partial t}^0)^2 + (\delta_{\partial t}^{90})^2}.$$

Выводы

Пластическая деформируемость соединений с когтевыми шайбами (благодаря изгибу когтей), а также возможная недостаточность требований к длительной жесткости конструкций с такими соединителями приводит к нарастанию перемещений элементов соединений во времени, и, как следствие, возникает деформация всей конструкции.

Предлагаемая методика расчета позволит решить вопрос определения деформированного состояния когтей шайбы при действии изменяющихся нагрузок, увеличит точность выполняемых расчетов с учетом индивидуальных, не усредненных, параметров загрузки.

Качественная оценка деформативности соединений такого вида при проектировании позволит исключить непредвиденный преждевременный отказ конструкции по критерию жесткости.

Литература

1. McGavin R. L. et al. A comparative study on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) produced from blending various wood veneers // BioResources. 2019. Т. 14. №4. С. 9064-9081.

2. Jucienė M., Dobilaitė V., Albrektas D. An Investigation of the Impact of Water on Certain of the Mechanical and Physical Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) as Used in Construction // Applied Sciences. 2023. V. 13. №2. С. 925.

3. Данилов Е.В. Исследование кратковременной прочности LVL при смятии треугольным штампом // Вестник гражданских инженеров. 2014. №1(42). С. 28-33.

4. Данилов Е.В., Исупова Т.А. Исследование линейной жесткости в соединении LVL с когтевыми шайбами // Вестник гражданских инженеров. 2021. №4(87). С. 54-59.

5. Глухих В.Н., Черных А.Г., Данилов Е.В. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. 284 с.

6. Абзалов А.Р., Волкова И.И. Технологические методы обеспечения усталостной прочности упругих элементов // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2351.

7. Языев Б.М., Смирнов И.И., Захарова К.В. Методика расчета силовой характеристики ленточного упругопластического элемента // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2140.

8. Шапошников В.Н. Особенности работы многонагельных соединений элементов деревянных конструкций и теория их расчета при действии кратковременных, длительных и повторных нагрузок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Новосибирск, 1983. 20 с.

9. Шешукова Н.В., Михайлов Б.К. Длительная прочность и деформативность деревянных конструкций на нагельных соединениях. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2006. 169 с.

10. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
11. Ермолаев В.В. Влияние влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений строительных конструкций на МЗП: автореф. дис. ... канд. техн. наук: Казань, 2009. 20 с.
12. Быковский В.Н. Сопротивление материалов во времени с учетом статистических факторов. М.: Стройиздат, 1958. 149 с.
13. Цапаев В.А. Неразрушающий метод определения модуля упругости древесины хвойных пород при изгибе // Деревообрабатывающая промышленность. 2003. №6. С. 10-11.

References

1. McGavin R. L. et al. BioResources. 2019. V. 14. №4. Pp. 9064-9081.
2. Jucienė M., Dobilaitė V., Albrektas D. Applied Sciences. 2023. V. 13. №2. Pp. 925.
3. Danilov E.V. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2014. №1(42). Pp. 28-33.
4. Danilov E.V., Isupova T.A. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2021. №4(87). Pp. 54-59.
5. Glukhikh V.N., Chernykh A.G., Danilov E.V. Derevyannye konstruktsii s primeneniem kogtevykh shayb i uchetom nachal'nykh napryazheniy drevesiny [Wooden structures with the use of claw washers and taking into account the initial stresses of wood]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2018. 284 p.
6. Abzalov A.R., Volkova I.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2351.
7. Yaziev B.M., Smirnov I.I., Zakharova K.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2140.
8. Shaposhnikov V.N. Osobennosti raboty mnogonagel'nykh soedineniy elementov derevyannykh konstruktsiy i teoriya ikh rascheta pri deystvii



kratkovremennykh, dlitel'nykh i povtornykh nagruzok [Features of the work of multigelic joints of elements of wooden structures and the theory of their calculation under the action of short-term, long-term and repeated loads]: Ph.D. Thesis: 05.23.01. Novosibirsk, 1983. 20 p.

9. Sheshukova N.V., Mikhailov B.K. Dlitel'naya prochnost' i deformativnost' derevyannykh konstrukcij na nagel'nyh soedineniyah [Long-term strength and deformability of wooden structures on nagel joints]. Saint Petersburg: SPbGASU, 2006. 169 p.

10. Rabotnov Yu.N. Polzuchest' elementov konstruktsii [Creep of structural elements]. M.: Nauka, 1966. 752 p.

11. Ermolaev, V. V. Vliyanie vlazhnosti drevesiny na dlitel'nyuyu prochnost' i polzuchest' soedineniy stroitel'nykh konstruktsiy na MZP [The influence of wood moisture on the long-term strength and creep of joints of building structures on the MZP]: Ph.D. Thesis in Eng.: Kazan, 2009. 20 p.

12. Bykovsky V.N. Soprotivlenie materialov vo vremeni s uchetom statisticheskikh faktorov [Resistance of materials in time taking into account statistical factors]. M.: Stroyizdat, 1958. 149 p.

13. Tsepaev V.A. Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost. 2003. №6. Pp. 10-11.