

УДК 624.074.1

2.1.1 Строительные конструкции,
здания и сооружения (технические науки)

ВЛИЯНИЕ ШАГА ДОСОК В ПОПЕРЕЧНОМ СЛОЕ НА ДЕФОРМАТИВНОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРЕХСЛОЙНОЙ CLT-ПАНЕЛИ, СМОДЕЛИРОВАННОЙ КАК СОСТАВНАЯ ПЛАСТИНА

М. Ю. Трошин, А. В. Турков

Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Орел, Россия

THE EFFECT OF THE LAMELLA PITCH IN THE TRANSVERSE LAYER ON THE DEFORMABILITY AND STRESS DISTRIBUTION IN A THREE-LAYER CLT PANEL MODELED AS A COMPOSITE PLATE

Mikhail Yu. Troshin, Andrei V. Turkov

Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

Аннотация. Благодаря малому монтажному весу, простоте изготовления, высокой прочности и долговечности древесина перекрестноклееная (CLT-панель) и конструкции из нее представляют интерес для инженеров и ученых. Тем не менее, многие аспекты до сих пор остаются недостаточно исследованными. В частности, не изучен вопрос изменения деформативности и несущей способности плит при различных вариациях геометрических параметров в слоях конструкции. Было рассмотрено влияние шага поперечного слоя трехслойной плиты из CLT на деформации и распределение возникающих нормальных напряжений. Модель представляла собой составную ортотропную пластинку. В связи с отсутствием единой методики расчета многослойных материалов с ортотропными свойствами в слоях исследования проводились посредством вычислительного комплекса SCAD+ с помощью метода конечных элементов. Были получены, систематизированы

Abstract. Cross-laminated timber (CLT panel) and its structures are interesting for engineers and scientists due to its low installation weight, ease of fabrication, high strength and durability. However, many aspects remain under-researched. In particular, the issue of changes in deformability and bearing capacity of slabs under different variations of geometrical parameters in the layers of the structure had not been studied. We studied the effect of the pitch of the transverse layer in a three-layer CLT panel on the deformation and distribution of the resulting normal stresses. The model was a composite orthotropic plate. Because of the lack of a unified methodology for calculating layered materials with orthotropic properties in the layers, the studies were carried out by means of the SCAD+ computational complex using the finite element method. The article obtained, systematized and clearly showed the deflection and stress dependences of varying lamella pitch

и наглядно показаны зависимости прогиба и напряжений от варьирования шага ламелей в поперечном слое CLT-панели, состоящей из трех слоев. Полученные результаты дают более глубокое понимание зависимости деформативности и распределений напряжений от изменения шага досок в поперечном слое плиты. В дальнейшем это позволит изучить возможности оптимизации конструкции CLT-панели с целью уменьшения ее веса, стоимости, сокращения ресурсозатрат при сохранении необходимых характеристик.

Ключевые слова: деревянные конструкции, CLT-панели, древесина перекрестноклееная, распределение напряжений, прогиб, составные пластинки

Для цитирования: Трошин, М. Ю. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, смоделированной как составная пластина / М. Ю. Трошин, А. В. Турков. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-25-32. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 25–32.

For citation: Troshin, M. Yu., & Turkov, A. V. (2023). The effect of the lamella pitch in the transverse layer on the deformability and stress distribution in a three-layer CLT panel modeled as a composite plate. Architecture, Construction, Transport, (3(105)), pp. 25-32. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-25-32.

Введение

Древесина перекрестноклееная (международное название – Cross Laminated Timber (CLT)) – современный материал, востребованный как в малоэтажном, так и в среднеэтажном строительстве. CLT представляет собой многослойную деревянную панель из хвойных и лиственных пород, слои которой расположены крест-накрест относительно друг друга. Характерной особенностью древесины всех пород является анизотропия, поэтому перекрестная склейка способствует появлению высокой сдвиговой жесткости, а также жесткости при поперечном изгибе.

Перекрестное расположение слоев ламелей в панели из CLT позволяет рассматривать ее анизотропию как ортотропную и использовать данный факт при составлении расчетной схемы. Расчетная схема анизотропии клееной древесины определяется анизотропией отдельных слоев и их взаимным расположением [1]. Данный факт

in the transverse layer of a three-layer CLT panel. The results provide a better understanding of the dependence of deformability and stress distributions on the variation of board pitch in the transverse layer of the slab. In the future, this will allow us to explore opportunities to optimize the design of the CLT panel in order to reduce its weight, cost, reduce resource consumption while maintaining the required characteristics.

Key words: wooden structures, CLT panels, cross-laminated timber, stress distribution, deflection, composite plates

усложняет расчет конструкций из CLT-панелей, так как возникает необходимость учета ортотропных свойств древесины.

Особенности материала – многослойность и ортотропность – обуславливают большое количество вариантов геометрических параметров отдельных слоев, которые, в свою очередь, сказываются на несущей способности и деформативности CLT-панелей. При этом предполагается, что существуют оптимальные варианты конструкций плиты с сохранением необходимых характеристик, отвечающих нормативным требованиям.

Несмотря на то, что конструкции из древесины перекрестноклееной стали рассматривать еще в середине 1990-х годов, многие аспекты до сих пор изучены недостаточно. Ранее авторами проводились исследования плит на деформативность и несущую способность. Вычисления осуществлялись с использованием метода конеч-

ных элементов, произведенных в SCAD+ [2–4]. Конструкция была смоделирована из объемных конечных элементов.

В настоящей статье, основываясь на исследованиях А. Р. Ржаницына [5], была смоделирована новая расчетная схема в виде ортотропной составной пластинки.

В современных работах встречаются исследования влияния конструктивных параметров на свойства плит или механические свойства составляющих частей плиты. В частности, данный вопрос рассматривался в статье, посвященной изучению анкерных соединений CLT-панелей [6]. Однако большинство исследований направлено на изучение различных характеров нагружения стандартной конфигурации плит [7–8] или методов расчета [9–14]. В связи с этим существует необходимость проведения дополнительных исследований различных вариаций CLT-панелей с измененными геометрическими параметрами.

Целью настоящей статьи является исследование несущей способности и деформативности CLT-панели, смоделированной как составная пластинка, при вариации шага расположения ламелей в поперечном (втором) слое. Результаты данного исследования позволяют выделить общие закономерности изменения прогибов и нормальных напряжений в продольных и поперечном слоях трехслойной плиты в зависимости от шага ламелей в поперечном слое.

Для достижения поставленной цели необходимо решить стандартные задачи:

- выбрать шаг досок в поперечном слое;
- смоделировать расчетную конструкцию в соответствии с выбранной расчетной схемой в программном комплексе SCAD+;
- провести симуляции нагружения созданной модели и систематизировать полученные данные;
- провести анализ результатов расчетов и сделать выводы.

Объект и методы исследования

Исследования были проведены численными методами при помощи программно-вычислительного комплекса SCAD+. В расчетной схеме

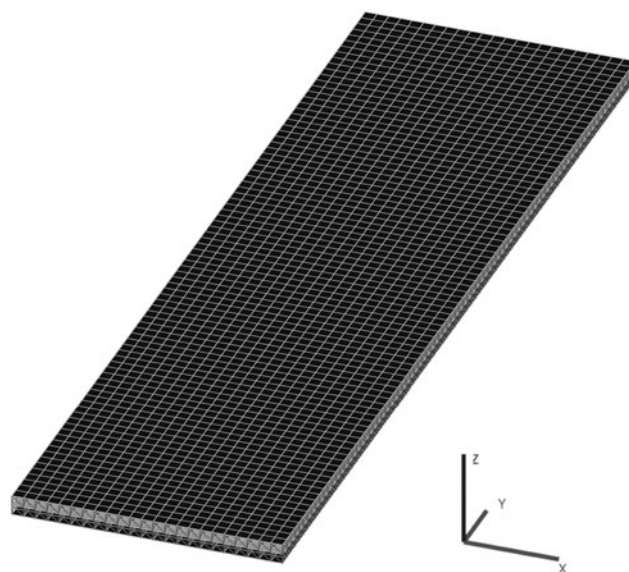


Рис. 1. Общий вид расчетной модели трехслойной плиты из перекрестной древесины в SCAD+
Fig. 1. General view of the calculation model of a three-layer slab from cross wood in SCAD+

CLT-панель определена как составная пластинка с ортотропными свойствами в перекрестных слоях. Пространственная модель показана на рис. 1.

Для обеспечения высокой точности вычислений были выбраны конечные элементы размером 50×50 мм. Связи между слоями представляют собой стержни с очень высокой жесткостью $5 \cdot 10^4$ кН во избежание их влияния на прогиб плиты. Они разделены на два вида: связи сдвига, препятствующие сдвигающим деформациям, и поперечные связи, не позволяющие сближаться или отдаляться пластинкам друг от друга. Общий вид конечных элементов в слоях составной пластинки представлен на рис. 2.

Плита закреплена по нижнему слою с двух противоположных сторон пластин по направлению XZ и XYZ (шарнирно подвижная и шарнирно неподвижная опоры). Нагружение плиты задается равномерно распределенной нагрузкой на верхний слой составной пластины равной 2.5 кН/м^2 . Конструкция имеет длину 5 890 мм и ширину 1 140 мм. Ламели в слоях имеют ширину 190 мм и толщину 42 мм. Плоская расчетная схема представляет собой статически определимую балку (рис. 3).

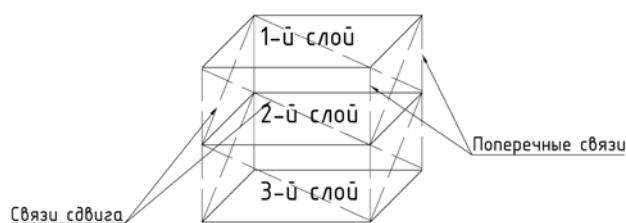


Рис. 2. Конечные элементы в слоях составной пластинки в трехслойной CLT-панели

Fig. 2. Finite elements in composite plate layers in a three-layer CLT panel

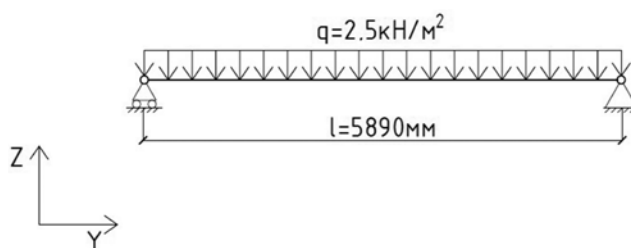


Рис. 3. Расчетная схема трехслойной CLT-панели

CLT-панель является материалом с ортотропными свойствами, поэтому слоям составной пластинки назначены жесткости с различным значением модулей упругости вдоль OX и OY , модуля сдвига и коэффициентов Пуассона, числовые значения которых взяты в соответствии с нормативной документацией¹ (таблица 1).

Результаты

В ходе исследования были рассмотрены конструкции трехслойной плиты из перекрестной древесины с продольным расположением досок в наружных слоях с шагом ламелей 0, 50, 100, 150 мм в поперечном слое с целью определить влияние шага на деформации и распределение

напряжений в продольных (1, 3) и поперечном (2) слоях плиты.

Конечные элементы были организованы по группам в соответствии со слоями, которым они принадлежат. Это позволило рассмотреть изменение деформаций и напряжений в каждом слое в частности.

Линейный расчет производился многофронтальным методом в SCAD+. В результате были отобраны максимальные значения исследуемых параметров в узлах и элементах (таблица 2).

Таблица 1

Table 1

Упругие характеристики ортотропных элементов трехслойной CLT-панели
Elastic characteristics of orthotropic elements of a three-layer CLT panel

Модуль упругости в продольном направлении, кН/м²	
E_x	E_y
400 000	10 000 000
Модуль сдвига в продольном направлении, кН/м²	
G_{xy}	
500 000	
Коэффициент Пуассона	
ν_{xy}	ν_{yx}
0.45	0.018
Модуль упругости в поперечном направлении, кН/м²	
E_x	E_y
10 000 000	400 000
Модуль сдвига в поперечном направлении, кН/м²	
G_{xy}	
500 000	
Коэффициент Пуассона	
ν_{xy}	ν_{yx}
0.018	0.45

¹ Деревянные конструкции = Timber structures : (СП 64.13330.2017) : Актуализированная редакция СНиП II-25-80 : утвержден приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 27 февраля 2017 г. № 129/пр и введен в действие с 28 августа 2017 г. / исполнитель – АО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (дата обращения: 14.07.2023).

Таблица 2
Table 2

Трехслойная плита из древесины перекрестно-клееной с изменяемым шагом ламелей в поперечном слое
Three-layer cross-laminated timber with variable lamella pitch in the cross-layer

№ слоя	Шаг в поперечном слое, мм	u , мм	σ_x , кН/м ²	σ_y , кН/м ²
1, 3	0	-24.46	-26.73	-2 847.43
	50	-24.57	-24.55	-2 853.69
	100	-24.69	-23.23	-2 855.83
	150	-24.75	-22.58	-2 858.96
2	0	-24.46	-24.77	-15.67
	50	-24.57	-33.82	-24.04
	100	-24.69	-39.82	-34.36
	150	-24.75	-45.01	-43.21

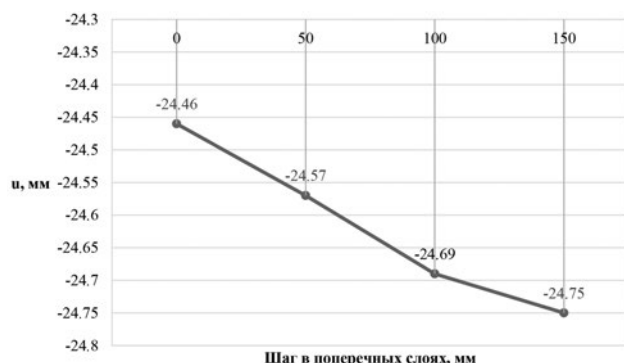


Рис. 4. Зависимость прогиба от шага ламелей в поперечном слое

Fig. 4. Dependence of deflection on lamella pitch in the transverse layer

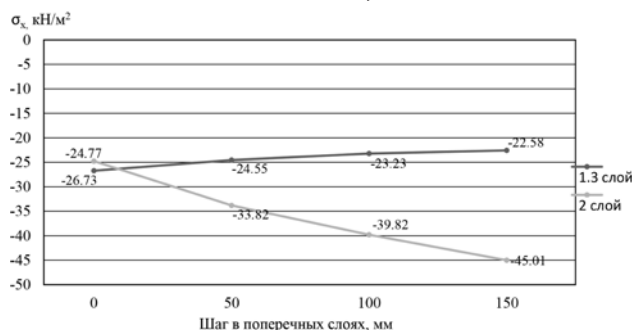


Рис. 5. Зависимость нормальных напряжений σ_x от шага ламелей в поперечном слое

Fig. 5. Dependence of normal stresses σ_x on lamella pitch in the transverse layer

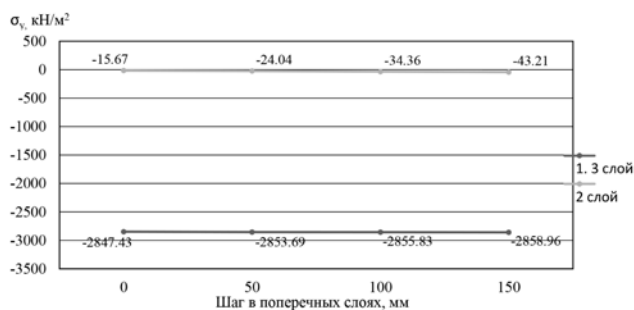


Рис. 6. Зависимость нормальных напряжений σ_y от шага ламелей в поперечном слое

Fig. 6. Dependence of normal stresses σ_y on lamella pitch in the transverse layer

На основе полученных результатов построены линейные графики зависимостей вычисляемых параметров от шага досок в поперечном слое (рис. 4–6).

Выводы

По результатам расчета трехслойной CLT-плиты, смоделированной как составная пластина, при действии статической равномерно распределенной нагрузки выявлено, что:

1) при увеличении расстояния между ламелями в поперечном слое практически не изменяется величина прогибов плиты, разница между наименьшим и наибольшим значением составляет менее 5 %. При данном виде нагружения деформациям препятствуют наружные продольно расположенные слои, которые в данном исследовании являются неизменяемыми. Этим обусловлена малая величина изменения прогибов при изменении шага досок в поперечном слое;

2) при увеличении шага досок происходит перераспределение напряжений, это приводит к уменьшению нормальных напряжений вдоль ОХ в наружных продольных слоях плиты и, наоборот, увеличению в поперечном слое;

3) при увеличении шага досок значительно увеличиваются нормальные напряжения вдоль ОУ (более чем в 2 раза) в поперечном слое и практически не изменяются (0.3 %) в наружных продольных слоях. Это свидетельствует о том, что при данном виде опирания панели поперечный слой практически не оказывает влияния на нормальные напряжения вдоль ОУ. Это также

подтверждается существенной разницей (180 раз) между соответствующими значениями напряжений при одинаковом шаге ламелей.

Полученные результаты указывают на взаимосвязь деформативности и распределений

напряжений в слоях и изменения шага досок в поперечном слое плиты. В ходе дальнейших исследований представляется необходимым учесть возможности оптимизации конструкции CLT-панели и улучшения ее характеристик.

Библиографический список

1. Ашкенази, Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – Москва : Лесная промышленность, 1978. – 224 с. – Текст : непосредственный.
2. Турков, А. В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной / А. В. Турков, М. Ю. Трошин. – Текст : непосредственный // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 24–25 ноября 2022 года. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 515–519.
3. Трошин, М. Ю. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной / М. Ю. Трошин, А. В. Турков. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 3. – С. 391–400.
4. Трошин, М. Ю. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной / М. Ю. Трошин, А. В. Турков. – DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 3 (107). – С. 35–41.
5. Ржаницын, А. Р. Составные стержни и пластинки / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат, 1986. – 316 с. – Текст: непосредственный.
6. Failure modes and mechanical properties of bracket anchor connections for cross-laminated-timber / Y. Shen, J. Schneider, S. F. Stiemer, X. Ren. – DOI 10.1051/mateconf/201927501011. – Текст : электронный // MATEC Web of Conferences – 2019. – No 275(11):01011. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331709903_Failure_Modes_and_Mechanical_Properties_of_Bracket_Anchor_Connections_for_Cross-Laminated-Timber (дата обращения: 07.08.2023).
7. Evaluation of the mechanical properties of cross Laminated timber with elementary beam theories compression / I. P. Christovasilis, M. Brunetti, M. Follesa [et al.]. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2016. – No 122:202-213. – URL: https://www.researchgate.net/publication/304355276_Evaluation_of_the_Mechanical_Properties_of_Cross_Laminated_Timber_with_Elementary_Beam_Theories (дата обращения: 07.08.2023).
8. Особенности поведения древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия / А. Бубис, И. Р. Гизятуллин, А. Н. Хворова, И. Ю. Петров. – DOI 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80. – Текст : непосредственный // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2022. – № 2. – С. 62–80.
9. Рогожина, А. В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия / А. В. Рогожина. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6 (90). – С. 329–339.
10. Филимонов, М. А. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) российского производства / М. А. Филимонов, П. Н. Смирнов. – DOI

- 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97. – Текст : непосредственный // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2022. – № 2. – С. 81–97.
11. Методика расчета панелей из перекрестно клееной древесины / Ш. М. Мамедов, Е. Г. Шабикова, Д. В. Нижегородцев, Т. Н. Казакевич. – DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 5 (82). – С. 66–71.
12. Чебыкин, А. А. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок / А. А. Чебыкин, Ю. А. Фрицлер, С. В. Кудрявцев. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 2 (33). – С. 83–85.
13. Определение прочностных и упругих характеристик древесины перекрестно клееной (ДПК/CLT) и классификация по классам прочности : отчет о НИР / Научно-исследовательский центр «Строительство» ; А. А. Погорельцев, М. А. Филимонов, П. Н. Смирнов. – Москва, 2020. – 175 с. – Текст : непосредственный.
14. Проведение исследований по определению несущей способности стеновых панелей и плит перекрытия из древесины перекрестно клееной (ДПК/CLT) и разработка методики расчета : отчет о НИР / Научно-исследовательский центр «Строительство» ; А. А. Погорельцев, П. Н. Смирнов, М. А. Филимонов. – Москва, 2020. – 268 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Ashkenazi, E. K. (1978). Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 224 p. (In Russian).
2. Turkov, A. V., & Troshin, M. Y. (2022). The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in three-layer slabs of cross-laminated timber. *Arkhitekturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii. Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k provedeniyu v Rossiyskoy Federatsii Desyatiletia nauki i tekhnologii*, November, 24-25. Omsk, Siberian state automobile and highway university Publ., 515-519 pp. (In Russian).
3. Troshin, M. Yu., & Turkov, A. V. (2023). The effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer panels made of cross-laminated timber. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 18(3), 391-400 pp. (In Russian). DOI 10.22227/1997-0 935.2023.3.391-400.
4. Troshin, M. Yu., & Turkov, A. V. (2023). The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in five-layer slabs of CLT-panels. *Building and reconstruction*, (3(107)), 35-41 pp. (In Russian). DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41.
5. Rzhantsyn, A. R. (1986). *Sostavnye sterzhni i plastinki*. Moscow, Stroyizdat Publ., 316 p. (In Russian).
6. Shen, Y., Schneider, J., Stieme, S. F., & Ren, X. (2019). Failure modes and mechanical properties of bracket anchor connections for cross-laminated-timber. *MATEC Web of Conferences*, No 275(11):01011. (In English). Available at: https://www.researchgate.net/publication/331709903_Failure_Modes_and_Mechanical_Properties_of_Bracket_Anchor_Connections_for_Cross-Laminated-Timber (accessed 07.08.2023). DOI 10.1051/mateconf/201927501011.
7. Christovasilis, I. P., Brunetti, M., Follesa, M., Nocetti, M., & Vassallo, D. (2016). Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories compression. *Construction and building materials*, No 122:202-213. (In English). Available at: https://www.researchgate.net/publication/304355276_Evaluation_of_the_Mechanical_Properties_of_Cross_Laminated_Timber_with_Elementary_Beam_Theories (accessed 07.08.2023). DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082.

8. Bubis, A. A., Giziattullin, I. R., Petrov, I. Yu., & Khvorova, A. N. (2022). Peculiarities of behavior of cross-laminated timber (CLT) under static and dynamic loads simulating seismic impacts. *Earthquake engineering. Constructions safety*, (2), 62-80 pp. (In Russian). DOI 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80.
9. Rogozhina, A. V. (2022). Calculation of the deformability of the CLT overlap panel. *Engineering journal of Don*, (6(90)), pp. 329-339. (In Russian).
10. Filimonov, M. A., & Smirnov, P. N. (2022). Research of strength and elastic characteristics of Russian-made cross laminated timber slabs. *Earthquake engineering. Constructions safety*, (2), pp. 81-97. (In Russian). DOI 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97.
11. Mamedov, Sh. M., Shabikova, E. G., Nizhegorodtsev, D. V., & Kazakevich, T. N. (2020). Method for calculating cross laminated timber panels. *Bulletin of civil engineers*, (5(82)), pp. 66-71. (In Russian). DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71.
12. Chebykin, A. A., Fritzler, U. A., & Kudryavtsev, S. V. (2017). Evaluation of cross section design properties for plates from cross laminated timber. *Akademicheskij vestnik Uralniiproekt RAASN*, (2(33)), pp. 83-85. (In Russian).
13. Pogoreltsev, A. A., Filimonov, M. A., & Smirnov, P. N. (2020). Opredelenie prochnostnyh i uprugih harakteristik drevesiny perekrestno kleenoy (DPK/CLT) i klassifikacija po klassam prochnosti: otchet o NIR. Moscow, 175 p. (In Russian).
14. Pogoreltsev, A. A., Smirnov, P. N., & Filimonov, M. A. (2020). Provedenie issledovaniy po opredeleniyu nesushchey sposobnosti stenovykh paneley i plit perekrytiya iz drevesiny perekrestno kleenoy (DPK/CLT) i razrabotka metodiki rascheta: otchet o NIR. Moscow, 268 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Трошин Михаил Юрьевич, аспирант кафедры строительных конструкций и материалов, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, e-mail: mtr997@mail.ru

Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, e-mail: aturkov@bk.ru

Information about the authors

Mikhail Yu. Troshin, Postgraduate at the Department of Building Structures and Materials, Orel State University named after I. S. Turgenev, e-mail: mtr997@mail.ru

Andrei V. Turkov, Doctor in Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Building Structures and Materials, Orel State University named after I. S. Turgenev, e-mail: aturkov@bk.ru

*Получена 25 августа 2023 г., одобрена 15 сентября 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.
Received 25 August 2023, Approved 15 September 2023, Accepted for publication 28 September 2023*