

Строительные конструкции, здания и сооружения

Научная статья

УДК 624.011.14

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/112-120>

Д.А. Животов, Ю.И. Тилинин, Ю.В. Пищалов

ЖИВОТОВ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ – к.т.н, доцент, d.zhivotov@mail.ru<https://orcid.org/0000-0002-8868-2944>ТИЛИНИН ЮРИЙ ИВАНОВИЧ – к.т.н., доцент, tilsp@inbox.ru<https://orcid.org/0000-0002-8795-9999>*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*ПИЩАЛОВ ЮРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – к.т.н., старший преподаватель, 303arzamas@mail.ru,<https://orcid.org/0009-0008-4015-4035>*Военный институт (инженерно-технический) Военной академии**материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева*

Санкт-Петербург, Россия

Совершенствование конструкции стропильных систем реконструируемых исторических зданий

Аннотация. Конструкционным материалом для стропильных систем исторических зданий во времена их строительства служило бревно или брус, выпиливаемый из бревна. При современной реконструкции исторических зданий для устройства новых стропильных систем часто применяют сосновую доску, из которой собирают стропила. Предлагается при реконструкции исторических зданий заменять в деревянных стропильных системах бревна и цельный брус на клееный брус из однонаправленного шпона, который принято называть брус LVL. С этой целью была построена из бруса LVL, а затем испытана в лаборатории модель плоской фермы. Наши исследования основывались на строительной механике и науке о древесине. В ходе исследования использовались аналитические, экспериментальные и статистические методы обработки результатов испытаний. Цель экспериментов заключается в изучении влияния потери устойчивости элементов фермы из ее плоскости на работу всей конструкции, а также исследование влияния типа связи на несущую способность узлов соединения элементов фермы. В результате получены новые значения коэффициента податливости узлов и стыков элементов из бруса LVL, которые позволяют быстро определять требуемые сечения элементов несущих стержней в плоских фермах. Плоские стропильные фермы, изготовленные в заводских условиях из бруса LVL, применены на практике при устройстве стропильной системы реконструируемого исторического здания Военно-медицинской академии в Санкт-Петербурге.

Ключевые слова: реконструкция, историческое здание, стропильная система, клееный брус, однонаправленный шпон, деревянная ферма, лабораторные испытания, диаграмма, прогиб, напряжение, соединение деревянных деталей, нагель, накладка, прочность узлов

Для цитирования: Животов Д.А., Тилинин Ю.И., Пищалов Ю.В. Совершенствование конструкции стропильных систем реконструируемых исторических зданий // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 4(57). С. 112–120.

Введение

Стропила в исторических зданиях Санкт-Петербурга, созданные преимущественно в XVIII–XIX вв. [1, 5], изготовлены из сосновых бревен. В то время сосновые бревна были основным материалом для создания стропильных систем скатных чердачных крыш.

Проблема, которая возникает при восстановлении таких зданий, заключается в том, что часто необходимо заменить старый брус, который был получен путем обработки соснового

бревна. В современных условиях ремонта и реконструкции стропильных систем исторических зданий возникают трудности из-за недостатка бревен нужных размеров и необходимого качества, что снижает эффективность использования цельной древесины в строительстве.



Рис. 1. Соединение скобами бревен стропильной системы исторического здания в Санкт-Петербурге. Фото Ю.И. Тилинина, 2020 г.

В современной практике восстановления стропильных систем исторических зданий нередко используются собираемые из сосновых досок стропила (рис. 2), которые, хотя и обладают внешним качеством, но все же не соответствуют требованиям по сохранению ценности исторических зданий в долгосрочной перспективе [8].



Рис. 2. Стропила из сосновых досок выполнены при реконструкции исторического здания в Санкт-Петербурге. Фото Д.А. Животова, 2020 г.

На рис. 3 показан деревянный брус, изготовленный из однонаправленного клееного шпона, так называемый брус LVL. По мнению авторов, брус LVL более, чем сосновая доска, пригоден для изготовления стропильных систем исторических зданий.



Рис. 3. Клееный из однонаправленного шпона брус LVL

Источник: <https://brus777.ru/product/lvl-brus-75h200mm/> (дата обращения: 29.07.2023)

Преимущество LVL бруска заключается в типизации и стандартизации размеров и прочностных характеристик, что важно в серийном производстве деревянных стропильных ферм.

Материалы и методы

Основу исследований деревянных стропильных систем составляют основные принципы науки о древесине, используемой в качестве конструкционного материала, полученного из стволов деревьев путем их распиливания [6, 7, 9, 10]. В данном исследовании были использованы аналитические, экспериментальные и статистические методы для анализа результатов испытаний [6, 9], проведенных в лабораторных условиях с целью проверки прочности новых соединений клееных элементов плоских ферм, изготовленных из однонаправленного шпона.

Для исследования данной гипотезы предлагается заменить сосновые бревна на брус LVL с использованием нагельного соединения в узлах, показанных на рис. 4.

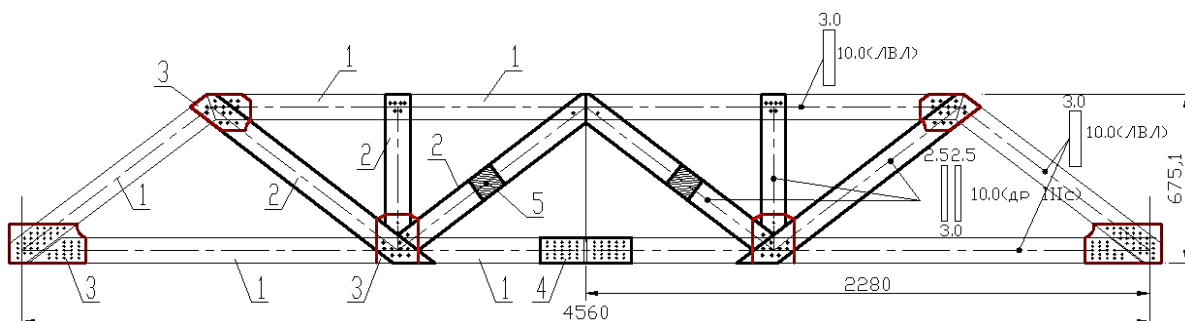
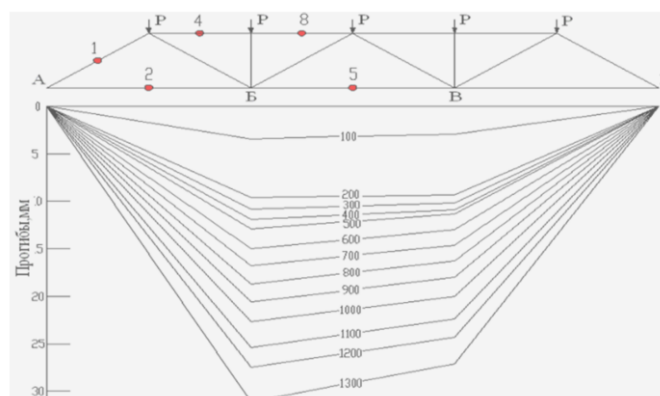


Рис. 4. Опытный образец фермы с нагельным соединением:

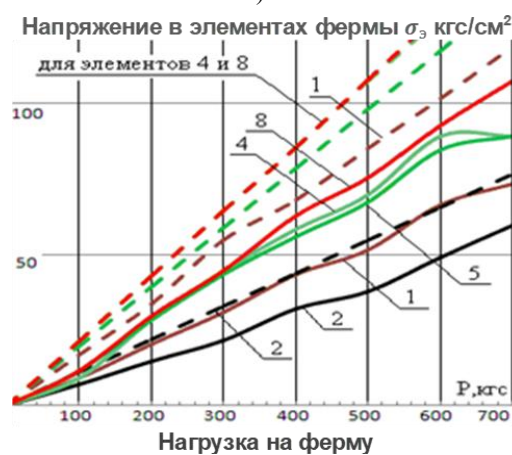
**1 – LVL 30 × 100; 2 – доска 25 × 100; 3 – накладки древесно-стружечные, ДСП-В;
4 – накладки из LVL; 5 – прокладки из доски**

Ферма с нагельным соединением элементов была подвергнута на испытательном стенде кратковременной нагрузке в узлах; каждый этап испытания производился в течение 15 минут, при этом поэтапное увеличение нагрузки составляло 0,1 от расчетного значения. Цель

экспериментов заключалась в изучении влияния потери устойчивости элементов фермы из ее плоскости на работу всей конструкции, а также в исследовании несущей способности узлов и соединяющих элементов фермы. По результатам эксперимента построены графики прогибов и напряжений в элементах испытываемой фермы (рис. 5).



а)



б)

Рис. 5. Результаты испытаний фермы:
а – график прогибов фермы при возрастании нагрузки;
б – график возрастания напряжения, кг/см², в элементах испытываемой фермы, отмеченных цифрами на рис. 5а, 1, 4, 8 – элементы верхнего пояса фермы из LVL 30 × 100; 2, 5 – элементы нижнего пояса фермы из LVL 30 × 100

Данные, полученные в ходе испытания фермы, подтверждают рациональность использования LVL бруса для изготовления элементов деревянной фермы, которые соединяются между собой с помощью накладок и самонарезающих нагелей.

Сначала были проведены опыты с целью вычисления коэффициента учета связей (K_c) для накладок, изготовленных из ДСП-В и стальных накладок.

Для узлов с большим количеством нагелей и накладками применяется коэффициент учета связей (K_c), вязкость соединений бруса LVL и накладок ДСП-В обеспечивается тягучей работой гнезд на смятие [2, 10].

Для изучения сопротивления выдергиванию нагелей, используемых при соединении элементов фермы из бруса LVL с использованием двусторонних накладок, проводится исследование, учитывающее следующие параметры накладок:

- n – число отверстий в накладке;
- b – ширина накладки;
- t – толщина накладки.

Напряжения в накладке от растяжения (1):

$$\sigma_N = \frac{N}{2 \cdot A} = \frac{N}{2 \cdot (b-d) \cdot t} \tag{1}$$

Изгибающий момент в накладке при числе связей $n = 3$:

$$M_{изг} = \frac{N \cdot e}{2} = \frac{N \cdot t}{4 \cdot n} \quad (2)$$

Напряжение в накладке от её изгиба (3):

$$\sigma_M = \frac{M}{W_{накл}} = \frac{6N}{4 \cdot n \cdot b \cdot t} \quad (3)$$

Суммарное напряжение в накладке (4):

$$\sigma_{сум} = \frac{\sigma_N}{R_p} + \frac{\sigma_M}{R_{II}} \leq 1 \text{ or } \sigma_{TOT} = \sigma_N + \sigma_M \frac{R_{накл P}}{R_{накл II}} \leq R_p \quad (4)$$

$$\sigma_{сум} = \frac{\sigma_N^{накл}}{R_p^{накл}} * \left(1 + \frac{3 * R_p^{накл}}{n * R_{II}^{накл}} \right) = \frac{N}{2(b-d_{CB}) * t * R_p^{накл}} * \left(1 + \frac{3 * R_p^{накл}}{n * R_{II}^{накл}} \right) = \frac{N}{2(b-d_{CB}) * t * R_p^{накл} * m_o * K_c},$$

где $K_c = \frac{1}{\left(1 + \frac{3 * R_p^{накл}}{n * R_{II}^{накл}} \right)}$,

m_o – коэффициент, учитывающий эффект концентрации напряжений для ДСП-В, $m_o = 0.9$ в случае со сталью пренебрегают.

$\frac{R_p^{накл}}{R_{II}^{накл}}$ Учитывает роль влияния свойств древесного материала и длительное влияние на показатели нагрузки и свойств материала.

Проверка предельного состояния накладок (5):

$$\frac{\sigma_p^{накл}}{K_c * R_p^{накл}} \leq 1 \quad (5)$$

Данная формула дает возможность определить значения коэффициента учета работы связи (K_c) для накладок, изготовленных из ДСП-В (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициент учета работы податливости связи для накладок из ДСП-В

n	1	2	3	4	6	8	10	20
K_c	0,498	0,665	0,749	0,799	0,856	0,888	0,908	0,952

Ниже указаны значения коэффициента (K_c), который учитывает поведение соединений для стальных пластин, включая пластины с пределом текучести σ_T выше 38,0 кН/см² (табл. 2) и пластин с пределом текучести, не превышающим данный показатель $\sigma_T < 38,0$ кН/см² (табл. 3).

Таблица 2

Коэффициент учета работы податливости связей для накладок из сталей высокой прочности

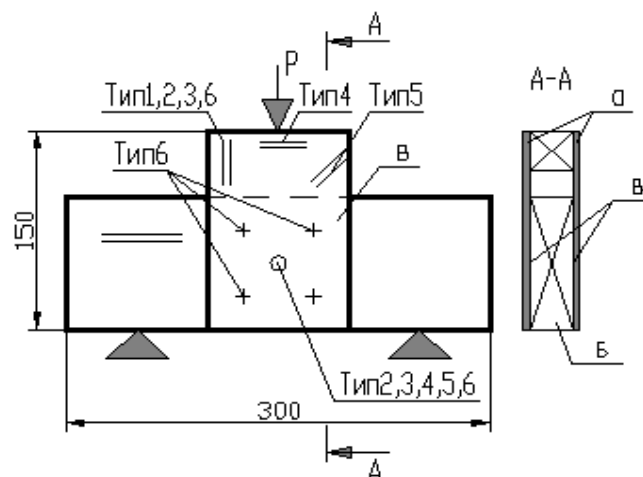
n	1	2	3	4	6	8	10	20
K_c	0,268	0,423	0,524	0,595	0,688	0,746	0,786	0,880

Таблица 3

Коэффициент учета работы податливости связей для накладок из сталей нормальной прочности

n	1	2	3	4	6	8	10	20
K_c	0,259	0,412	0,512	0,583	0,677	0,737	0,778	0,875

Данные таблиц 1–3 авторы полагают вносить в нормативные документы, касающиеся проектирования деревянных плоских ферм. Кроме того, различные варианты узловых соединений испытывали по приведенной ниже схеме (рис. 6).



**Рис. 6. Схема сопряжения под углом 90°:
а – ДСП-В; б – брус LVL; в – клей; = направление волокон**

Мы также стремились исследовать несущую способность следующих типов соединенных элементов фермы:

- тип 1 – с клеем Casco S9 Super (AkzoNobel) по всей пластине, $S = 10 \text{ см}^2$. Расположение бруса LVL – поперек волокон (горизонтальное), накладок ДСП-В – вдоль волокон (вертикальное);
- тип 2 – глухарь $d = 1,2 \text{ см}$. Расположение бруса LVL – поперек волокон (горизонтальное), накладок (ДСП-В) – вдоль волокон (вертикальное);
- тип 3 – с клеем + глухарь $d = 1,2 \text{ см}$. Расположение бруса LVL – поперек волокон (горизонтальное), накладок (ДСП-В) – вдоль волокон (вертикальное);
- тип 4 – с клеем + глухарь $d = 1,2 \text{ см}$. Расположение бруса LVL – поперек волокон (горизонтальное), накладок ДСП-В – поперек волокон (вертикальное);
- тип 5 – с клеем + глухарь $d = 1,2 \text{ см}$. Расположение бруса LVL – поперек волокон (горизонтальное), накладок ДСП-В – под углом 45° к волокнам (вертикальное).

На основе испытаний получены данные о предельной нагрузке рассмотренных типов соединений элементов фермы:

1. При сопоставлении типов 1, 2 и 3 предельная нагрузка имеет следующее значение:
 - с клеем – 701 кгс;
 - с глухарями $d = 1,2 \text{ см}$ – 1396 кгс;
 - с клеем + стяжные винты $d = 1,2 \text{ см}$ – 1882 кгс.

2. При анализе типов соединений 3, 4 и 5 нагрузка, вызывающая разрушение, варьирует в зависимости от ориентации волокон в накладках:

- тип 3 – выдерживает нагрузку до 1882 кгс;
- тип 4 – выдерживает нагрузку до 1687 кгс;
- тип 5 – выдерживает нагрузку до 1528 кгс.

На основе выполненного исследования можно сделать вывод, что направление волокон в накладках ДСП-В оказывает влияние на способность соединения поддерживать нагрузку и соответствует прочностным характеристикам материала.

Результаты

Данные, полученные в ходе испытания фермы, подтверждают рациональность использования LVL бруса для изготовления элементов деревянной фермы, которые соединяются между собой с помощью накладок и самонарезающих нагелей. На основе испытаний вычислены коэффициента учета связей (K_c) для накладок, изготовленных из ДСП-В и стальных накладок, которые используются авторами при проектировании ферм и предлагаются для включения в нормативную литературу. Также на основе испытаний узлов фермы получены

данные о предельной нагрузке рассмотренных пяти типов соединений элементов фермы из бруса LVL.

Обсуждение результатов

Полученные результаты испытаний плоских ферм и соединений элементов ферм, изготовленных из бруса LVL могут быть использованы при проектировании стропильных систем реконструируемых исторических зданий, что подтверждает опыт применения ферм из LVL при реконструкции одного из исторических зданий Военно-медицинской академии (рис. 7) .



Рис. 7. Реконструкция стропильной системы корпуса Военно-медицинской академии после пожара (г. Санкт-Петербург, ул. Лебедева, 4). Фермы из LVL бруса
Источник: https://lvibrus.ru/fotogallereya/rekonstrukciya_krovli_vma/ (дата обращения: 29.07.2023)

Заключение

Таким образом, усовершенствованная стропильная ферма с нагельным соединением элементов из бруса LVL была подвергнута на испытательном стенде кратковременной нагрузке в узлах, а также испытаны узловые соединения различных типов. Вычислены коэффициенты учета связей и предельная нагрузка для пяти типов соединений, которые авторы предлагают использовать при проектировании плоской фермы из бруса LVL. Полученные данные позволяют быстро определять требуемые сечения элементов несущих стержней в плоских фермах и проектировать узлы и стыки. Плоские фермы из LVL применены на практике в покрытии стропильных систем реконструируемых исторических зданий. В дальнейшем планируется исследовать несущую способность соединения элементов фермы в зависимости от расположения нагелей.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Возняк Е.Р., Головина С.Г., Пухаренко Ю.В. Трансформация исторических зданий в Санкт-Петербурге и сохранение архитектурных и конструктивных элементов различных периодов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5(82). С. 5–11. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-5-5-11>

2. Дежин М.А., Ибрагимов А.М. Экспериментальная оценка особенностей работы соединений деревянных элементов на металлических накладках // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: сборник докладов Третьей национальной научной конференции, 2022 г. Москва, 2023. С. 55–58. EDN: MEYRRM
3. Животов Д.А., Тилинин Ю.И. Возведение геодезических куполов из древесины и пластика // Инновации в деревянном строительстве: материалы 11-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 262–268. EDN: WIELSM
4. Животов Д.А., Тилинин Ю.И. Технология возведения деревянного геодезического купола с учетом результатов эксперимента // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2020. № S10(11). С. 27–36. EDN: YDVCXU
5. Черных А.Г., Головина С.Г., Клеван В.И. Проблемы ограниченного применения металлодеревянных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 83–89. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-83-89>
6. Черных А. Г., Чан Куок Фонг. Анализ несущей способности соединения с применением самонарезающих нагелей в различных моделях пластического разрушения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4(81). С. 89–99. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-89-99>
7. Cabrero J., Yurrita M. Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners. *Engineering Structures*. 2018;171:895–910.
8. Chernykh A., Kazakevich T., Kiryutina S. [et al.] Qualification tests of adhesive systems, the assessment of the durability of glued wooden structures. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;896(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012036>
9. Chernykh A., Mironova S., Danilov E., Mamedov S., Kazakevich T., Koval P. Determination of deformability of LVL structures with toothed plates connectors. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;182:75-83. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_6
10. Ottenhaus L.M., Li M., Smith T., Quenneville P. Mode Cross-Over and Ductility of Dowelled LVL and CLT Connections under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2018;144(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002074](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002074)

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 4/57

Building structures, buildings and structureswww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/112-120>

Zhivotov D., Tilinin Yu., Pishchalov Yu.

DMITRY A. ZHIVOTOV, Candidate Engineering Sciences, Associate Professor, d.zhivotov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8868-2944>YURI I. TILININ, Candidate Engineering Sciences, Associate Professor, tilsp@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8795-9999>*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*YURIY V. PISCHALOV, Candidate Engineering Sciences, Senior Lecturer, 303arzamas@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4015-4035>*Military Engineering Institute of the Military Logistics Academy*
Saint Petersburg, Russia

Improving the design of truss systems of reconstructed historical buildings

Abstract. The structural part of the rafter systems of historical buildings at the time of their construction was a log or beam cut from a log. In modern renovations of historic buildings, the pine planks from which the rafters are assembled are often taken into account for the construction of new rafter systems. When reconstructing historical buildings, it is proposed to replace wooden rafter middle logs and solid timber with laminated veneer lumber, which is commonly called LVL timber. To do this, a model of a flat truss was built from LVL timber and then tested in the laboratory. Our research was based on structural mechanics and wood science. During the

study, analytical, experimental and statistical methods for processing test results were used. The purpose of the experiments is to study the effect of buckling of truss elements from its plane on the operation of the entire structure, as well as to study the influence of the type of connection on the load-bearing capacity of truss nodes. As a result, new values of the compliance coefficient of nodes and connections of elements made of LVL timber were obtained, which make it possible to quickly determine the required sections of elements of load-bearing rods in flat trusses. Trusses, factory-made from LVL timber, were used in practice in the construction of the rafter system of the reconstructed historical building of the Military Medical Academy in St. Petersburg.

Keywords: reconstruction, historical building, rafter system, glued laminated timber, unidirectional veneer, wooden truss, laboratory tests, diagram, deflection, stress, connection of wooden parts, dowel, overlay, knot strength

For citation: Zhivotov D., Tilinin Yu., Pishchalov Yu. Improving the design of truss systems of reconstructed historical buildings. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(4):00–00. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Vozniak E.R., Golovina S.G., Puharenko Yu.V. Transformation of historical buildings in St. Petersburg and the preservation of architectural and structural elements of various periods. *Bulletin of civil engineers*. 2020;(5):5–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-5-5-11>
2. Dezhin M.A., Ibragimov A.M. Experimental evaluation of the features of the work of the connections of wooden elements on metal plates. *Actual problems of the construction industry and education. Collection of reports of the Third National Scientific Conference, 2022*. Moscow, 2023. P. 55–58. (In Russ.).
3. Zhivotov D.A., Tilinin Yu.I. Construction of geodesic domes from wood and plastic. *Innovations in wooden construction. Materials of the 11th International Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg, 2021. P. 262–268.
4. Zhivotov D.A., Tilinin Yu.I. The technology of construction of a wooden geodesic dome, taking into account the results of the experiment. *Actual problems of military scientific research*. 2020;(S10):27–36. (In Russ.).
5. Chernykh A.G., Golovina S.G., Klevan V.I. Problems of the limited use of metal-wooden structures. *Bulletin of civil engineers*. 2020;(6):83–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-83-89>
6. Chernykh A.G., Chan Quoc Fong. Analysis of the bearing capacity of a joint using self-tapping dowels in various models of plastic fracture. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2020;(4):89–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-89-99>
7. Cabrero J., Yurrita M. Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners. *Engineering Structures*. 2018;171:895–910.
8. Chernykh A., Kazakevich T., Kiryutina S. [et al.] Qualification tests of adhesive systems, the assessment of the durability of glued wooden structures. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;896(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012036>
9. Chernykh A., Mironova S., Danilov E., Mamedov S., Kazakevich T., Koval P. Determination of deformability of LVL structures with toothed plates connectors. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;182:75–83. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_6
10. Ottenhaus L.M., Li M., Smith T., Quenneville P. Mode Cross-Over and Ductility of Dowelled LVL and CLT Connections under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2018;144(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002074](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002074)