

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ CLT-ПАНЕЛЕЙ

VERIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE DEFORMED STATE OF CYLINDRICAL CLT-PANELS

Верифицируется ранее предложенная автором математическая модель исследования деформированного состояния многослойных цилиндрических панелей из CLT. Для этого сравниваются результаты расчета по авторской модели трех оболочек различной геометрии, выполненных из разного числа слоев, с результатами расчета таких конструкций, полученными в ПК «Ли́ра-САПР». Конструкции закреплены по контуру шарнирно-неподвижно и находились под действием небольшой равномерно распределенной поперечной нагрузки, допускающей наибольшие прогибы панели не более 2 мм. Сравнение деформированного состояния проводилось по наибольшему прогибу и прогибу в центре оболочек, а также по форме деформированного состояния конструкций. Также исследовано влияние числа функций в разложении в методе Ритца на точность предложенной математической модели. Показано, что при 16 и более членах в разложении погрешность расчетов прогиба в сравнении с ПК «Ли́ра-САПР» не превышает 10 %.

Ключевые слова: цилиндрические панели, CLT, геометрическая нелинейность, функционал полной потенциальной энергии деформации, верификация, многослойные оболочки.

In this paper, the verification of the mathematical model previously proposed by the author for studying the stress-strain state of multilayer cylindrical panels from CLT is carried out. For this purpose, the calculation results of the author's model of three shells of different geometry made of a different number of layers are compared with the calculation results of such structures obtained in PC «Lira-SAD». Structures fixed along the contour in a hinged and rigid manner were subjected to the action of a small evenly distributed transverse load, with the greatest possible panel deflections of 4 mm. The comparison of the deformed state was carried out by the biggest deflection and the deflection in the center of the shells, as well as by the shape of the deformed state of the structures. At the same time, there was studied the influence of the number of functions in the expansion in the Ritz method on the accuracy of the proposed mathematical model. It is shown that with 16 or more terms in the expansion, the deflection calculation error in comparison with the Lira-SAPR PC does not exceed 10%.

Keywords: cylindrical panels, CLT, geometrical nonlinearity, total potential strain energy functional, verification, multilayer shells.

Введение

В настоящее время активное развитие получают материалы из древесины, что обусловлено их высокими показателями прочности, огнестойкости (обугливание со ско-

ростью 0,7–0,8 мм/мин), богатой сырьевой базой, эстетической составляющей и легким весом [1, 2]. Одним из современных материалов на основе древесины является поперечно-клееная древесина (CLT). Данный материал

в последние годы применяется для строительства жилых [3, 4] и общественных зданий [5–8], а также промышленных и сельскохозяйственных построек [9]. CLT-панели также применяются для покрытия большепролетных сооружений, в частности для создания оболочек [10–12]. Для таких конструкций важен расчет деформированного состояния, в том числе анализ устойчивости [13, 14].

Развитие вычислительной техники в настоящее время позволяет решать все более и более трудоемкие задачи. В частности, математические модели в совокупности с современными алгоритмами их исследования могут учитывать все больше и больше факторов, описывающих воспроизводимый этими моделями процесс. Таким образом, вычислительные эксперименты становятся все более и более точными в сравнении с реальными процессами.

Между тем построение новых моделей с учетом различных факторов требует их сверки с ранее существующими моделями, чья достоверность уже доказана. При этом положительным моментом является использование в рассматриваемых моделях различных методов и подходов [15–17]. В большинстве современных программных комплексов для расчета строительных конструкций применяется метод конечных элементов, а в качестве математической модели — уравнения равновесия [5, 16, 18].

Цель работы: верификация ранее разработанной математической модели деформированного состояния многослойных ортотропных цилиндрических панелей, выполненных из CLT [19]. Математическая модель представлена в виде функционала полной потенциальной энергии деформации, учитывает геометрическую нелинейность и поперечные сдвиги, а также ортотропию материала. Для исследования приведенной математической модели применяются метод Ритца и метод Ньютона.

Задачи:

- расчет ряда цилиндрических панелей из CLT с различными геометрическими харак-

теристиками и числом слоев по предложенной автором модели с различным числом аппроксимирующих функций в методе Ритца;

- анализ сходимости метода Ритца для представленных конструкций;

- расчет выбранных панелей в ПК «Лири-САПР» с некоторой небольшой нагрузкой. Нагрузка выбирается таким образом, чтобы значения наибольшего прогиба, полученные по предложенной математической модели, не превышали 2 мм;

- анализ полученных результатов: сравнение значений прогибов в центре панелей и наибольшего прогиба путем вычисления относительного отклонения результатов расчета по двум рассматриваемым моделям (предложенной автором и применяемой в ПК «Лири-САПР»), а также оценка формы деформирования конструкций.

Методы

Ранее в работе [19] автором была предложена математическая модель исследования напряженно-деформированного состояния многослойных ортотропных цилиндрических панелей. Модель геометрически нелинейная и учитывает поперечные сдвиги. Построенная математическая модель представлена в виде функционала полной потенциальной энергии деформации и имеет вид (1) с граничными условиями (2), соответствующими шарнирно-неподвижному закреплению контура:

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + N_{xy} \gamma_{xy} + M_x \chi_1 + M_y \chi_2 + 2M_{xy} \chi_{12} + Q_x (\Psi_x - \theta_1) + Q_y (\Psi_y - \theta_2) - 2qW] dx dy; \quad (1)$$

при $x = 0, a$:

$$U = V = W = \Psi_y = 0, \quad M_x = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 = 0;$$

при $y = 0, b$:

$$U = V = W = \Psi_x = 0, \\ M_y = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 = 0. \quad (2)$$

Здесь a, b — линейные размеры оболочки (рис. 1); $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ — деформации; $N_x, N_y, N_{xy}, Q_x, Q_y$ — усилия; M_x, M_y, M_{xy} — моменты; Ψ_x, Ψ_y — функции углов поворота отрезка нормали к срединной поверхности в сечениях xOz, yOz соответственно; U, V, W — функции перемещения точек срединной поверхности панели вдоль осей x, y и z соответственно; q — нормальная равномерно распределенная поперечная нагрузка. θ_1, θ_2 имеют вид:

$$\theta_1 = -\frac{\partial W}{\partial x}, \theta_2 = -\left(\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{V}{R}\right).$$

Для проверки адекватности построенной математической модели необходимо провести как сравнительные исследования при различном наборе аппроксимирующих функций в методе Ритца, так и сравнения с результатами, полученными с использованием других методов и моделей. Для этого были исследованы НДС ряда цилиндрических панелей из CLT. Расчеты проводились как по предложенной в работе математической модели с помощью описанных алгоритмов ее исследования [19, 20], так и с помощью ПК «Ли́ра-САПР 2013 R4».

В рамках процедуры верификации предложенной модели также будет рассмотрено влияние числа аппроксимирующих функций N на значения критической нагрузки потери устойчивости, а также на вид кривой

«нагрузка–наибольший прогиб». В работах [17, 20] было показано, что с увеличением числа аппроксимирующих функций в методе Ритца точность вычислений возрастает, что также связано с ростом объема вычислений. Таким образом, необходимо подобрать такое значение N , начиная с которого значения выходных параметров меняются не более чем на $\varepsilon = 5\%$. Ранее в работе [20] было показано, что для гладкой однослойной оболочки таким числом аппроксимирующих функций можно принять $N = 16$.

Результаты

Для проведения сравнительного анализа рассматривались три многослойные цилиндрические панели различной геометрии. Геометрические параметры рассматриваемых конструкций приведены в табл. 1. Нечетные слои ориентированы волокнами древесины поперек образующей цилиндра, волокна четных слоев — вдоль образующей (рис. 2). В соответствии с работой [19] влияние каждого слоя панели рассматривается отдельно на соответствующем отрезке общей толщины пакета. В качестве материала панелей будем рассматривать ель, для которой в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» примем в четных слоях следующие параметры: $E_1 = 11,5 \cdot 10^3$ МПа, $E_2 = 0,38 \cdot 10^3$ МПа, $\mu_{12} = 0,45$, $\mu_{21} = 0,015$, $G_{12} = 720$ МПа. Для нечетных слоев соответствующие модули упругости и коэффициенты Пуассона меняются местами. Нормальная равномерно распределенная нагрузка, подаваемая на рассматриваемые панели, выбиралась таким образом, чтобы наибольший прогиб, полученный по предложенной математической модели, не превышал 2 мм.

Для подтверждения адекватности предложенной математической модели и определения достаточного числа членов разложения в методе Ритца, входящего в алгоритм ее исследования, требуется провести сравнительный анализ значений критической нагрузки потери устойчивости и графиков

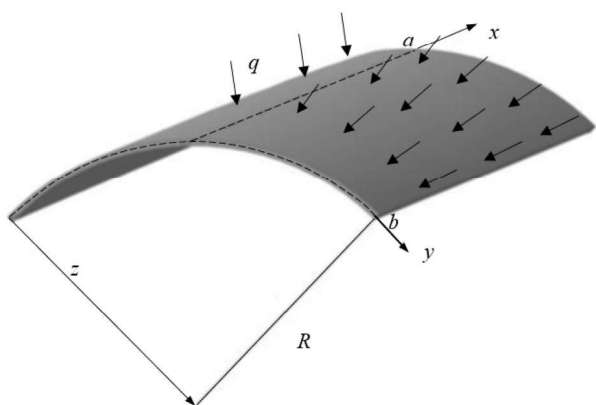


Рис. 1. Схематичное изображение цилиндрической панели под воздействием равномерно распределенной нагрузки

Таблица 1

Геометрические характеристики конструкций

Вариант геометрии (ВГ)	a , м	b , м	R , м	h , м	Число слоев N_l	Толщина слоя, м
1	20	10	10	0,15	3	0,05
2	10	6	16	0,15	5	0,03
3	12	6	6	0,15	5	0,03

«нагрузка–наибольший прогиб». В табл. 2 приведены значения критических нагрузок потери устойчивости для рассматриваемых конструкций в зависимости от числа членов разложения.

На рис. 3 приведены графики «нагрузка–наибольший прогиб» для оболочки варианта геометрии 3 при различных N . Пунктирной линией показан график при $N = 9$, штрихпунктирной — при $N = 16$, регулярной — при $N = 25$.

По полученным данным видно, что графики лежат достаточно близко друг к другу, причем графики, полученные при 16 и 25 членах разложения в методе Ритца, практически совпадают. Значения критических

нагрузок потери устойчивости при $N = 16$ и $N = 25$ для гладких оболочек также практически совпадают, не превышая 1 % для рассматриваемых конструкций. Таким образом, для исследования прочности и устойчивости гладких цилиндрических панелей из CLT достаточно использовать 16 членов разложения в методе Ритца.

Для расчетов в ПК «Ли́ра-СА́ПР» применялся объемный конечный элемент типа 36, оболочка разбивалась в плане на 24×24 элемента. Расчет в ПК «Ли́ра-СА́ПР» проводился в геометрически линейной постановке, в связи с этим выбирались малые значения нагрузок, при которых перемещение точек срединной поверхности оболочки имеет линейный характер, а сами значения прогибов рассматриваемых цилиндрических оболочек будут малы относительно их толщины. Результаты расчетов по предложенной математической модели с удержанием $N = 16$ членов разложения в аппроксимации метода Ритца, а также полученные с помощью ПК «Ли́ра-СА́ПР» приведены в табл. 3. Также приведены значения относительного отклонения наибольшего прогиба ΔW_{\max} и прогиба в центре ΔW_c , полученного по формуле

$$\Delta W = \frac{|W^L - W^M|}{W^L} 100 \%. \quad (3)$$

Здесь ΔW — относительное отклонение, получаемое как для значений прогиба в центре конструкции, так и для наибольшего прогиба; W^L — значение прогиба, полученное с помощью ПК «Ли́ра-СА́ПР»; W^M — значение прогиба, полученное с помощью предложенной математической модели.

Таблица 2

Значения критических нагрузок потери устойчивости, МПа

Вариант геометрии (ВГ)	N		
	9	16	25
1	0,272	0,270	0,270
2	0,162	0,163	0,163
3	0,887	0,890	0,885

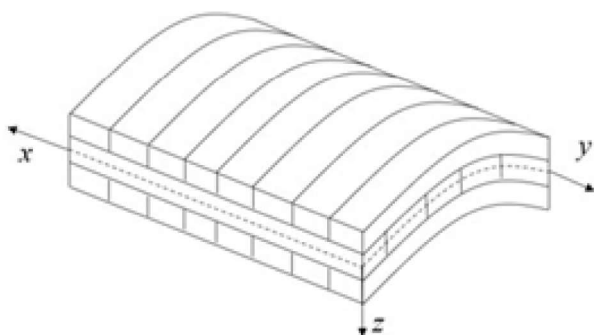


Рис. 2. Схематическое изображение ориентации слоев в цилиндрической оболочке

Также важным фактором является состояние конструкции под заданной нагрузкой. Соответствующие графики приведены на рис. 4: слева — для результатов, полученных в ПК «Ли́ра-САПР», справа — по предложенной математической модели. Для лучшей визуализации деформаций вводится коэффициент искажения масштаба перемещений K_m , таким образом отложенный от поверхности панели прогиб в точке (x, y) будет равен $K_m \cdot W(x, y)$. K_m будет равен соответственно 1560, 567 и 895 для вариантов геометрии 1, 2, 3 соответственно. Конечная форма состояния конструкции в конкретных точках зависит от используемых при расчетах аппроксимирующих функций, не давая точных совпадений при расчете по разным моделям.

Из данных, представленных в табл. 3, а также по рис. 4 видно, что предложенная математическая модель для исследования НДС гладких многослойных цилиндрических панелей обеспечивает точность вычислений, не выходящую за 10 %-ный интервал, в сравнении с расчетами ПК «Ли́ра-САПР». Следует отметить, что указанная точность

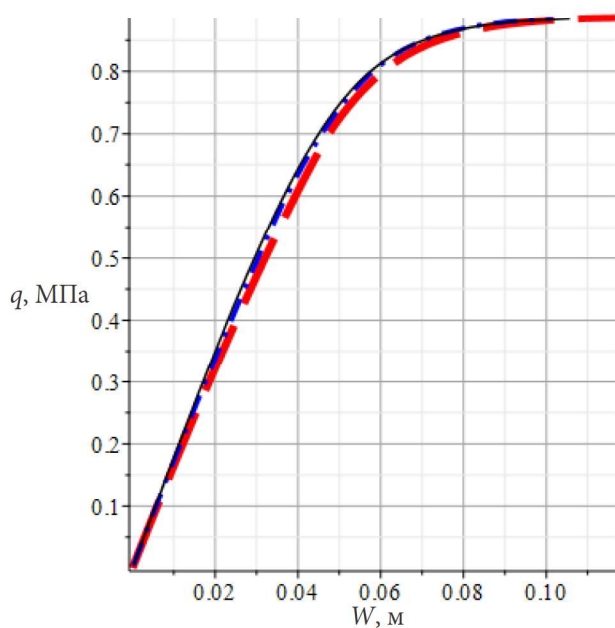


Рис. 3. Графики «нагрузка–наибольший прогиб» для оболочки ВГ 3

вычислений справедлива для малых нагрузок, в которых деформации имеют линейный характер. При увеличении нагружения результаты будут расходиться в силу геометрической нелинейности предложенной математической модели.

Обсуждение

По предложенной автором математической модели проведено исследование напряженно-деформированного состояния ряда цилиндрических панелей различной геометрии, выполненных из CLT из различного числа слоев. Показано, что 16 членов разложения в методе Ритца достаточно для аппроксимации функций перемещений и углов поворота нормали в рамках решения задачи устойчивости таких конструкций. Значения критических нагрузок потери устойчивости рассматриваемых конструкций при числе $N = 16$ и $N = 25$ совпадают или лежат достаточно близко, что говорит об адекватности предложенной модели и методах ее исследования.

Также проведена верификация деформированного состояния рассматриваемых цилиндрических панелей, находящихся под воздействием небольших равномерно распределенных нормальных нагрузок, путем сравнения значений прогибов конструкций в центре, а также наибольших прогибов с аналогичными значениями, полученными с помощью ПК «Ли́ра-САПР». Помимо численных значений, анализировалось деформированное состояние конструкции после приложения нагрузки. Показано, что относительное отклонение значений прогиба не превышает 10 %, а формы деформированного состояния конструкции достаточно близки для малых нагрузок, при которых перемещение точек срединной поверхности имеет линейный характер.

Таким образом, можно говорить об адекватности и достаточной точности при малых нагрузках предложенной в [19] математической модели.

Расчетные значения прогибов панелей

Вариант геометрии (ВГ)	Нагрузка q , кПа	W_c^L , мм	W_{max}^L , мм	W_c^M , мм	W_{max}^M , мм	ΔW_c , %	ΔW_{max} , %
1	10	1,14	1,28	1,25	1,33	9,65	3,38
2	5,0	1,73	1,76	1,81	1,89	4,61	7,37
3	20	1,30	1,30	1,17	1,18	10,0	9,23

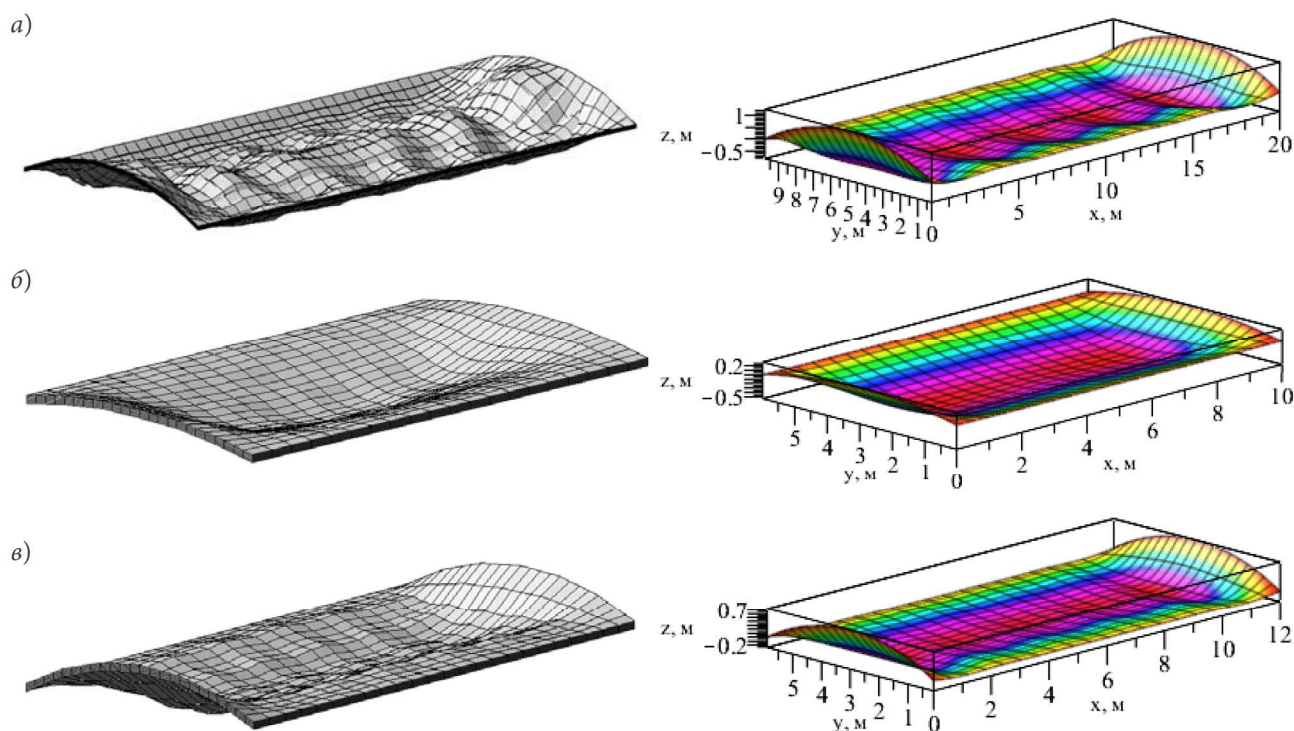


Рис. 4. Форма состояния конструкции под нагрузкой для панели: а — ВГ 1; б — ВГ 2; в — ВГ 3

Выводы

На примере трех цилиндрических панелей из CLT различной геометрии показана сходимость предложенной в [19] математической модели НДС многослойных ортотропных цилиндрических панелей, сделан вывод о достаточности 16 членов разложения в методе Рунге при аппроксимации функций перемещения и углов поворота нормали. Также проведено сравнение значений прогибов рассматриваемых конструкций при небольших нагрузках с аналогичными значениями, полученными с помощью ПК «Ли́ра-САПР». Анализ значений прогибов и формы деформированного состояния конструкций дал близкие

результаты, что позволяет говорить о достоверности предложенной автором модели.

Библиографический список

1. Benedetti F., Rosales V., Jélvez A., Núñez M., Rebolledo A., Jara-Cisterna A. Economic and technical analysis of CLT production facilities: an application to small and emerging markets // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022. Vol. 80 (5). Pp. 1–15. DOI: 10.1007/s00107-022-01846-y.
2. Brunetti M., Nocetti M., Pizzo B., Negro F., Aminti G., Burato P., Cremonini C., Zanuttini R. Comparison of different bonding parameters in the production of beech and combined beech-spruce CLT by standard and optimized tests methods // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 265. 120168. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120168.

3. Causevic A., Rustempašić N. Cross-laminated timber (CLT) application in multi-storey buildings // *Technics Technologies Education Management (TTEM)*. 2020. Vol. 15. No. 2. Pp. 96–101.

4. Lakot Alemdağ E., Tandoğan G., Artun H. Energy Efficiency in Cross Laminated Timber (CLT) Buildings // *Architectural Sciences and Technology*. Lyon: Livre de Lyon, 2022. Pp. 247–267.

5. Zhao X., Zhang B., Kilpatrick T., Sanderson I. Numerical Analysis on Global Serviceability Behaviours of Tall CLT Buildings to the Eurocodes and UK National Annexes // *Buildings*. 2021. Vol. 11. No. 3. 124. DOI: 10.3390/buildings11030124.

6. Elephant House Zoo Zürich // *Arch Daily*. July 27, 2015. URL: <https://www.archdaily.com/770772/elephant-house-zoo-zurich-markus-schietsch-architekten> (дата обращения 30.01.2023).

7. Косов И. И. Деревянные панели CLT в строительстве общественных зданий // *Международный журнал прикладных наук и технологий Integral*. 2019. № 2-1. С. 253–259.

8. 木構造振興株式会社. CLT建築実証事業 報告書 // 公益財団法人日本住宅・木材技術センター — 2021. URL: <https://matsumoto-sekkei.com/wp-content/uploads/2021/11/202104011903523314.pdf> (дата обращения: 30.01.2023).

9. Li Cavoli D., D'Arenzo G., Ruggeri E. M., Fossetti M. On the Use of CLT Infills to Improve the Lateral Performance of RC Frames // *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*. 2023. Pp. 864–874. DOI: 10.1007/978-3-031-21187-4_75.

10. Wood D., Grönquist P., Bechert S., Scheder-Bieschin L. From Machine Control to Material Programming: Self-Shaping Wood Manufacturing of a High Performance Curved CLT Structure — Urbach Tower // 2020. *FABRICATE 2020 — Making Resilient Architecture*. At: London, UK. doi: 10.2307/j.ctv13xpsvw.11.

11. Bechert S., Scheder-Bieschin L., Knippers J., Wood D., Menges A. Structural Design Approach and Novel Applications for Folded Shell Structures made of Single-curved CLT — Tower Urbach, Remstal Gartenschau // *IASS Annual Symposium 2019 — Structural Membranes 2019 Form and Force*. At: Barcelona, Spain, 7-10th October 2019.

12. Биткин В. Е., Жидкова О. Г., Комаров В. А. Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций // *Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2018. Т. 17, № 1. С. 100–117. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117.

13. Yusof A. S., Uyup M. K. A., M. Tahir P., Beng O. C. 7 Mechanical performance and failure characteristics of cross laminated timber (CLT) manufactured from

tropical hardwoods species // *Biopolymer Composites*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2023. Pp. 77–86. DOI: 10.1515/9783110769227-007.

14. Sciomenta M., Bedon C., Fragiaco M. Experimental and numerical column buckling analysis of hardwood Cross Laminate Timber (CLT) panels. 22 December 2022, preprint (version 1). DOI: 10.21203/rs.3.rs-2398284/v1.

15. Gimenez M. H. D., Cecchini Júnior V. Comparação de métodos de cálculo para elementos de madeira laminada cruzada (CLT) submetidos à flexão // *RECIMA21 — Revista Científica Multidisciplinar*. 2023. ISSN 2675-6218. Vol. 4 (1). Pp. 1–12. DOI: 10.47820/recima21.v4i1.2667.

16. Хайруллин Ф. С., Сахбиев О. М. Расчет ортотропных конструкций вариационным методом на основе трехмерных функций с конечными носителями // *Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Механика*. 2017. № 2. С. 195–207. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.11.

17. Карнов В. В., Кобелев Е. А., Панин А. Н., Семенов А. А. Модели деформирования строительных конструкций и методы их расчета. М.: АСВ, 2022. 465 с.

18. Карнов В. В., Кобелев Е. А. Математическая модель нелинейного деформирования трехслойных оболочек // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 3 (80). С. 94–100. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-3-94-100.

19. Каменев И. В., Карнов В. В., Кондратьева Л. Н. Устойчивость цилиндрических CLT-панелей // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 6 (95). С. 30–38. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-6-30-38.

20. Каменев И. В., Семенов А. А. Устойчивость пологих ортотропных оболочек двоякой кривизны при шарнирно-подвижном закреплении контура // *Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Механика*. 2018. № 2. С. 32–43. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.04.

References

1. Benedetti F., et al. Economic and technical analysis of CLT production facilities: an application to small and emerging markets. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2022, vol. 80 (5), pp. 1–15. DOI: 10.1007/s00107-022-01846-y

2. Brunetti M., et al. Comparison of different bonding parameters in the production of beech and combined beech-spruce CLT by standard and optimized tests methods. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 265, 120168. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120168

3. Causevic A., Rustempašić N. Cross-laminated timber (CLT) application in multi-storey buildings. *Technics. Technologies. Education. Management (TTEM)*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 96–101.

4. Lakot Alemdağ E., Tandoğan G., Artun H. Energy Efficiency in Cross Laminated Timber (CLT) Buildings. *Architectural Sciences and Technology*. Lyon, Livre de Lyon, 2022, pp. 247–267.
5. Zhao X., Zhang B., Kilpatrick T., Sanderson I. Numerical Analysis on Global Serviceability Behaviours of Tall CLT Buildings to the Eurocodes and UK National Annexes. *Buildings*, 2021, vol. 11, no. 3, 124. DOI: 10.3390/buildings11030124.
6. Elephant House Zoo Zürich. *Arch Daily*, 2015, July 27. Available at: <https://www.archdaily.com/770772/elephant-house-zoo-zurich-markus-schietsch-architekten> (accessed: 30.01.2023).
7. Kosov I. I. *Derevyannye paneli CLT v stroitel'stve obshchestvennykh zdaniy* [Wooden CLT panels in the construction of public buildings]. *Mezhdunarodniy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologiiy "Integral" – International Journal of Applied Science and Technology "Integral"*, 2019, no. 2 (1), pp. 253–259.
8. 木構造振興株式会社. CLT建築実証事業報告書 // 公益財団法人日本住宅・木材技術センター – 2021. Available at: <https://matsumoto-sekkei.com/wp-content/uploads/2021/11/202104011903523314.pdf> (accessed: 30.01.2023).
9. Li Cavoli D., D'Arenzo G., Ruggeri E. M., Fossetti M. On the Use of CLT Infills to Improve the Lateral Performance of RC Frames. *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, 2023, pp. 864–874. DOI: 10.1007/978-3-031-21187-4_75.
10. Wood D., Grönquist P., Bechert S., Scheder-Bieschin L. *From Machine Control to Material Programming: Self-Shaping Wood Manufacturing of a High Performance Curved CLT Structure. Urbach Tower*, 2020. FABRICATE 2020 — Making Resilient Architecture. At: London, UK. DOI: 10.2307/j.ctv13xpsvw.11
11. Bechert S., et al. Structural Design Approach and Novel Applications for Folded Shell Structures made of Single-curved CLT — Tower Urbach, Remstal Gartenschau. *IASS Annual Symposium 2019 — Structural Membranes 2019 Form and Force*. At: Barcelona, Spain, 7–10th October 2019.
12. Bitkin V. E., Zhidkova O. G., Komarov V. A. *Vybor materialov dlya izgotovleniya razmerostabil'nykh nesushchikh konstruksiy* [Selection of materials for the manufacture of dimensionally stable support structures]. *Vestnik Samarskogo un-ta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie – Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 100–117. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117
13. Yusoh A. S., Uyup M. K. A., Tahir P. M., Beng O. C. *Mechanical performance and failure characteristics of cross laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods species*. *Biopolymer Composites*. Berlin, Boston, De Gruyter, 2023, pp. 77–86. DOI: 10.1515/9783110769227-007.
14. Sciomenta M., Bedon C., Fragiaco M. *Experimental and numerical column buckling analysis of hardwood Cross Laminated Timber (CLT) panels*. 22 December 2022, preprint (version 1). DOI: 10.21203/rs.3.rs-2398284/v1
15. Gimenez M. H. D., Cecchini Júnior V. Comparação de métodos de cálculo para elementos de madeira laminadacruzada (CLT) submetidos à flexão. *RECIMA21 — Revista Científica Multidisciplinar*, 2023. ISSN 2675-6218. Vol. 4 (1), pp. 1–12. DOI: 10.47820/recima21.v4i1.2667
16. Khayrullin F. S., Sakhbiev O. M. *Raschet ortotropnykh konstruksiy variatsionnym metodom na osnove trekhmernykh funktsiy s konechnymi nositelyami* [Calculation of orthotropic structures by variational method based on three-dimensional functions with finite carriers]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Mekhanika – Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2017, no. 2, pp. 195–207. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.11
17. Karpov V. V., Kobelev E. A., Panin A. N., Semenov A. A. *Modeli deformirovaniya stroitel'nykh konstruksiy i metody ikh rascheta* [Deformation models of building structures and methods of calculation]. Moscow, ASV Publ., 2022, 465 p.
18. Karpov V. V., Kobelev E. A. *Matematicheskaya model' nelineynogo deformirovaniya trekhslonnykh obolochek* [Mathematical model of nonlinear deformation of three-layer shells]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 3 (80), pp. 94–100. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-3-94-100
19. Kamenev I. V., Karpov V. V., Kondrat'eva L. N. *Ustoychivost' tsilindricheskikh CLT-paneley* [Stability of cylindrical CLT panels]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. (95), pp. 30–38. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-6-30-38
20. Kamenev I. V., Semenov A. A. *Ustoychivost' plogikh ortotropnykh obolochek dvoyakoy krivizny pri sharnirno-podvizhnom zakreplenii kontura* [Stability of flat orthotropic shells of double curvature with hinged-moving fixing of the contour]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Mekhanika – Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2018, no. 2, pp. 32–43. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.04