

М.Ю. ТРОШИН¹, А.В. КОРОБКО¹¹ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел, Россия

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРЕКРЫТИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ПЕРЕКРЕСТНО КЛЕЕНОЙ С ВАРЬИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ СЕЧЕНИЙ

Аннотация. В статье представлена методика оценки реальной несущей способности перекрытий из древесины перекрёстно клеёной (ДПК) с варьируемыми параметрами сечений. Метод основан на функциональной зависимости между частотой собственных колебаний и максимальным прогибом конструкции, связанной коэффициентом пропорциональности K . Для исследования были испытаны пять типов образцов ДПК плит с различными геометрическими параметрами слоёв: трёхслойные сплошные, с утолщёнными продольными и поперечными слоями, с зазорами в поперечных слоях, а также пятислойная плита. Многослойные плиты были приведены к эквивалентной однослойной ортотропной пластине с использованием эффективных цилиндрических жёсткостей. Расчёт максимального прогиба и нормальных напряжений выполнен по формулам теории пластин и проверен экспериментально. Отклонения расчётных значений прогиба от экспериментальных составили не более 10%, напряжений — не более 13%, что подтверждает высокую точность предложенного метода. Особенностью методики является возможность оценки несущей способности конструкции без знания фактической жёсткости, используя только одну динамическую характеристику — основную частоту собственных колебаний. Это делает метод быстрым, безопасным и экономически эффективным для натурных испытаний. Предложенный подход может быть применён при оценке конструкций по второй группе предельных состояний и в ряде типовых случаев — по первой группе, при условии пренебрежения касательными напряжениями и концентрациями напряжений. Перспективным направлением дальнейших исследований является расширение области применения методики на другие условия опирания и соотношения сторон плит.

Ключевые слова: деревянные конструкции, древесина перекрёстно клеёная, напряженно-деформированное состояние, несущая способность.

M.YU. TROSHIN¹, A.V. KOROBKO¹¹Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia

METHOD FOR ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF CROSS-LAMINATED TIMBER FLOOR STRUCTURES WITH VARIABLE SECTION PARAMETERS

Abstract. This paper presents a method for assessing the actual load-bearing capacity and stress-strain state (SSS) of cross-laminated timber (CLT) floor structures with variable section parameters. The method is based on a functional relationship between the natural frequency of oscillations and the maximum deflection of plates, expressed through a proportionality coefficient K . This coefficient remains constant for a given type of support conditions and has been numerically validated for multi-layer orthotropic CLT plates with various geometric configurations. Five different CLT panel types were tested in the study, each with varying layer geometries: three-layer solid sections, thickened longitudinal layers, thickened transverse layers, panels with gaps in transverse layers, and five-layer solid panels. All samples were simply supported along two sides. Natural frequencies, maximum deflections at the center of the structure, and normal stresses along the span under uniformly distributed loads were recorded experimentally. The multi-layer CLT structures were converted into an equivalent single-layer orthotropic plate using effective cylindrical stiffness values.

Calculations of maximum deflection and bending moments were performed using classical plate theory and verified against experimental data. Deflection deviations did not exceed 10%, while normal stress deviations remained within 13% for most cases, confirming high accuracy of the proposed method. A key feature of the method is its ability to assess structural performance without requiring precise knowledge of actual stiffness, relying solely on one dynamic parameter — the fundamental frequency of natural oscillations. This makes the method fast, safe, and cost-effective for field testing. It is particularly suitable for evaluating structures under the second group of limit states and, under certain conditions (e.g., neglecting shear stresses and stress concentrations), can be applied to the first group as well. Further research is recommended to expand the applicability of the method to different support conditions and aspect ratios of CLT panels.

Keywords: timber structures, cross-laminated timber, stress-strain state, load-bearing capacity.

1. Введение

В последние годы в России наблюдается устойчивый рост применения перекрёстно клееной древесины (ДПК, или CLT – от англ. cross-laminated timber) [1] в строительстве, особенно при монтаже перекрытий и стеновых панелей многоэтажных зданий. Этот тренд обусловлен рядом преимуществ древесины как конструкционного материала: высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, экологичностью и возможностью быстрого монтажа [2]. В отличие от традиционных материалов, таких как железобетон и сталь, ДПК сочетает в себе высокую несущую способность и лёгкость, что снижает нагрузку на фундаменты и сокращает сроки строительства.

В России развитие строительства из древесины перекрёстно клееной поддерживается как экологическими инициативами, так и экономическими факторами: доступностью лесных ресурсов и стремлением к всецелому развитию лесного комплекса страны [3]. Кроме того, древесина обладает естественной способностью к аккумуляции избытков углерода из атмосферы, что делает ДПК перспективным материалом в условиях роста запроса на экологически чистое строительство.

Особый интерес представляют перекрытия из древесины перекрёстно клееной в силу их критической роли в строительных конструкциях. В отличие от стеновых панелей, они работают в условиях сложного напряженного состояния, одновременно воспринимая изгибающие, сдвиговые и динамические нагрузки. Это определяет необходимость тщательного расчета их несущей способности и жесткости. При этом, особое значение имеет анализ влияния параметров отдельных слоев на напряженно-деформированное состояние перекрытий из ДПК, так как, меняя геометрические параметры слоев конструкции, можно подобрать наиболее подходящее по несущей способности сечение без излишнего перерасхода материала [4-6].

Ввиду того, что конструкции из ДПК представляют собой многослойные ортотропные плиты (т.е. такие, у которых упругие характеристики вдоль осей различаются), их расчет аналитическим способом является сложной задачей, из-за чего распространенным является подход к расчету с помощью упрощенных схем, в частности, балочной схемы [7-9]. Для более точного учета слоистости материала и разности свойств слоев используется, например, метод конечных элементов. Однако несмотря на высокую точность различных методов расчета, ни один из них не дает точной информации о фактической несущей способности конструкции. Более того, выбор самой расчетной схемы может существенно повлиять на полученные значения интегральных физико-механических характеристик, в следствие чего фактические значения могут существенно отличаться от рассчитанных.

Целью настоящего исследования является разработка методики, дающей удовлетворительную точность в оценке фактического напряженно-деформированного состояния конструкции из ДПК.

2. Модели и методы

Предлагаемая далее методика основывается на функциональной зависимости частоты собственных колебаний и максимального прогиба пластин, связанной через коэффициент пропорциональности K [10]. Данный коэффициент является постоянным для заданного вида условий опирания пластины и применимость закономерности для многослойных ортотропных плит из древесины клееной с различными видами геометрических параметров

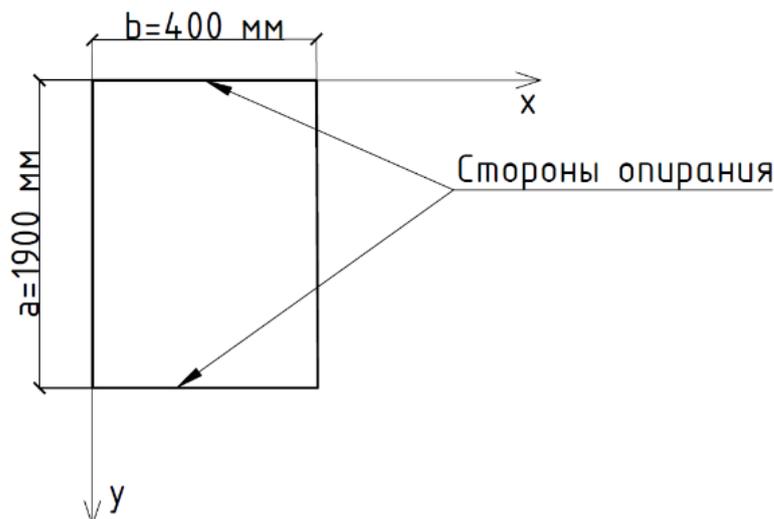


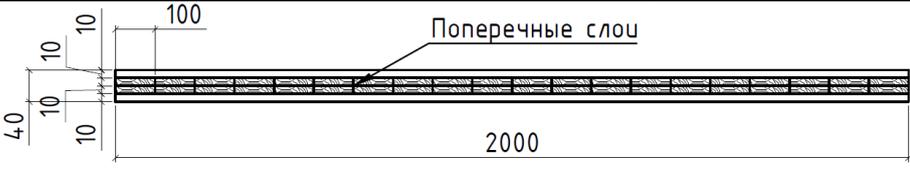
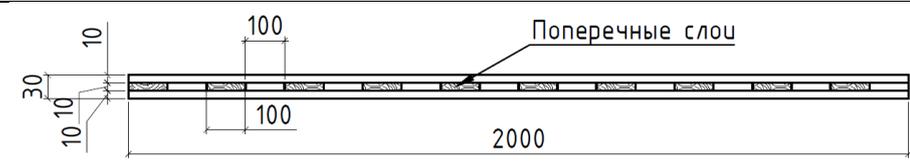
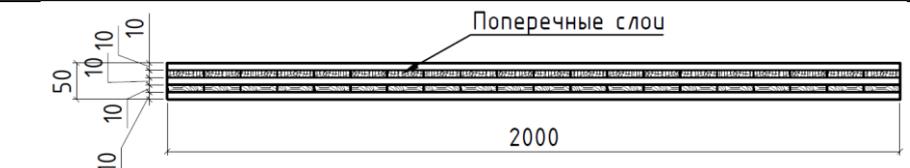
Рисунок 1 – Оси координат рассматриваемых образцов

численно подтверждена в исследованиях авторов [11-12]. Сама закономерность записывается так [13]: произведение максимального прогиба W_0 при действии равномерно распределенной нагрузки на квадрат основного тона частоты собственных колебаний ω в ненагруженном состоянии есть величина постоянная с точностью до размерного сомножителя q/t и равняется значению коэффициента пропорциональности K .

Для исследования авторами были испытаны 5 разных образцов плит из ДПК с варьируемыми геометрическими параметрами (таблица 1), шарнирно опертых по двум сторонам, для которых были получены значения основного тона частоты собственных колебаний, максимального прогиба в центре конструкции и нормального напряжения в центре конструкции, направленного вдоль пролета, от действия равномерно распределенной нагрузки. Размеры всех образцов в плане составляли: длина – 2000 мм, ширина всей плиты – 400 мм, ширина ламелей в слоях – 100 мм, толщина ламелей – 10 мм. Материал плиты – сосна. Величина пролета 1900 мм. (рисунок 1). Утолщение слоев достигалось приклеиванием дополнительных слоев ламелей в одном направлении

Таблица 1 – Образцы для испытаний

№ образца	Тип геометрии	Схема
1	Три слоя, сплошное сечение	<p>Рисунок 2 – Сечение образца №1</p>
2	Три слоя, утолщенные продольные слою	<p>Рисунок 3 – Сечение образца №2</p>

3	Три слоя, утолщенные поперечные слои	 <p style="text-align: center;"><i>Рисунок 4 – Сечение образца №3</i></p>
4	Три слоя, зазоры в поперечном слое	 <p style="text-align: center;"><i>Рисунок 5 – Сечение образца №4</i></p>
5	Пять слоев, сплошное сечение	 <p style="text-align: center;"><i>Рисунок 6 – Сечение образца №5</i></p>

Упругие характеристики слоям заданы в соответствии с нормативной документацией для выбранного сорта древесины (таблица 2).

Таблица 2 – Упругие характеристики ламелей в слоях

Направление волокон	$E_y, \text{кН/м}^2$	$E_x, \text{кН/м}^2$	$G_{xy}, \text{кН/м}^2$	ν_{xy}	ν_{yx}
Продольное	1×10^7	4×10^5	5×10^5	0,018	0,45
Поперечное	4×10^5	1×10^7	5×10^5	0,45	0,018

Описание методики по оценке реальной несущей способности перекрытий из древесины перекрестно клееной.

1. Необходимо определить частоту собственных колебаний перекрытия, при этом в расчетах используется значение основного тона. В данном исследовании показания снимались с прибора «ВИБРАН-3». По формуле (1) определяется значение круговой частоты:

$$\omega = 2 * \pi * f, \tag{1}$$

где f – техническая частота колебаний, полученная прибором.

2. По формуле (2), выведенной из закономерности, описанной ранее, определяется значение максимального прогиба W_{max} перекрытия:

$$W_{max} = \frac{Kq}{m\omega^2}, \tag{2}$$

где q – рассматриваемая равномерно распределенная нагрузка, кН/м; m – погонная масса конструкции, т/м; ω – частота собственных колебаний, рад/с; K – коэффициент пропорциональности (для рассматриваемого отношения длины пролета к ширине конструкции и заданного условия опирания – 1,26835).

3. Так как речь идет о многослойной плите с ортотропными свойствами как слоев по отдельности, так и всей конструкции в целом, необходимо привести её к однослойной постановке с эффективными значениями цилиндрических жесткостей. Для этого

воспользуемся формулами, предложенными в работе [14]. Положительная оценка применимости данного подхода проведена в работах [15, 16].

Эффективные цилиндрические жесткости однослойной ортотропной пластины $D_x^{eff}, D_y^{eff}, H^{eff}$ определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} D_x^{eff} &= \frac{2}{3} \left[\frac{E_x^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_x^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ D_y^{eff} &= \frac{2}{3} \left[\frac{E_y^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_y^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ H^{eff} &= D_1^{eff} + 2D_{xy}^{eff} \\ D_{xy}^{eff} &= \frac{2}{3} \left[G^{n+1} h_{n+1}^3 + \sum_{m=1}^n G^m (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ D_1^{eff} &= D_x^{eff} \nu_{yx}^{eff} = D_y^{eff} \nu_{xy}^{eff} \\ \nu_{xy}^{eff} &= \frac{2}{3D_y^{eff}} \left[\frac{E_y^{n+1} \nu_{xy}^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_y^m \nu_{xy}^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ \nu_{yx}^{eff} &= \nu_{xy}^{eff} \frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $2n + 1$ — число слоёв (крайние слои имеют номера 1 и $2n + 1$, средний слой имеет номер $n + 1$ — m -й по счету); h — общая толщина пластины; h_1, h_2, h_{n+1} — расстояния от срединной плоскости до границ слоёв (рисунок 7); $E_x^m, E_y^m, \nu_{xy}^m, \nu_{yx}^m, G^m$ — модули Юнга, коэффициенты Пуассона, модуль сдвига для m -го слоя с номером m .

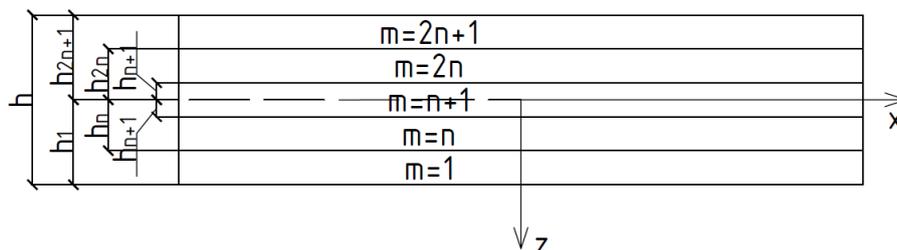


Рисунок 7 - Сечение многослойной пластины

4. В работах [17, 18] рекомендуется вычисление эффективного момента инерции I_{eff} сечения по следующей формуле:

$$I_{eff} = \sum \frac{E_i}{E_{ref}} \frac{b_i t_i^3}{12} + \sum \frac{E_i}{E_{ref}} b_i t_i a_i^2, \quad (4)$$

где E_i — модуль упругости i -го слоя, МПа; E_{ref} — нормировочный модуль упругости (принимается значение модуля упругости вдоль волокон E_0), МПа; b_i — ширина i -го слоя, мм; t_i — толщина слоя, мм; a_i — расстояние от центра тяжести i -го слоя до центра тяжести всего сечения, мм.

Для упрощения расчетов в соответствии с [19] можно не учитывать вклад поперечных слоёв.

5. После приведения многослойной конструкции к однослойной с эффективными цилиндрическими жесткостями $D_x^{eff}, D_y^{eff}, H^{eff}$, по формулам, предложенным для расчета свободно опертой пластины в работах [14, 20], можно вычислить значения максимального прогиба и изгибающих моментов:

$$\left. \begin{aligned} W_{max} &= \alpha \frac{q_0 a^4}{D_y} \\ M_x &= \left(\beta_1 + \beta_2 v_{yx}^{eff} \sqrt{\frac{D_x^{eff}}{D_y^{eff}}} \right) \frac{q_0 b^2}{\varepsilon} \\ M_y &= \left(\beta_2 + \beta_1 v_{xy}^{eff} \sqrt{\frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}}} \right) q_0 a^2 \\ \varepsilon &= \frac{a^{1/4}}{b} \sqrt{\frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Подставляя формулы, получим:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \left(\beta_1 + \beta_2 v_{yx}^{eff} \sqrt{\frac{D_x^{eff}}{D_y^{eff}}} \right) \frac{W_{max} D_y^{eff} b^2}{\alpha a^4 \varepsilon} \\ M_y &= \left(\beta_2 + \beta_1 v_{xy}^{eff} \sqrt{\frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}}} \right) \frac{W_{max} D_y^{eff}}{\alpha a^2} \\ \varepsilon &= \frac{a^{1/4}}{b} \sqrt{\frac{D_y^{eff}}{D_x^{eff}}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В данном исследовании проверялось только наибольшее значение изгибающего момента M_y . Важно учесть, что в данном случае получается значение погонного изгибающего момента, действующего на 1 м ширины конструкции (Н*мм/мм).

Значения коэффициентов α , β_1 и β_2 определяются в соответствии с таблицей 3. Промежуточные значения находят с помощью интерполяции.

Таблица 3 – Коэффициенты α , β_1 и β_2

ε	α	β_1	β_2
1,0	0,00407	0,03680	0,03680
1,5	0,00772	0,02800	0,07280
2,0	0,01013	0,01740	0,09640
2,5	0,01150	0,00990	0,11000
3,0	0,01282	0,00550	0,11720
5,0	0,01297	0,00040	0,12450
>5	0,01302	0,00000	0,12500

Важно отметить, что в литературе данные формулы и значения коэффициентов приведены для свободно опертой с 4 сторон пластины. Применение данного подхода оправдано и в рассматриваемом случае для двусторонне опертой пластины, так как для значения $\varepsilon > 5$ формулы упростятся до балочной постановки, а при $\varepsilon < 5$ коэффициенты позволят учесть ортотропию конструкции.

6. По значениям изгибающих моментов вычисляются нормальные напряжения (ниже приведена формула для наибольших напряжений σ_y , для σ_x – по аналогии):

$$\sigma_y = \frac{M_y}{I_x^{eff}} bZ, \quad (7)$$

где M_y – удельный изгибающий момент, Н*мм/мм; I_x^{eff} – эффективный момент инерции, мм⁴; b_i – ширина конструкции, мм; Z – расстояние от нейтральной оси до краевой поверхности плиты, мм.

Максимальный прогиб конструкции измерялся в центре пролета плиты с помощью двух индикаторов часового типа ИЧ-25. Нормальные напряжения в плите измерены с помощью тензометрического метода измерения напряжений, реализованного с использованием тензостанции ZET 017-Т.

3. Результаты исследования и их анализ

Эффективные жесткостные характеристики опытных образцов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Эффективные жесткостные характеристики образцов

№ образца	D_x^{eff} , Н*М	D_y^{eff} , Н*М	ν_{yx}^{eff}	ν_{xy}^{eff}	I_x^{eff} , мм ⁴
1	1714	21877	0,0088	0,0007	866667
2	5007	104211	0,003	0,0001	4133000
3	8603	47317	0,014	0,0026	1877000
4	1714	21877	0,009	0,0007	866667
5	25171	84047	0,075	0,0225	3300000

Экспериментальные данные для всех образцов, а также их сопоставление с результатами, полученными с помощью предложенной методики для разного значения нагрузки, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

№ образца	ω , рад/с	q , кН/м	$W_{max}^{эксп}$, мм	$W_{max}^{метод}$, мм	Отклонение W , %	$\sigma_y^{эксп}$, кН/м ²	$\sigma_y^{метод}$, кН/м ²	Отклонение σ , %
1	106,81	0,136	2,44	2,48	1,65	957,67	999,02	4,32
		0,246	4,83	4,49	-7,55	1966,67	1807,04	-8,83
		0,379	7,15	6,91	-3,45	2923,33	2784,02	-5,00
		0,489	9,45	8,92	-5,97	3850,00	3592,05	-7,18
2	177,81	0,246	1,03	0,94	-9,59	688,67	630,25	-9,27
		0,489	2,02	1,87	-8,12	1403,33	1252,81	-12,01
		0,734	3,02	2,80	-7,69	2126,67	1880,50	-13,09
		0,967	3,97	3,69	-7,45	2803,33	2477,45	-13,15
		1,207	4,80	4,61	-4,09	3480,00	3092,33	-12,54
3	135,09	0,246	2,05	1,98	-3,85	978,33	1009,24	3,16
		0,489	4,10	3,93	-4,32	1963,33	2006,18	2,18
		0,734	6,17	5,89	-4,70	2966,67	3011,32	1,51
		0,967	8,17	7,77	-5,20	3916,67	3967,23	1,29
4	110,58	0,136	2,76	2,77	0,45	1080,00	1114,74	3,22
		0,246	5,49	5,01	-9,60	2146,67	2016,38	-6,07
		0,379	8,22	7,71	-6,60	3206,67	3106,53	-3,12
		0,489	10,36	9,95	-4,08	4226,67	4008,16	-5,17
5	156,45	0,246	1,31	1,26	-4,07	780,00	811,35	4,02
		0,489	2,59	2,50	-3,71	1563,33	1612,80	3,16
		0,734	3,88	3,75	-3,53	2356,67	2420,85	2,72
		0,967	5,11	4,94	-3,47	3113,33	3189,32	2,44
		1,207	6,35	6,16	-3,11	3890,00	3980,88	2,34

Отклонения по максимальным экспериментальным и полученным с помощью расчета прогибам для всех образцов с разными геометрическими параметрами слоев составляют не более 10 %, что свидетельствует о высокой сходимости результатов. Также высокая сходимость результатов получена для нормальных напряжений, так как значение отклонений не превышает 13 %, при этом для большинства образцов отклонения еще ниже (менее 10%).

Несмотря на высокую сходимость экспериментальных и расчетных данных по нормальным напряжениям, стоит учитывать, что оценка напряженного состояния конструкции является более сложной задачей и для реальной оценки иногда необходимо иметь представление о поле напряжений во всей конструкции, а не в одной точке. Кроме того, в ситуациях, когда перекрытие из древесины перекрестно клееной имеет короткий пролет или отношение величины пролета к толщине перекрытия менее 6, важную роль начинают играть тангенциальные напряжения. В связи с этим, оценка по настоящей методике по первой группе предельных состояний является приближенной с точностью $\pm 15\%$ для типовых ситуаций.

Так же важным является факт, что для оценки по второй группе предельных состояний использовано значение коэффициента пропорциональности $K=1,26835$. В случае других условий опирания, например, по 4 сторонам, значение коэффициента будет несколько выше (не более $(4/\pi)^2$) [10]. Получение этого значения является перспективным направлением исследований, позволяющим расширить применимость данной методики.

При уточнениях и проведении большой научно-исследовательской работы с большей выборкой образцов с разными вариантами геометрии слоев и различным отношением сторон, предложенный подход мог бы стать дополнением к ГОСТ Р 57790-2017 «Конструкции деревянные. Методы испытаний на прочность и деформативность».

4. Заключение

1. Результаты настоящего исследования показали высокую сходимость экспериментальных данных и значений, полученных по предложенной методике. Ключевой особенностью методики является высокая точность получаемых значений, в частности, максимально прогиба конструкции перекрытий из древесины перекрестно клееной с различными сечениями при простоте, дешевизне, скорости и безопасности натуральных исследований, так как требует нахождения одного динамического параметра – основного тона частоты собственных колебаний конструкции.

2. Рассмотренная методика может быть использована для проверки соответствия перекрытий из древесины перекрестно клееной критериям второй группы предельных состояний, при этом она не требует определения значения фактической жесткости конструкции. Для оценки соответствия критериям первой группы предельных состояний данная методика применима для ряда типовых ситуаций, когда можно пренебречь касательными напряжениями и концентраторами напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56706-2022. Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия.
2. Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2016. – Vol. 74. – № 3. – P. 331–351.
3. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 312-р // *Официальный интернет-портал правовой информации*. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/> (дата обращения: 26.06.2025)
4. Трошин М.Ю., Турков А.В., Заев А.В. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, жестко защемленной с двух сторон. // *Строительство и реконструкция*. — 2024. — № 2. — С. 50-58. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-112-2-50-58.
5. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // *Вестник МГСУ*. — 2023. — Т. 18. Вып. 3. — С. 391-400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400.

6. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной // Строительство и реконструкция. — 2023. — № 3. — С. 35-41. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41.
7. Karacabeyli E., Gagnon S. Canadian CLT Handbook. Quebec: FPInnovations, 2019. 812 p.
8. Borgström E., Fröbel J. The CLT Handbook. CLT structures — facts and planning. Stockholm: Swedish Wood, 2019. 188 p.
9. Karacabeyli E., Douglas B. CLT Handbook: Cross-laminated timber. US Edition. Quebec: FPInnovations, 2013. 572 p.
10. Коробко В. И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок // Известия вузов. Строительство и архитектура. — 1989. — № 11. — С. 32–36.
11. Трошин М.Ю., Турков А.В. Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в 3-хслойной плите из ДПК при переменной величине зазоров в поперечном слое при различных граничных условиях // Строительство и реконструкция. — 2024. — № 4. — С. 56-63. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-114-4-56-63.
12. Трошин М.Ю., Коробко А.В. Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в пятислойной плите из ДПК при изменении шага ламелей в поперечных слоях // Эксперт: теория и практика. — 2024. — № 4 (27). — С. 105-109.
13. Коробко В.И., Коробко А.В. Строительная механика пластинок: Техническая теория. — М. : Спектр, 2010. — 409 с.
14. Лехницкий С. Г. Анизотропные пластинки. — М., Л. : Гостехиздат, 1947. — 355 с.
15. Глухих В. Н., Кондратьева Л. Н., Корсун В. И., Коваль П. С., Тихомиров Д. В. Исследование экспериментальных данных по изгибу CLT-плит, опертых по четырем сторонам // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15, № 6.
16. Тихомиров Д. В. Расчёт перекрытия из ДПК, опирающегося по четырём сторонам, с применением теории изгиба пластин // Инновации в деревянном строительстве : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. — Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2023. — С. 68–80.
17. Чебыкин А. А., Фрицлер Ю. А., Кудрявцев С. В. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2017. — № 2. — С. 83–85.
18. Мамедов Ш. М., Шабикова Е. Г., Нижегородцев Д. В., Казакевич Т. Н. Методика расчета панелей из перекрестно-клееной древесины // Вестник гражданских инженеров. — 2020. — № 5(82). — С. 66–71. — DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71.
19. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.
20. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. — М. : Наука, 1966. — 636 с.

REFERENCES

1. Cross-laminated timber panels. General technical specifications. GOST R 56706-2022. (rus)
2. Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. Vol. 74. No. 3. Pp. 331-351. DOI: 10.1007/s00107-016-1072-8
3. Strategy for the development of the forestry complex of the Russian Federation until 2030. Approved by Government Decree No. 312-r dated February 11, 2021. Official internet portal of legal information. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/> (accessed: 26.06.2025). (rus)
4. Troshin M.Yu., Turkov A.V., Zaev A.V. Effect of board spacing in the transverse layer on deformability and stress distribution in a three-layer CLT panel rigidly clamped on both sides. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2024. No. 2. Pp. 50-58. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-112-2-50-58. (rus)
5. Troshin M.Yu., Turkov A.V. Influence of thickness of cross and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer cross-laminated timber boards. *Vestnik MGSU*. 2023. Vol. 18. Issue 3. Pp. 391-400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400. (rus)
6. Troshin M.Yu., Turkov A.V. Effect of spacing of cross layers on deformability and stress distribution in five-layer cross-laminated timber boards. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2023. No. 3. Pp. 35-41. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41. (rus)
7. Karacabeyli E., Gagnon S. Canadian CLT Handbook. Quebec: FPInnovations, 2019. 812 p.
8. Borgström E., Fröbel J. The CLT Handbook. CLT structures - facts and planning. Stockholm: Swedish Wood, 2019. 188 p.
9. Karacabeyli E., Douglas B. CLT Handbook: Cross-laminated timber. US Edition. Quebec: FPInnovations, 2013. 572 p.
10. Korobko V.I. On a "remarkable" regularity in the theory of elastic plates. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1989. No. 11. Pp. 32-36. (rus)

11. Troshin M.Yu., Turkov A.V. Relationship between maximum deflection and natural frequency in a three-layer CLT plate with variable gaps in the transverse layer under different boundary conditions. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2024. No. 4. Pp. 56-63. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-114-4-56-63. (rus)
12. Troshin M.Yu., Korobko A.V. Relationship between maximum deflection and natural frequency in a five-layer CLT plate with varying spacing of lamellas in transverse layers. *Ekspert: teoriya i praktika*. 2024. No. 4 (27). Pp. 105-109. (rus)
13. Korobko V.I., Korobko A.V. Structural mechanics of plates: Technical theory. Moscow: Spektr, 2010. 409 p. (rus)
14. Lekhnitsky S.G. Anisotropic Plates. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1947. 355 p. (rus)
15. Glukhikh V.N., Kondratyeva L.N., Korsun V.I., Koval' P.S., Tikhomirov D.V. Study of experimental data on bending of CLT panels supported on four sides. *Vestnik evraziyskoy nauki*. 2023. Vol. 15. No. 6. (rus)
16. Tikhomirov D.V. Calculation of CLT floor slab supported on four sides using plate bending theory. *Innovatsii v dereviannom stroitel'stve: Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Saint Petersburg: SPbGASU, 2023. Pp. 68-80. (rus)
17. Chebykin A.A., Fritsler Yu.A., Kudriavtsev S.V. Determination of design characteristics of cross-laminated timber panel sections made of crossed boards. *Akademicheskii vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2017. No. 2. Pp. 83-85. (rus)
18. Mamedov Sh.M., Shabikova E.G., Nizhegorodtsev D.V., Kazakevich T.N. Methodology for calculating cross-laminated timber panels. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2020. No. 5(82). Pp. 66-71. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71. (rus)
19. SP 64.13330.2017 Timber Structures. Updated version of SNiP II-25-80. SP 64.13330.2017. (rus)
20. Timoshenko S.P., Voinovsky-Kriger S. Plates and shells. Moscow: Nauka, 1966. 636 p. (rus)

Информация об авторах:

Трошин Михаил Юрьевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия, аспирант кафедры строительных конструкций и материалов.

E-mail: mtr997@mail.ru

Коробко Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов.

E-mail: ankor.66@mail.ru

Information about authors:

Troshin Mikhail Yu.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia, postgraduate student, of the department of Building Structures and Materials.

E-mail: mtr997@mail.ru

Korobko Andrey V.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of Building Structures and Materials.

E-mail: ankor.66@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 11.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025