

УДК 624.011

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-98-107

Е.А. ЧАЙКИН, С.В. ДЕОРДИЕВ,  
Сибирский федеральный университет

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ И РАСТЯЖЕНИЕ ДЕРЕВЯННОГО ЭЛЕМЕНТА С ВКЛЕЕННЫМИ СТАЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

**Аннотация.** Применение классических элементов структурных конструкций в полно-сборных зданиях замкнутого типа неэффективно по причине сложности их конструкции и металлоемкости узлов. В статье рассмотрены прочность, устойчивость и деформативность деревянного элемента с клееными металлическими пластинами, работающего в составе структурной многосвязной конструкции при действии сжимающих и растягивающих усилий на элемент.

В серии экспериментов установлены предельные нагрузки, вызывающие потерю устойчивости и разрушение опытных образцов, а также деформации древесины и металла исследуемых элементов.

В результате испытаний получены зависимости несущей способности элементов от характера загрузки, толщины и глубины клейки стальной пластины, а также аналитическая зависимость деформаций растяжения и сжатия элементов конструкции от усилий, которая может быть применена в расчетах по деформированной схеме и моделировании податливости соединений структурной многосвязной конструкции.

**Ключевые слова:** клеенные пластины, структурная конструкция, древесина, сжатие, растяжение, испытания, потеря устойчивости, использование отходов производства

**Для цитирования:** Чайкин Е.А., Деордиев С.В. Результаты испытаний на сжатие и растяжение деревянного элемента с клееными стальными пластинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 98–107.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-98-107

Е.А. CHAIKIN, S.V. DEORDIEV,  
Siberian Federal University

## COMPRESSION AND TENSION TESTS OF WOODEN ELEMENTS WITH GLUED STEEL PLATES

**Abstract.** The use of classical elements in spatial structures of prefabricated buildings is inefficient due to a design complexity and specific quantity of metal in the assembled components. The paper studies the durability, stability and deformability of wooden elements with glued metal plates working in a multiply connected structure under compressive and tensile loads. The experiment series include maximum loads causing the loss of stability and destruction of prototypes as well as deformation of wooden and metal elements. As a result, the dependences are suggested for the carrying capacity of elements on the load type, thickness and depth of the glued steel plate, and the dependence of tension and compression of elements on the efforts. The latter can be applied in calculations under the strain scheme and modeling of the joint compliance of the multiply connected structure.

**Keywords:** glued plates, structural design, wood, compression, tension, tests, stability loss, production waste

**For citation:** Chaikin E.A., Deordiev S.V. Rezul'taty ispytaniy na szhatie i rastyazhenie derevyannogo elementa s vkleenymi stal'nymi plastinami [Compression and tension tests of wooden elements with glued steel plates]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 98–107.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-98-107

Для пространственных структурных конструкций, в узлах которых могут сопрягаться до 12 деревянных элементов, испытывающих за жизненный цикл знакопеременные усилия сжатия и растяжения, принципиально важным фактором при конструировании является уменьшение числа концентраторов напряжений на границе дерево – металл, а также в местах непосредственного соединения стержневых элементов в узлах. В отмеченных выше традиционных соединениях неизбежно возникает концентрация напряжений, которая приводит на начальных этапах к деформациям сдвига и смятия по дереву в наиболее нагруженных стержнях, а затем – к невыгодному перераспределению усилий и дальнейшей деформации конструкции в целом.

С целью применения деревянных элементов круглого сечения, в том числе из отходов деревообрабатывающей промышленности, в качестве стержней пространственной структурной конструкции наиболее часто используются металлические узлы и коннекторы [1, 2]. Наилучшим образом зарекомендовало себя применение в таких узлах цилиндрических и пластинчатых нагелей, а также вклеенных стальных стержней [3–5].

Сопряжение деревянных элементов с помощью вклеенных стержней позволяет снизить концентрацию напряжений, но имеет трудности реализации в рассматриваемой конструкции (рис. 1). Так по результатам расчета, согласно СП 64.13330.2017, требуемая длина для вклеивания стержня необходимого диаметра с двух торцов превышает длину деревянного стержня, а значит, использовать данный вид соединения элемента не представляется возможным. Увеличить количество стержней не позволяет относительно небольшой диаметр деревянного стержня, а увеличение длины элементов нецелесообразно в данной конструкции при модуле 0,75 м.

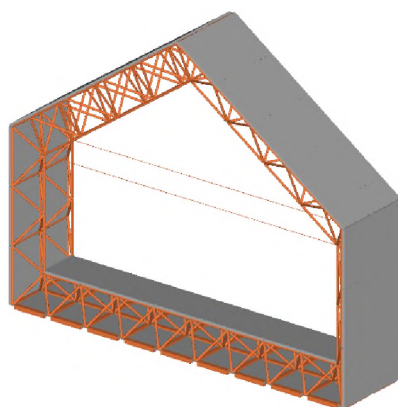


Рис. 1. Конструктивная схема блока здания замкнутого типа

Работы [11–13], выполненные в Оренбурге В.И. Жадановым и И.В. Рудневым, посвящены изучению прочности соединения деревянных элементов на стальных пластинах. Авторы указывают на зависимость прочности соединения от площади контакта металл-клей-древесина, формы стальной пластины, толщины клеевого соединения. С целью апробации результатов, полученных коллегами в работах [11,13], и оптимизации узла структурной конструкции проведена серия натурных испытаний деревянного элемента с вклеенными стальными пластинами на специально смонтированной установке на базе лаборатории ЛИСМиК СФУ.

### Методика эксперимента

Эксперимент проводился с образцами, выполненными из крупномерных отходов фанерного производства (далее «карандаш»), используемыми в качестве стержней пространственной структурной конструкции. Образцы представляют собой деревянные стержни с вклеенными в торцах по центру сечения стальными пластинами (рис. 2) с различной глубиной вклейки – от 8 до 20 см. При этом в начале эксперимента толщина стальной пластины принималась в широком диапазоне от 2 до 5 мм с шагом 1 мм, но далее результаты показали, что использование стали толщиной более 3 мм нецелесообразно и ведет только к увеличению металлоемкости конструкции узла. Основные эксперименты проводились с пластинами толщиной 2 и 3 мм.

В эксперименте каждый образец состоял из «карандаша» круглого сечения диаметром  $80 \pm 2$  мм длиной 1000 мм. Прочностные и деформационные характеристики материала стержня определены по соответствующим методикам нормативных документов экспериментальным путем в лаборатории ЛИСМиК СФУ. В первую очередь был определен модуль упругости как наиболее важная деформативная характеристика элементов, работающих на сжатие и растяжение. Он составил 8600 МПа для образцов из сосны.

В торцах «карандашей» по центру сечения для соединения с испытательной установкой были вклеены разработанные и изготовленные авторами коннекторы. В качестве торцевых коннекторов применялась прямоугольная листовая сталь сечением  $80 \times 3$  мм и  $80 \times 2$  мм с вариацией по длине в зависимости от длины вклейки, марка стали С235. Между собой деревянный стержень и стальные торцевые коннекторы соединялись в торцевом пропиле, сделанном на 2 мм шире толщины пластины, с применением эпоксидного двухкомпонентного клея CYD-128 (международный стандарт Q/SH 1085 007-2006) толщиной 1 мм с обеих сторон стальной пластины. Общий вид наконечника «карандаша» приведен на рис. 2.

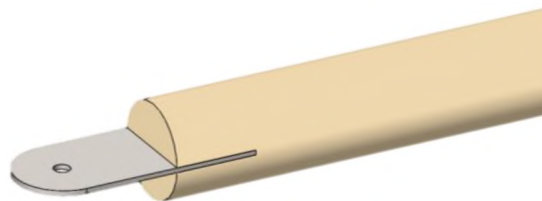


Рис. 2. «Карандаш» с вклеенной стальной пластиной

Испытания выполнены на специально изготовленном испытательном стенде, состоящем из двух продольных швеллеров, трех упорных двутавровых балок с ребрами жесткости, подвижной распределительной траверсы, съёмной распорки и гидравлического домкрата (рис. 3). Крепление образцов осуществляется посредством металлических уголков на болтах.

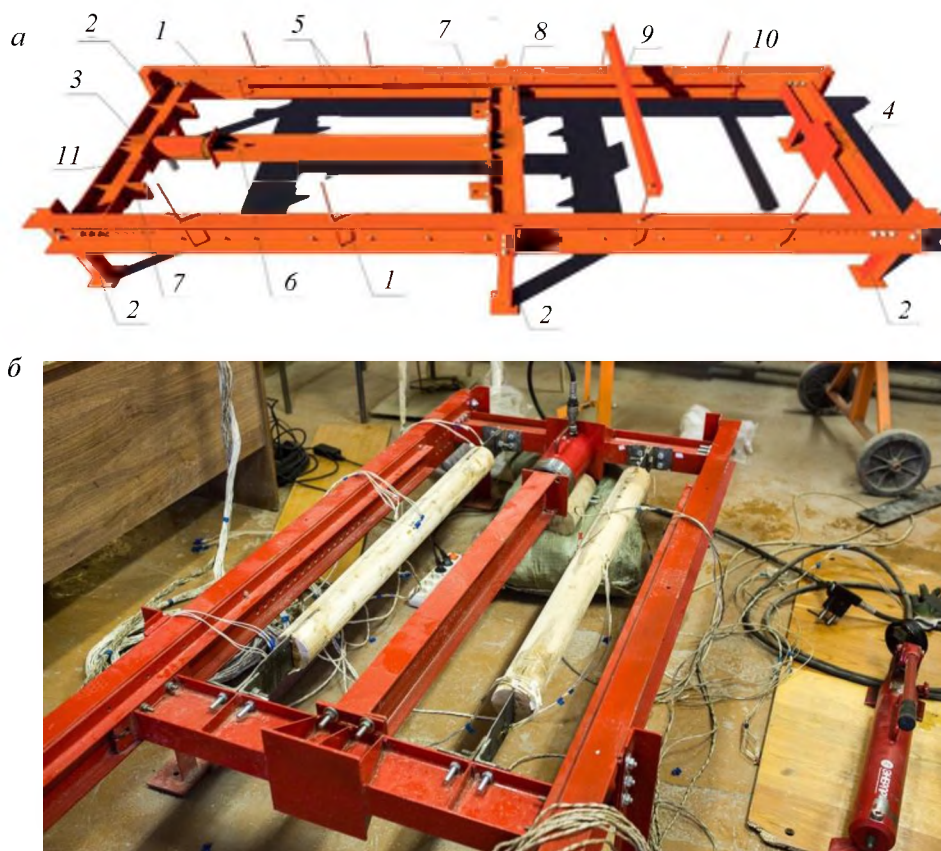


Рис. 3. Модель испытательного стенда (а); внешний вид испытательного стенда (б):  
 1 – направляющие швеллеры (14П); 2 – стойки (L 50×6); 3 – упорная балка № 1 (двутавр № 12); 4 – упорная балка № 2 (двутавр № 12); 5 – направляющие уголки (L 32×4); 6 – распорка (двутавр № 12); 7 – уголки-держатели (L 75×50×5); 8 – подвижная распределительная траверса (двутавр № 12); 9 – страховочный уголок (L 40×4); 10 – ограничитель хода траверсы; 11 – домкрат

Сжатию до потери устойчивости и растяжению до разрушения были подвергнуты по 3 образца с глубиной вклейки пластин 80, 100, 150, 200 мм. Сжимающее и растягивающее усилия создавались ручным гидравлическим домкратом с максимальным развиваемым усилием 200 кН; средняя скорость испытаний – 10 мм/мин. При статическом нагружении для фиксации изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов использовали 3 индикатора часового типа (ИЧ-10) и 5 тензорезисторов марки 5П1-20-100-Б-12 с номинальным сопротивлением 99,651 Ом на каждый элемент. Для

преобразования данных и ведения журнала испытания применяли программный комплекс ММТС 64.01. Усилие, развиваемое гидравлическим домкратом, регистрировали гидравлическим манометром, установленным на домкрате, и сверяли с показаниями комплекса ММТС 64.01.

Чтобы уменьшить деформации податливости болтовых соединений, перед началом поэтапного нагружения образцов производили предварительное нагружение с последующим разгрузением до нагрузки 10 кН и обнулением датчиков деформаций. Таким образом достигали обжатия болтовых соединений в торцах и далее в эксперименте датчиками деформаций регистрировали только деформации элемента.

Результаты испытаний представлены в виде графиков на рис. 4, 5.

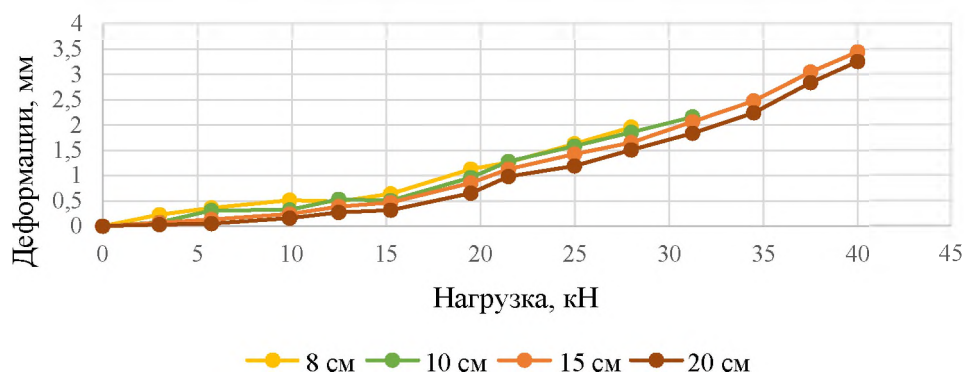


Рис. 4. График зависимости деформаций растяжения элемента от нагрузки при разных глубинах вклейки стальной пластины

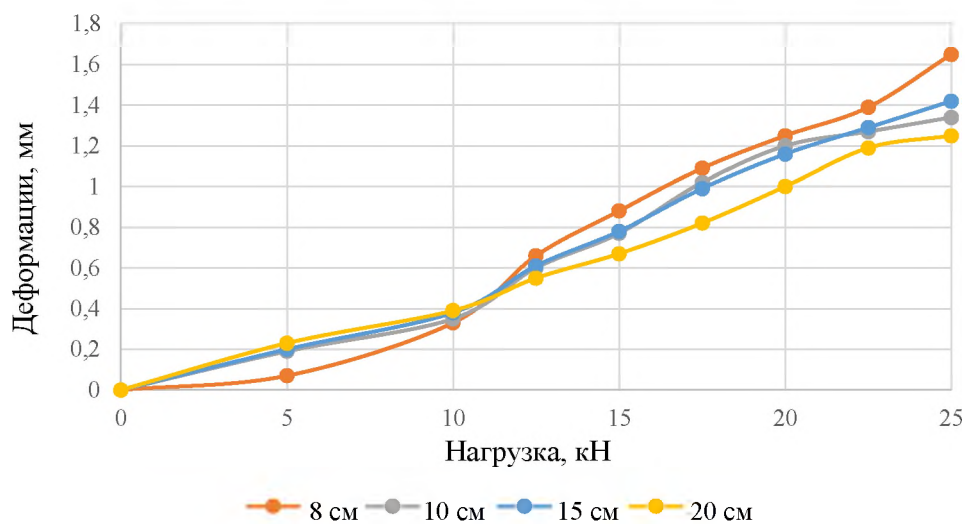


Рис. 5. График зависимости деформаций сжатия элемента от нагрузки при разных глубинах вклейки стальной пластины



При испытании элементов на растяжение прослеживается зависимость деформаций и предельной прочности элементов от глубины клейки пластины, в то время как зависимости от толщины клеиваемой пластины не наблюдается. Разрушения всех элементов происходят по клею и ближайшим к нему слоям древесины. Наблюдается деформирование отверстия в стальной пластине.

При испытании элементов на сжатие разрушение происходит при потере устойчивости стальных пластин на свободном от защемления участке между клейкой в древесину и зажимами испытательного стенда (рис. 6). Зависимости между деформациями, предельными усилиями и глубиной клейки пластин не наблюдается. Устойчивость элемента напрямую зависит только от толщины пластины.



Рис. 6. Формы потери устойчивости стальных пластин при испытании стержневых элементов на сжатие

Далее для анализа результатов испытаний были построены графики зависимости предельных усилий и деформаций от толщины стальных пластин и глубины их клейки (рис. 7, 8).

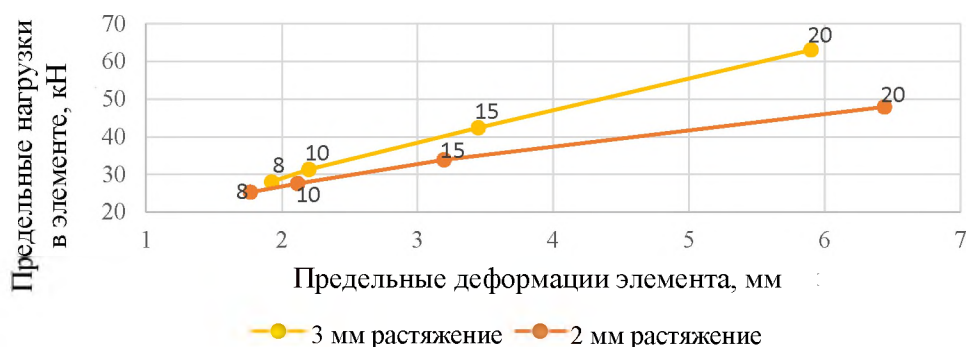


Рис. 7. График зависимости предельных деформаций растяжения элемента от предельных нагрузок при разных глубинах клейки стальной пластины

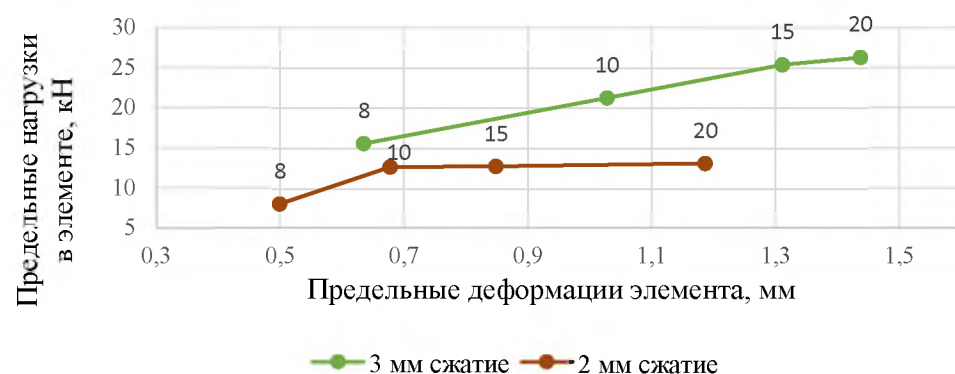


Рис. 8. График зависимости предельных деформаций сжатия элемента от предельных нагрузок при разных глубинах вклейки стальной пластины

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что при растяжении прочность элементов напрямую зависит от глубины вклейки стальных пластин, а деформации в элементах возрастают пропорционально усилиям. При сжатии слабым местом являются стальные пластины, и предел прочности всего элемента повышается с увеличением толщины пластин: так несущая способность пластин толщиной 2 мм исчерпывается при нагрузке примерно в 13 кН, а пластин толщиной 3 мм – при нагрузке более 25 кН.

Для удобства анализа работы элементов при варьируемых глубине вклейки и толщине стальной пластины все полученные результаты приведены на рис. 9.

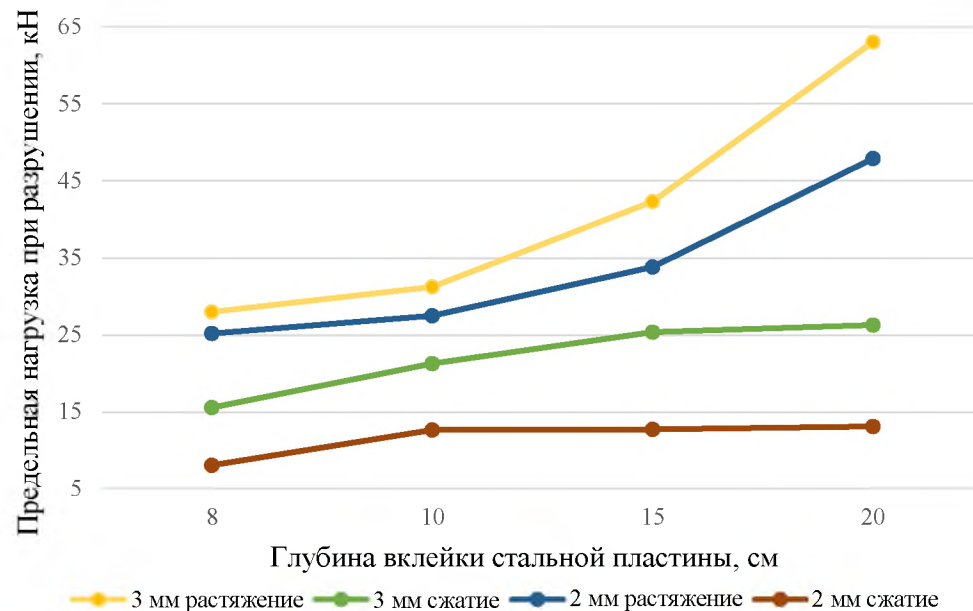


Рис. 9. График зависимости прочности элементов от характера загрузки, толщины и глубины вклейки стальной пластины

Поскольку при глубине вклейки стальных пластин в пределах 10–15 см достигается наибольшее приближение прочности элементов при растяжении и сжатии, в качестве основного варианта для дальнейших исследований прием элементы с глубиной вклейки 15 см. Данное решение позволит достичь наибольшей унификации элементов при конструировании и даст дополнительный запас прочности растянутым элементам.

По результатам анализа зависимостей, установленных в экспериментах, были получены формулы для расчета прогнозируемых деформаций в зависимости от усилия в элементе при глубине вклейки пластины 15 см:

– при сжатии

$$\Delta l_c = 0,014 \cdot N^{1,46};$$

– при растяжении

$$\Delta l_p = 0,005 \cdot N^{1,42},$$

где  $\Delta l_c$  – деформация сжатия элемента длиной 1 м, мм;  $\Delta l_p$  – деформация растяжения элемента длиной 1 м, мм;  $N$  – усилие в элементе, кН.

Этими формулами можно пользоваться для определения деформаций деревянного элемента, например, при расчете прогнозируемых деформаций конструкции, а также при расчете податливости на этапе моделирования для получения более точных расчетов. Данные формулы дают наибольшую точность при усилиях в элементе в пределах 5–30 кН.

С помощью полученных зависимостей можно точнее смоделировать узлы и элементы рассматриваемой конструкции, а также рассчитать влияние податливости элементов с учётом деформации древесины и металла в месте соединения.

### **Выводы**

1. Несущая способность стержневых элементов с клееными в торцах стальными пластинами нелинейно изменяется в зависимости от глубины вклейки пластины при растяжении и не зависит от неё при сжатии элементов. Равнопрочность на растяжение и сжатие (устойчивость) элемента в данной конструкции достигается при глубине вклейки 100–150 мм.

2. Большую глубину вклейки рационально использовать в постоянно растянутых элементах, меньшую – в малонагруженных сжатых элементах и раскосах.

3. Клеевое соединение и стальная пластина являются практически недеформативными в данной конструкции, наибольшие деформации накапливаются в зоне отверстий болтовых соединений и в деревянном стержне.

4. При использовании пластины толщиной 3 мм достигается наибольшее приближение прочности стальных пластин на сжатие и прочности контакта металл-клей-древесина.

В дальнейших исследованиях необходимо установить зависимость прочности деревянного элемента с клееными металлическими пластинами от свободной длины «карандаша» и предусмотреть конструктивные решения для увеличения устойчивости металлических пластин без значительного увеличения металлоемкости узла.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковальчук Л.М. Деревянные конструкции – проблемы и решения // Промышленное и гражданское строительство. 2001. № 10. С. 13–14.
2. Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Деордиев С.В., Захарюта В.В. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 61–70.
3. Царитова Н.Г., Лагутина Д.Р. Анализ существующих узловых соединений пространственных конструкций и разработка шарнирного узла // Современное строительство и архитектура. 2020. № 4 (20). С. 26–30.
4. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). Москва : РИФ «Стройматериалы», 2013. 308 с.
5. Steiger R., Serrano E., Stepinac M., Rajcic V., O'Neill C., McPolin D., Widmann R. Strengthening of timber structures with glued-in rods // Construction and Building Materials. 2015. V. 97. P. 90–105.
6. Руднев И.В., Жаданов В.И., Дмитриев П.А. К вопросу применения клеенных металлических пластин в соединениях деревянных конструкций // Строительная наука-2014: Теория, образование, практика, инновации : сб. трудов Международной научно-технической конференции. Архангельск : ООО «Типография “ТОЧКА”», 2014. С. 309–314.
7. Bradford M.A., Hassanieh A., Valipour H.R., Foster S.J. Sustainable Steel-timber Joints for Framed Structures // Procedia Engineering. 2017. V. 172. P. 2–12.
8. Lokaj A. Round Timber Bolted Joints with Steel Plates under Static and Cyclic Loading // Key Engineering Materials. 2014. V. 627. P. 29–32.
9. Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Деордиев С.В., Захарюта В.В. Полносборное здание замкнутого типа с каркасом из отходов фанерного производства // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 40–50.
10. Васильев В.Н., Безушко А.В. Конструктивные решения узлов сопряжения структурных покрытий для промышленных зданий // Металлические конструкции. 2016. № 4. С. 193–205.
11. Руднев И.В., Жаданов В.И., Лисов С.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 4. С. 5–8.
12. Руднев И.В., Жаданов В.И. Методика расчета соединений элементов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 5. С. 155–161.
13. Пересыткина В.А., Жаданов В.И. Стальные клеенные пластины в узловых соединениях деревянных конструкций // Шаг в науку. 2021. № 1. С. 94–97.

## REFERENCES

1. Koval'chuk L.M. Derevyannyye konstruktzii – problemy i resheniya [Wooden structures: Problems and solutions]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2001. V. 10. Pp. 13–14. (rus)
2. Inzhutov I.S., Dmitriev P.A., Deordiev S.V., Zakharyuta V.V. Analiz sushchestvuyushchikh uzlov sopryazheniya prostranstvennykh konstruktсий i razrabotka sborno-razbornoego uzlovogo elementa [Analysis of assembled components of structures and development of nonassembled component]. *Vestnik MGSU*. 2013. No. 3. Pp. 61–71. (rus)
3. Tsaritova N.G., Lagutina D.R. Analiz sushchestvuyushchikh uzlovykh soyedineniy prostranstvennykh konstruktсий i razrabotka shamirnogo uzla [Analysis of assembled components of structures and development of pin-connected joint]. *Sovremennoye stroitel'stvo i arkhitektura*. 2020. V. 4 (20). Pp. 26–30. (rus)
4. Turkovskiy S.B., Pogorel'tsev A.A., Preobrazhenskaya I.P. Kleyenyie derevyannyye konstruktсий s uzlamy na vkleynnykh sterzhnyakh v sovremennom stroitel'stve (sistema TSNIISK) [Glued wooden structures with assemblies on glued rods in modern construction]. Moscow: Stroimaterialy, 2013. 308 p. (rus)

5. Steiger R., Serrano E., Stepinac M., Rajcic V., O'Neill C., McPolin D., Widmann R. Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials*. 2015. V. 97. Pp. 90–105.
6. Rudnev I.V., Zhadanov V.I., Dmitriyev P.A. K voprosu primeneniya vkleyennykh metallicheskikh plastin v soyedineniyakh derevyannykh konstruktсий [Toward the use of glued metal plates in joints of wooden structures]. In: *Stroitel'naya nauka-2014: Teoriya, obrazovaniye, praktika, innovatsii: Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Proc. Int. Sci. Conf. 'Building Science-2014: Theory, Education, Practice, Innovation')*. Arkhangelsk: Tipografiya "Tochka", 2014. Pp. 309–314. (rus)
7. Bradford M.A., Hassanieh A., Valipour H.R., Foster S.J. Sustainable steel-timber joints for framed structures. *Procedia Engineering*. 2017. V. 172. Pp. 2–12.
8. Lokaj A. Round timber bolted joints with steel plates under static and cyclic loading. *Key Engineering Materials*. 2014. V. 627. Pp. 29–32.
9. Inzhutov I.S., Dmitriyev P.A., Zhadanov V.I., Deordiyev S.V., Zakharyuta V.V. Polnosbornoye zdaniye zamknutogo tipa s karkasom iz otkhodov fanernogo proizvodstva [Fully prefabricated building of a closed type with a frame from plywood production waste]. *Vestnik MGSU*. 2013. V. 7. Pp. 40–50. (rus)
10. Vasylev V.N., Bezushko A.V. Konstruktivnyye resheniya uzlov sopryazheniya strukturnykh pokrytiy dlya promyshlennykh zdaniy [Structural solutions for assembled components of structural coatings for industrial buildings]. *Metallicheskiye konstruktсии*. 2016. V. 4. Pp. 193–205. (rus)
11. Rudnev I.V., Zhadanov V.I., Lisov S.V. Soyedineniya elementov derevyannykh konstruktсий s primeneniye vkleyennykh stal'nykh plastin [Joint elements of wooden structures with glued steel plates]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2014. V. 4. Pp. 5–8. (rus)
12. Rudnev I.V., Zhadanov V.I. Metodika rascheta soyedineniy elementov derevyannykh konstruktсий na vkleyennykh stal'nykh plastinakh [Calculation of joint elements of wooden structures with glued steel plates]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. V. 5. Pp. 155–161. (rus)
13. Peresypkina V.A., Zhadanov V.I. Stal'nyye vkleyennyye plastiny v uzlovykh soyedineniyakh derevyannykh konstruktсий [Steel glued plates in joint elements of wooden structures]. *Shag v nauku*. 2021. V. 1. Pp. 94–97. (rus)

#### **Сведения об авторах**

Чайкин Евгений Александрович, ст. преподаватель, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, utatso@gmail.com

Деордиев Сергей Владимирович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

#### **Authors Details**

Evgenii A. Chaikin, Senior Lecturer, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, utatso@gmail.com

Sergey V. Deordiev, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia. deordievsv@yandex.ru