

# КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.078.4; 624.011.2

## ТРЕХСЛОЙНАЯ РЕБРИСТАЯ ПАНЕЛЬ НА ПОДАТЛИВЫХ СВЯЗЯХ

**Е. В. Попов, П. М. Тропина, Н. А. Шиловская, А. В. Русланова,  
Б. В. Лабудин, В. И. Мелехов**

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова  
(г. Архангельск)*

*Аннотация.* Ребристые плиты и панели с обшивками из плитных и листовых материалов на основе древесины можно использовать при строительстве гражданских, промышленных и сельскохозяйственных зданий и сооружений. Они являются универсальными ограждающими и несущими конструкциями, могут использоваться в качестве покрытий, перекрытий, стенового ограждения. Плиты покрытий выполняют одновременно функции прогонов, настила, подшивки, обеспечивают теплозащиту здания (при наличии в конструкции панели утеплителя) и являются горизонтальными дисками жесткости.

В статье приводится методика расчета ребристых трехслойных панелей, выполненных с обшивками из плитных материалов на основе древесины, а ребер – из конструкционных пиломатериалов. Особенностью этих панелей из составных элементов является применение упругодеформируемых связей типа винтов, гвоздей, скоб, а также комбинированных соединений с повышенной сдвигоустойчивостью на основе когтевой шайбы. Традиционные виды механических связей элементов деревянных конструкций не позволяют достичь эффективного вовлечения обшивок в работу всей конструкции. Исследования в области повышения сдвигоустойчивости механических соединений обшивок и ребер с использованием коннекторов отсутствуют. Для максимального включения обшивок в работу конструкции панелей традиционно применяется жесткое клеевое соединение.

В основу расчета трехслойных ребристых панелей положена теория расчета составных стержней и пластинок А. Р. Ржаницына, в которой распределение сдвигающих усилий на границах элементов описывается системой дифференциальных уравнений. В соответствии с условиями опирания выбраны начальные и граничные условия. Система дифференциальных уравнений решена аналитически методом Эйлера. В общем виде получены выражения для определения сдвигающих усилий в швах с учетом заранее заданных начальных и граничных условий для шарнирно-опертой панели, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, в которой обшивки крепятся к ребрам на податливых связях. Приводится пример расчета на прочность деревокомпозитной плитно-ребристой панели с упругодеформируемыми соединениями обшивок и ребер на винтах.

*Ключевые слова:* деревокомпозитные ребристые панели; механические соединения; прочность; жесткость; податливость; сдвиг.

### **Введение**

Для наиболее эффективного включения обшивки в общую работу панелей на деревянном каркасе традиционно применяется жесткое клеевое соединение на границе ребро–обшивка [1-4]. Однако проведенные экспериментально-теоретические исследования [5-8] показали целесообразность учета об-

шивки при креплении её к ребрам с использованием современных податливых механических связей, а применение связей с повышенным сопротивлением продольному сдвигу [9] позволяет применять их в качестве альтернативы клеевым соединениям [10, 11].

### **Цель и задачи исследования**

Приведенная в нормах [12, 13] методика

расчета панелей на деревянном каркасе (рис. 1) предусматривает их расчет как цельного сечения без учета податливости связей на границе ребро–обшивка, что вносит значительную погрешность при оценке напряженно-деформированного состояния таких конструкций. В работах [14, 15] приведена методика учета податливости соединения обшивки и ребра при расчете плитно-ребристых конструкций, однако рассматриваются только плиты с верхней обшивкой, а представленная в статье [16] трехслойная панель симметрична относительно центра тяжести ребер.

Таким образом, предлагаемая методика расчета трехслойных панелей с учетом податливости на границе ребро–обшивка решает актуальную задачу расчета в общем виде трехслойных ребристых панельных конструк-

ций, рассчитываемых по балочной схеме. При этом панель может быть как «холодной», так и с утеплителем в межреберном пространстве.

### Методы

При расчете панелей [12] фактическое поперечное сечение заменяется приведенным (рис. 2). Расчетная (приведенная) ширина сечения обшивки панели вычисляется путем умножения фактической ширины  $b_{факт}$  на редуцированный коэффициент  $k_{ред}$ :

$$b_{ред} = k_{ред} \cdot b_{факт}, \quad (1)$$

где  $k_{ред}$  – коэффициент приведения (редукции), определяемый для фанерных обшивок согласно [12], для обшивок из других листовых древесных материалов по [17];  $b_{факт}$  – фактическая (габаритная) ширина обшивки.

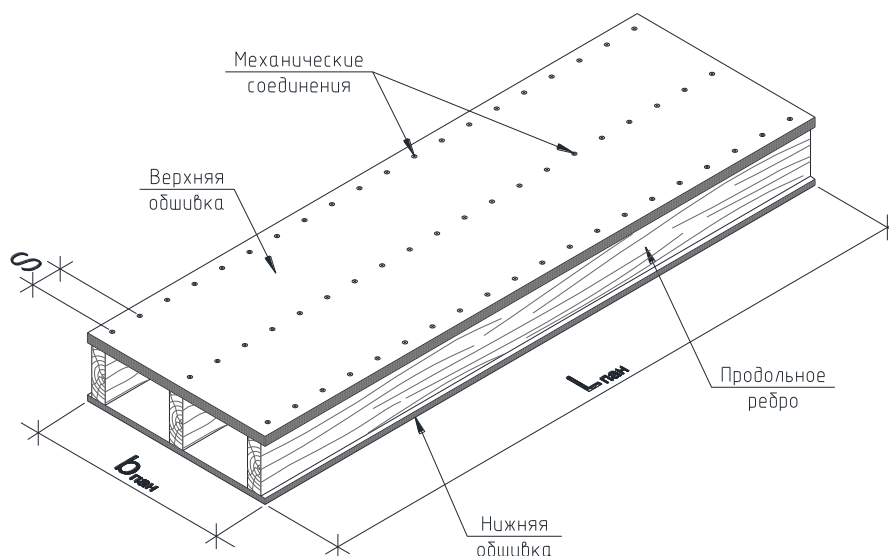


Рис. 1. Конструкция деревокомпозитной трехслойной ребристой панели

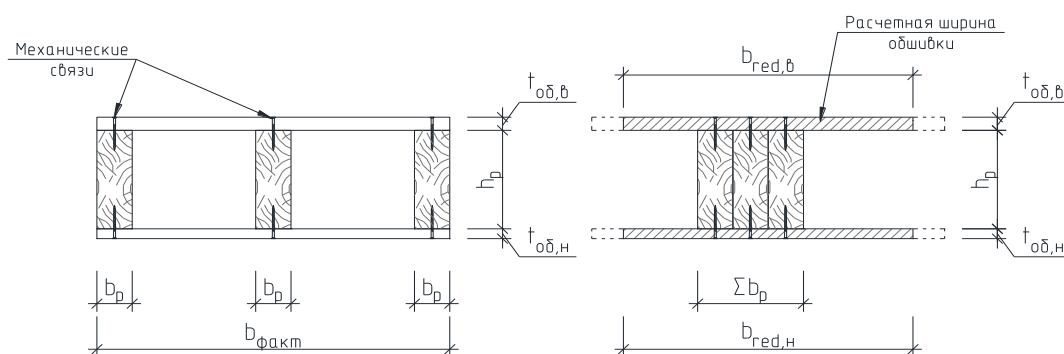


Рис. 2. Схема поперечного сечения трехслойной панели: слева – фактическое сечение, справа – приведенное тавровое сечение

Рассмотрим конструктивную систему как составную двутавровую балку, нагруженную внешней нагрузкой  $q$ , приведенной к погонной нагрузке, приложенной в плоскости ребер. Система дифференциальных уравнений равновесия для 3-слойного составного элемента согласно [18] имеет вид

$$\begin{cases} \frac{T_1''}{\xi_1} = \Delta_{11}T_1 + \Delta_{12}T_2 + \Delta_{10}; \\ \frac{T_2''}{\xi_2} = \Delta_{21}T_1 + \Delta_{22}T_2 + \Delta_{20}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{2}(\xi_1\Delta_{11} + \xi_2\Delta_{22} \pm \sqrt{(\xi_1\Delta_{11} - \xi_2\Delta_{22})^2 + 4\Delta_{12}^2\xi_1\xi_2})}. \quad (5)$$

Функции обобщенных неизвестных усилий в швах  $\bar{T}_1$  и  $\bar{T}_2$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{T}_1 &= A_1 \operatorname{sh}(\lambda_1 x) + B_1 \operatorname{ch}(\lambda_1 x) + \int_0^x R_1(t) \operatorname{sh}[\lambda_1 \cdot (x-t)] dt; \\ \bar{T}_2 &= A_2 \operatorname{sh}(\lambda_2 x) + B_2 \operatorname{ch}(\lambda_2 x) + \int_0^x R_2(t) \operatorname{sh}[\lambda_2 \cdot (x-t)] dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Для перехода от функций  $\bar{T}_1$  и  $\bar{T}_2$  к сдвигающим усилиям  $T_1(x)$  и  $T_2(x)$  используем выражения

$$\begin{aligned} T_1(x) &= \sqrt{\xi_1} \cdot \cos \varphi \cdot \bar{T}_1 - \sqrt{\xi_1} \cdot \sin \varphi \cdot \bar{T}_2; \\ T_2(x) &= \sqrt{\xi_2} \cdot \sin \varphi \cdot \bar{T}_1 + \sqrt{\xi_2} \cdot \cos \varphi \cdot \bar{T}_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Угол  $\varphi$  определяется по формуле

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{\lambda_1^2 - \xi_1 \cdot \Delta_{11}}{\xi_1 \cdot \Delta_{12}} \right). \quad (8)$$

Для ребристой деревокомпозитной панели с двумя обшивками запишем величины, входящие в (2):  $\xi_1, \xi_2$  – коэффициенты жесткости швов, определяемые по формуле (9);  $\Delta_{11}, \Delta_{22}, \Delta_{12}, \Delta_{21}, \Delta_{10}, \Delta_{20}$  – коэффициенты и свободные члены уравнений (2), определяемые по формулам (10).

$$\xi = \frac{n \cdot c_c}{S_{cs}}, \quad (9)$$

где  $c_c$  – коэффициент жесткости соединения, определяемый экспериментально;  $S_c$  – шаг

Данная система уравнений может быть представлена двумя независимыми уравнениями для обобщенных неизвестных усилий в швах  $\bar{T}_{1,2}$ :

$$\bar{T}_1'' = \lambda_1^2 \bar{T}_1 + \bar{R}_1; \quad \bar{T}_2'' = \lambda_2^2 \bar{T}_2 + \bar{R}_2, \quad (3)$$

где  $\bar{R}_{1,2}$  – обобщенные нагрузочные члены, определяемые выражениями (4);  $\lambda_{1,2}$  – характеристические числа, определяемые по (5);

$$\begin{aligned} \bar{R}_1 &= \sqrt{\xi_1} \Delta_{10} \cos \varphi + \sqrt{\xi_2} \Delta_{20} \sin \varphi; \\ \bar{R}_2 &= -\sqrt{\xi_1} \Delta_{10} \sin \varphi + \sqrt{\xi_2} \Delta_{20} \cos \varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

соединений,  $n$  – количество ребер.

$$\begin{aligned} \Delta_{11} &= \frac{1}{E_{об,с} I_{об,с}} + \frac{1}{E_p I_p} + \frac{c_1^2}{\Sigma EI}; \\ \Delta_{22} &= \frac{1}{E_{об,н} I_{об,н}} + \frac{1}{E_p I_p} + \frac{c_2^2}{\Sigma EI}; \\ \Delta_{12} = \Delta_{21} &= -\frac{1}{E_p I_p} + \frac{c_1 c_2}{\Sigma EI}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Delta_{10} = -\frac{M^0(t) \cdot c_1}{\Sigma EI}; \quad \Delta_{20} = -\frac{M^0(t) \cdot c_2}{\Sigma EI}, \quad (11)$$

где  $E_{об,с}; E_{об,н}; E_p$  – модули упругости материала верхней обшивки, нижней обшивки и ребра соответственно;  $I_{об,с}; I_{об,н}; I_p$  – моменты инерции;  $\Sigma EI$  – сумма изгибных жесткостей элементов без учета связей сдвига;  $c_1, c_2$  – расстояние между центром тяжести ребра и верхней/нижней обшивкой соответственно;  $M^0(t)$  – функция изгибающего момента в панели от внешней нагрузки в зави-

симости от координаты  $t$ , отсчитываемой от левой опоры:

$$M^0(t) = \frac{q \cdot l \cdot t}{2} - \frac{q \cdot t^2}{2}, \quad (12)$$

где  $l$  – расчетный пролет панели;  $q$  – равномерно распределенная нагрузка на панель, приведенная к погонной.

Подставляя выражения (4) и (12) в (6) и интегрируя правую часть выражений, получаем уравнения

$$\bar{T}_1(x) = A_1 \operatorname{sh}(\lambda_1 x) + B_1 \operatorname{ch}(\lambda_1 x) - \frac{0,5q \left( c_1 \sqrt{\xi_1} \cos \varphi + c_2 \sqrt{\xi_2} \sin \varphi \right) \cdot \left( -2\operatorname{ch}(\lambda_1 x) + \lambda_1^2 x^2 + l\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1 x) - l\lambda_1^2 x + 2 \right)}{\lambda_1^4 \Sigma EI}, \quad (13)$$

$$\bar{T}_2(x) = A_2 \operatorname{sh}(\lambda_2 x) + B_2 \operatorname{ch}(\lambda_2 x) - \frac{0,5q \left( c_2 \sqrt{\xi_2} \cos \varphi - c_1 \sqrt{\xi_1} \sin \varphi \right) \cdot \left( -2\operatorname{ch}(\lambda_2 x) + \lambda_2^2 x^2 + l\lambda_2 \operatorname{sh}(\lambda_2 x) - l\lambda_2^2 x + 2 \right)}{\lambda_2^4 \Sigma EI}. \quad (14)$$

Произвольные постоянные  $A_i$  и  $B_i$  определяются из граничных условий (сдвигающие усилия на опорах без препятствий сдвигу равны 0):

$$\begin{aligned} x = 0 &\rightarrow \bar{T}_1(0) = \bar{T}_2(0) = 0; \\ x = l &\rightarrow \bar{T}_1(l) = \bar{T}_2(l) = 0. \end{aligned}$$

Подставляя граничные условия в выражения (13) и (14), получаем систему уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} & B_1 = 0; \\ & B_2 = 0; \\ & \frac{A_1 \operatorname{sh}(l\lambda_1) + B_1 \operatorname{ch}(l\lambda_1) - 0,5q \left( c_1 \sqrt{\xi_1} \cos \varphi + c_2 \sqrt{\xi_2} \sin \varphi \right) \cdot \left( -2\operatorname{ch}(l\lambda_1) + \lambda_1^2 l^2 + l\lambda_1 \operatorname{sh}(l\lambda_1) - l\lambda_1^2 l + 2 \right)}{\lambda_1^4 \Sigma EI} = 0; \\ & \frac{A_2 \operatorname{sh}(l\lambda_2) + B_2 \operatorname{ch}(l\lambda_2) - 0,5q \left( c_2 \sqrt{\xi_2} \cos \varphi - c_1 \sqrt{\xi_1} \sin \varphi \right) \cdot \left( -2\operatorname{ch}(l\lambda_2) + \lambda_2^2 l^2 + l\lambda_2 \operatorname{sh}(l\lambda_2) - l\lambda_2^2 l + 2 \right)}{\lambda_2^4 \Sigma EI} = 0, \end{aligned} \right. \quad (15)$$

решая которую, получаем

$$A_1 = \frac{0,5}{\Sigma EI \lambda_1^4 \cdot \operatorname{sh}(l \cdot \lambda_1)} \left( 2c_1 q \sqrt{\xi_1} \cos \varphi + 2c_2 q \sqrt{\xi_2} \sin \varphi - 2c_1 q \sqrt{\xi_1} \operatorname{ch}(l\lambda_1) \cos \varphi - 2c_2 q \sqrt{\xi_2} \operatorname{ch}(l\lambda_1) \sin \varphi + c_1 l q \lambda_1 \sqrt{\xi_1} \operatorname{sh}(l\lambda_1) \cos \varphi + c_2 l q \lambda_1 \sqrt{\xi_2} \operatorname{sh}(l\lambda_1) \sin \varphi \right); \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{0,5}{\Sigma EI \cdot \lambda_2^4 \cdot \operatorname{sh}(l\lambda_2)} \left( 2c_2 q \sqrt{\xi_2} \cos \varphi + 2c_1 q \sqrt{\xi_1} \sin \varphi - 2c_2 q \sqrt{\xi_2} \operatorname{ch}(l\lambda_2) \cos \varphi + 2c_1 q \sqrt{\xi_1} \operatorname{ch}(l\lambda_2) \sin \varphi + c_2 l q \lambda_2 \sqrt{\xi_2} \operatorname{sh}(l\lambda_2) \cos \varphi - c_1 l q \lambda_2 \sqrt{\xi_1} \operatorname{sh}(l\lambda_2) \sin \varphi \right). \quad (17)$$

Подставляя полученные решения системы уравнений в (13) и (14), получаем выра-

жения для определения обобщенных неизвестных  $\bar{T}_{1,2}(x)$ :

$$\bar{T}_1(x) = \frac{q \left( c_1 \sqrt{\xi_1} \cos \varphi + c_2 \sqrt{\xi_2} \sin \varphi \right)}{2EI\lambda_1^4} \times \left( \frac{\left( 2(1 - \operatorname{ch}(\lambda_1)) + \lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1) \right) \operatorname{sh}(x\lambda_1)}{\operatorname{sh}(\lambda_1)} - \left( 2(1 - \operatorname{ch}(\lambda_1)) + \lambda_1^2 x^2 + \lambda_1 \operatorname{sh}(x\lambda_1) - \lambda_1^2 x \right) \right); \quad (18)$$

$$\bar{T}_2(x) = \frac{q \left( c_2 \sqrt{\xi_2} \cos \varphi - c_1 \sqrt{\xi_1} \sin \varphi \right)}{2EI\lambda_2^4} \times \left( \frac{\left( 2(1 - \operatorname{ch}(\lambda_2)) + \lambda_2 \operatorname{sh}(\lambda_2) \right) \operatorname{sh}(x\lambda_2)}{\operatorname{sh}(\lambda_2)} - \left( 2(1 - \operatorname{ch}(\lambda_2)) + \lambda_2^2 x^2 + \lambda_2 \operatorname{sh}(x\lambda_2) - \lambda_2^2 x \right) \right), \quad (19)$$

которые при подстановке в (7), позволяют вычислить сдвигающие усилия в верхнем и ниж-

нем швах панели в любом заданном значении координаты  $x$  рассматриваемого сечения.

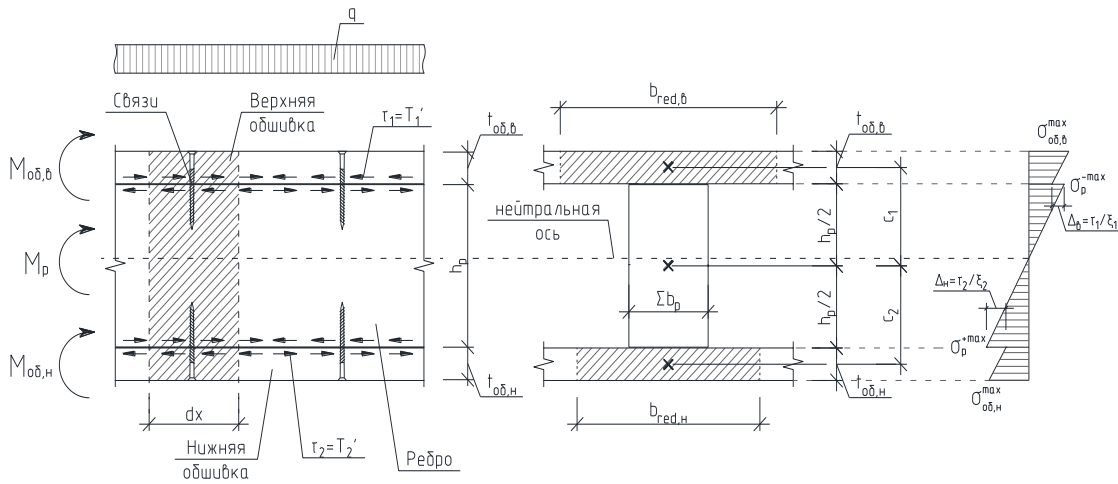


Рис. 3. К расчету прочности панели с упругоподатливыми связями сдвига

Далее определяются изгибающие моменты в верхней и нижней обшивках и ребре с учетом работы связей сдвига:

• в обшивках

$$M_{об,в} = \frac{M^0 \cdot (E_{об,в} \cdot I_{об,в})}{\Sigma EI} - \frac{(T_1 \cdot c_1 + T_2 \cdot c_2) \cdot E_{об,в} \cdot I_{об,в}}{\Sigma EI}, \quad (20)$$

$$M_{об,н} = \frac{M^0 \cdot (E_{об,н} \cdot I_{об,н})}{\Sigma EI} - \frac{(T_1 \cdot c_1 + T_2 \cdot c_2) \cdot E_{об,н} \cdot I_{об,н}}{\Sigma EI}. \quad (21)$$

• в ребрах:

$$M_p = \frac{M^0 \cdot (E_p \cdot I_p)}{\Sigma EI} - \frac{(T_1 \cdot c_1 + T_2 \cdot c_2) \cdot E_p \cdot I_p}{\Sigma EI}. \quad (22)$$

Тогда нормальные напряжения в обшивках и ребрах будут соответственно

$$\sigma_{об,в} = \frac{-T_1}{A_{об,в}} \pm \frac{M_{об,в} \cdot 0,5 \cdot t_{об,в}}{I_{об,в}}, \quad (23)$$

$$\sigma_{об,н} = \frac{T_2}{A_{об,н}} \pm \frac{M_{об,н} \cdot 0,5 \cdot t_{об,н}}{I_{об,н}}, \quad (24)$$

$$\sigma_p = \frac{-T_1 + T_2}{A_p} \pm \frac{M_{об,п} \cdot 0,5 \cdot t_{об,п}}{I_{об,п}}. \quad (25)$$

Эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении панели имеет особенность (рис. 3) – скачок напряжений на границе между ребром и обшивками. Величина скачка определяется из выражения

$$\Delta_i = \tau_i(x) / \xi_i, \quad (26)$$

где  $\tau_i(x)$  – сдвигающие напряжения;  $\xi_i$  – ко-

ээффициенты жесткости швов;  $i$  – верхний или нижний шов.

Для перехода к максимальным значениям напряжений для оценки прочности и устойчивости обшивок следует использовать выражение

$$\sigma_{об,i}^{\max} = \frac{\sigma_{об,i}}{k_{ред,i}}. \quad (27)$$

Для верхних сжатых обшивок дополнительно выполняется проверка устойчивости и прочности при местном сосредоточенном нагружении согласно требованиям, изложенным в [12].

Представленное решение рассмотрим на конкретном примере: деревокомпозитная панель с обшивкой из фанеры ФК по ГОСТ 3916.1–96, габаритные размеры  $1,25 \times 3$  м с тремя продольными ребрами (сосна/ель, сорт II), шарнирно-опертая по концам на балки перекрытия. Толщина верхней обшивки 18 мм, нижней – 15 мм, сечение ребер  $50 \times 150$  мм. Обшивка соединена с ребрами податливыми соединениями на винтах (шаг винтов крепления верхней обшивки – 100 мм, нижней – 200 мм). На панель действует нагрузка от собственного веса элементов, подшивки и полезная нагрузка ( $\sum q = 3$  кН/п.м.). Требуется проверить прочность ребер и обшивок.

*Решение.* Расчетную ширину обшивки определяем по формуле (1), коэффициент редуции принимаем согласно [12] ( $k_{ред} = 0,15 \cdot 3 / 0,6 = 0,75$ ):  $b_{ред} = 0,75 \cdot 1250 \approx 950$  мм.

Определяем моменты инерции обшивки и ребра:

$$I_{об,в} = \frac{0,95 \cdot 0,018^3}{12} = 4,62 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4;$$

$$I_{об,н} = \frac{0,95 \cdot 0,015^3}{12} = 2,67 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4;$$

$$I_p = \frac{(3 \cdot 0,05) \cdot 0,15^3}{12} = 4,22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4.$$

Сумма жесткостей обшивки и ребра без учета связей сдвига

$$\sum EI = 9 \cdot 10^6 \cdot 4,62 \cdot 10^{-7} + 10 \cdot 10^6 \cdot 4,22 \cdot 10^{-5} + 9 \cdot 10^6 \cdot 2,67 \cdot 10^{-7} = 428,56 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

Значение жесткости 1 связи принимаем на основании экспериментальных исследований [9] ( $c_c = 610$  кН/м). Коэффициенты жесткости связей сдвига приводим к равномерно-распределенным, используя формулу (9):

$$\xi_1 = \frac{3 \cdot 610}{0,1} = 18300 \text{ кН/п.м};$$

$$\xi_2 = \frac{3 \cdot 610}{0,2} = 9150 \text{ кН/п.м}.$$

Определяем коэффициенты и свободные члены уравнений (2) по формулам (10) и (11):

$$\Delta_{11} = 2,741 \cdot 10^{-5}; \Delta_{12} = 1,173 \cdot 10^{-5};$$

$$\Delta_{12} = \Delta_{21} = 1,173 \cdot 10^{-5};$$

$$\Delta_{10} = -6,617 \cdot 10^{-4}; \Delta_{20} = -6,499 \cdot 10^{-4}.$$

Определяем характеристические числа  $\lambda_{1,2}$  по формуле (5) и угол  $\varphi$  по формуле (8):

$$\lambda_1 = 0,775; \lambda_2 = 0,432; \varphi = 24,48^\circ.$$

По формулам (18) и (19) находим значения обобщенных неизвестных усилий  $\bar{T}_1$  и  $\bar{T}_2$ , а затем, используя выражения (7), – сдвигающие усилия в швах в наиболее опасном сечении панели (в середине полета) при  $x = 1,5$ :

$$\bar{T}_1(1,5) = 0,066; \bar{T}_2(1,5) = 0,015;$$

$$T_1(1,5) = 7,52 \text{ кН}; T_2(1,5) = 3,91 \text{ кН}.$$

Момент в панели от внешней нагрузки

$$M^0 = \frac{3 \cdot 3^2}{8} = 3,38 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Далее по формулам (20), (21) и (22) определяем изгибающие моменты в верхней и нижней обшивках и ребре с учетом работы связей сдвига:

$$M_{об,в} = 0,023 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_{об,н} = 0,014 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_p = 2,384 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Находим также нормальные напряжения в сжатой и растянутой зонах обшивок и ребер по формулам (23), (24), (25):

$$\sigma_{об,в}^- = -897,06 \text{ кПа}; \sigma_{об,в}^+ = 18,07 \text{ кПа};$$

$$\sigma_{об,н}^- = -106,75 \text{ кПа}; \sigma_{об,н}^+ = 655,86 \text{ кПа};$$

$$\sigma_p^- = -4077 \text{ кПа}; \sigma_p^+ = 4397 \text{ кПа}.$$

Используя выражение (27), осуществим переход к максимальным значениям напряжений для обшивок:

$$\sigma_{об,е}^{max-} = \frac{-897,06}{0,75} = 1196,1 \text{ кПа};$$

$$\sigma_{об,е}^{max+} = \frac{18,07}{0,75} = 24,09 \text{ кПа};$$

$$\sigma_{об,н}^{max-} = \frac{-106,75}{0,75} = -142,33 \text{ кПа};$$

$$\sigma_{об,н}^{max+} = \frac{-655,86}{0,75} = 874,48 \text{ кПа}.$$

Полученные значения напряжений в элементах панели позволяют выполнить сопоставление с расчетными сопротивлениями материалов и оценить прочность рассматриваемой конструкции.

#### Выводы

Представленная методика расчета позволяет уточнить напряженно-деформированное состояние и произвести оценку прочности деревокомпозитных ребристых панелей с учетом податливости механических соединений крепления обшивок к ребрам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тисевич Е. К. Сжато-изгибаемые клефанерные стеновые панели с обшивкой, включенной в общую работу конструкции: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2008. 23 с.
2. Украинченко Д. А. Деревянные унифицированные панельные конструкции с клеодощатой обшивкой: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2011. 21 с.
3. Жаданов В. И. Малоэтажные здания и сооружения из совмещённых ребристых конструкций на основе древесины: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2008. 38 с.
4. Никитин В. М. Крупноразмерные ребристые плиты с комбинированной обшивкой для покрытий зданий: дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2009. 138 с.
5. Черных А. С. Совершенствование конструкции и технологии производства стеновых панелей с деревянным каркасом: дисс. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2014. 168 с.
6. Механиков В. М. Соединение элементов в конструкциях с применением ЦСП: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1995. 137 с.
7. Кавелин А. С. Исследование работы на сдвиг гвоздевого соединения обшивки и ребра деревянной стеновой панели // Строительство-2014: Современные проблемы промышленного и гражданского строительства: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Институт промышленного и гражданского строительства. 2014. С. 98-100.
8. Исследование прочности стеновых панелей на деревянном каркасе для условий крайнего севера / Б. В. Лабудин, С. А. Воронков, А. П. Гмырина, А. П. Русланова // Строительная наука – XXI век. Теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону: сборник трудов междунар. науч.-техн. конф., г. Архангельск, 28-30 июня 2015 г. / под ред. Б. В. Лабудина. СПб.: Свое издательство, 2015. С. 187-193.
9. О повышении сдвигоустойчивости податливых связей составных деревянных конструкций на когтевых шайбах «Bulldog» / Е. В. Попов, Т. В. Тюрикова, Б. В. Лабудин, В. И. Мелехов // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 4. С. 23-28.
10. Влияние жесткости связей сдвига при расчете ребристых панелей на деревянном каркасе / Е. В. Попов, В. В. Филиппов, В. И. Мелехов, Б. В. Лабудин, Т. В. Тюрикова // Лесной журнал. Архангельск, 2016. № 4. С. 123-134.
11. Экспериментальные исследования жесткости связей на напряженно-деформированное состояние панелей на деревянном каркасе / Е. В. Попов, В. В. Филиппов, Т. П. Журавлева, В. И. Мелехов, Б. В. Лабудин // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений, 24-25 ноября 2016 г. / Курск. гос. университет. Курск, 2016. С. 111-116.
12. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81. Москва, 2011. 66 с.
13. Рекомендации по проектированию панельных конструкций с применением древесины и древесных материалов для производственных зданий / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1982. 120 с.
14. Лабудин Б. В. Расчет плитно-ребристых конструкций с упруго-податливыми связями // Лесной журнал. 1992. № 1. С. 67-72.
15. Инженерный расчет ребристых деревокомпозитных панелей с упругодеформируемыми связями / Е. В. Попов, Т. В. Тюрикова, Д. А. Поликарпов, П. М. Тропина, Б. В. Лабудин, В. И. Мелехов // Наука сегодня. Теоретические и практические аспекты: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Вологда, 28 дек. 2016 г. Часть 1. Вологда, 2017. С. 53-57.

16. Расчет трехслойных ребристых деревокомпозитных панелей с упругодеформируемыми связями / Е. В. Попов, В. И. Мелехов, Н. А. Шиловская, П. М. Тропина, Е. А. Мяшикова // Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс: сборник научных трудов № 21 / Одесская государственная академия строительства и архитектуры. Одесса, 2017. С. 58-65.
17. DIN EN 1995-1-1/A2-2014 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings; German version EN 1995-1-1:2004/A2:2014.
18. Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 315 с.

### Информация об авторах

*ПОПОВ Егор Вячеславович* – кандидат технических наук, инженер-конструктор, ООО «Архпромсервис», г. Архангельск. Предмет научных изысканий – исследование, расчет и технология изготовления составных деревокомпозитных конструкций. E-mail: EPV1989@yandex.ru

*ТРОПИНА Полина Михайловна* – аспирант, инженер-геодезист, ООО «МКК-Строй», г. Санкт-Петербург. Занимается исследованием деревокомпозитных конструкций на упруго-деформируемых связях. E-mail: polinomka@mail.ru

*ШИЛОВСКАЯ Надежда Аркадьевна* – старший преподаватель кафедры математики, САФУ им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск. Область научных интересов – математическое моделирование социально-экономических процессов. E-mail: shnalti@gmail.com

*РУСЛАНОВА Анастасия Владимировна* – аспирант, главный инженер, ООО «Рем-СтройПроект», г. Архангельск. Предмет научных интересов – исследование, расчет конструкций и технологий изготовления объемных модулей на основе деревокомпозитных материалов для условий Крайнего Севера и Арктики. E-mail: kalipso64@gmail.com

*ЛАБУДИН Борис Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики, САФУ им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск. Область научных интересов – совершенствование конструктивных решений и методов расчета большепролетных пространственно-регулярных и циклически-симметричных систем из клееной древесины. E-mail: sevned@mail.ru

*МЕЛЕХОВ Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств, САФУ им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск. Область научных интересов – энергоэффективность и ресурсосбережение при производстве деревоклеёных конструкций и деревянного домостроения. E-mail: v.melekhov@narfu.ru

---

UDC 624.078.4; 624.011.2

## THREE-LAYERED RIBBED WOOD PANEL ON FLEXIBLE CONSTRAINTS

***E. V. Popov, P. M. Tropina, N. A. Shilovskaya, A. V. Ruslanova,  
B. V. Labudin, V. I. Melekhov***

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Arkhangelsk)*

*Abstract.* Ribbed plates and panels with skin plates made with plate and sheet wood materials can be used in civil, industrial and agricultural buildings and structures. They are universal enclosing and bearing structures and can be used as covering, floor slab panel, and wall envelope. Covering plates perform simultaneously the functions of girder, deck and boarding and provide heat protection of the building (if there is a heater in the structure). In addition, they are horizontal hardness disks. This article presents the design calculation methodology of tree-layered ribbed panels made with skin plates from wooden plate materials and ribs from framing lumber. A feature of these panels from the composite elements is the use of elastically deformable joints such as screws, nails, saddle clips and combined compounds based on a claw washer with increased shear stability. Traditional types of mechanical joints of wooden structure elements do not allow achieving effective engagement of skin plates in the work of the whole structure. The issues of improving shear resistance of



mechanical joints of skin plates and ribs using connectors are understudied. For the maximum inclusion of skin plates in the work of panel construction, a rigid adhesive joint is traditionally used. The tree-layered ribbed panels design calculation is based on the theory of design calculating the composite rods and plates of A. R. Rzhantsyn, in which the distribution of the shearing forces at the boundaries of the elements is described by a differential equation system. In accordance with the support conditions, the initial and boundary conditions are chosen. The differential equation system is solved analytically by the Euler method. In general, the expressions for the determination of shearing forces in joints are obtained. This expression takes into account predefined initial and boundary conditions for a hinge supported, in which skin plates are fastened to the ribs using flexible constraints, under with a uniformly distributed load. An example of calculating the strength of composite wood plate-ribbed panel with elastically deformable joints of skin plates and ribs on the screws is given.

*Keywords:* composite wood ribbed panel, mechanical joints, strength, stiffness, flexibility, shear.

#### REFERENCES

1. Tisevich Ye. K. Szhato-izgibayemyye kleyefanernyye stenovyye paneli s obshivkoy, vklyuchenny v obshchuyu rabotu konstruksii: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Compressed-bent kleefaner wall panels with plating, included in the overall work of structure: abstract of dissertation of the candidate of technical sciences], Orenburg, 2008, 23 p.
2. Ukrainchenko D. A. Derevyannyye unifitsirovannyye panelnyye konstruksii s kleyedoshchatoy obshivkoy: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Wooden unified panel constructions with cladding: abstract of dissertation of the candidate of technical sciences], Orenburg, 2011, 21 p.
3. Zhadanov V. I. Maloetazhnyye zdaniya i sooruzheniya iz sovmeshchennykh rebristykh konstruksiy na osnove drevesiny: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk [Low-rise buildings and structures from combined ribbed structures based on wood: abstract of dissertation of the doctor of technical sciences], Krasnoyarsk, 2008, 38 p.
4. Nikitin V. M. Krupnorazmernyye rebristyye plity s kombinirovannoy obshivkoy dlya pokrytyh zdaniy: diss. ... kand. tekhn. nauk [Large-sized ribbed plates with combined cladding for building coverings: dissertation of the candidate of technical sciences], Krasnoyarsk, 2009, 138 p.
5. Chernykh A. S. Sovershenstvovaniye konstruksii i tekhnologii proizvodstva stenovykh paneley s derevyannym karkasom: diss. ... kand. tekhn. nauk [Perfection of design and technology of producing wall panels with timber-framing: dissertation of the candidate of technical sciences], Arkhangelsk, 2014, 168 p.
6. Mekhanikov V. M. Soyedineniye elementov v konstruksiyakh s primeneniyyem TsSP: diss. ... kand. tekhn. nauk [Elements connection in constructions using a cement board: dissertation of the candidate of technical sciences], Moscow, 1995, 137 p.
7. Kavelin A. S. Issledovaniye raboty na sdvig gvozdevogo soyedineniya obshivki i rebra derevyannoy stenovoy paneli [Study of work on shear of nailed connection of cladding and rib of wooden wall panel], *Stroitelstvo-2014: Sovremennyye problem promyshlennogo i grazhdanskogo stroitelstva: materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.*, Institut promyshlennogo i grazhdanskogo stroitelstva stroitelstva [Building-2014: Modern issues of industrial and civil construction: materials of international scientific-practical conference, Institute of Industrial and Civil Engineering], 2014, pp. 98-100.
8. Labudin B. V., Voronkov S. A., Gmyrina A. P., Ruslanova A. P. Issledovaniye prochnosti stenovykh paneley na derevyannom karkase dlya usloviy kraynego severa severa [Investigation of the strength of wall panels on wooden frame for conditions of the Far North], *Stroitel'naya nauka – XXI vek. Teoriya, obrazovaniye, praktika, innovatsii Severo-Arkticheskoy regionu: sbornik trudov mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Building science – XXI century. Theory, education, practice, innovations to the North-Arctic region: collection of works of international scientific-technical conference], g. Arkhangelsk, 28-30 iyunya 2015 g., pod red. B. V. Labudina, Saint-Petersburg: Svoyeizdatelstvo, 2015, pp. 187-193.
9. Popov E. V., Tyurikova T. V., Labudin B. V., Melekhov V. I. O povyshenii sdvigoustoychivosti podatlivykh svyazey sostavnykh derevyannykh konstruksiy na kogtevykh shaybakh "Bulldog" [On the increase of shear-resistant of ductile connection of composite wooden structures on claw washer "Bulldog"], *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Construction mechanics and proportioning of structures], 2016, No. 4, pp. 23-28.
10. Popov E. V., Filippov V. V., Melekhov V. I., Labudin B. V., Tyurikova T. V. Vliyaniye zhestkosti svyazey sdviga pri raschete rebristykh paneley na derevyannom karkase [Effect of shear bond stiffness in the calculation of ribbed panels on a wooden frame], *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], Arkhangelsk, 2016, No. 4, pp. 123-134.
11. Popov E. V., Filippov V. V., Zhuravleva T. P., Melekhov V. I., Labudin B. V. Eksperimentalnyye issledovaniya zhestkosti svyazey na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye paneley na derevyannom karkase [Experimental studies of the stiffness of bonds on the stress-strain state of panels on wooden frame], *Bezopasnost stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya: materialy mezhdunarodnykh akademicheskikh*

*chteniy* [Safety of the construction Fund of Russia. Issues and solutions: proceedings of international academic readings], 24-25 noyabrya 2016 g., Kursk. gos. universitet, Kursk, 2016, pp. 111-116.

12. SP 64.13330.2011. Derevyannyye konstruksii [Wooden structures], Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-22-81 [Updated edition of Building code II-22-81], Moscow, 2011, 66 p.

13. Rekomendatsii po proyektirovaniyu panelnykh konstruksiy s primeneniym drevesiny i drevesnykh materialov dlya proizvodstvennykh zdaniy [Recommendations for the design of panel structures using timber and wood materials for industrial buildings], *TsNIISK im. V. A. Kucherenko* [Central Scientific Research Institute for Building Structures named after V. A. Kucherenko], Moscow, 1982, 120 p.

14. Labudin B. V. Raschet plitno-rebristykh konstruksiy s uprugo-podatlivymi svyazyami [Calculation of slabby and ribbed structures with resilient bonds], *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], 1992, No. 1, pp. 67-72.

15. Popov E. V., Tyurikova T. V., Polikarpov D. A., Tropina P. M., Labudin B. V., Melekhov V. I. Inzhenernyy raschet rebristykh derevokompozitnykh paneley s upru-godeformiruyemyimi svyazyami [Engineering calculation of ribbed wooden composite panel with poroelastic bonds], *Nauka segodnya. Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty: materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.* [Science today. Theoretical and practical aspects: proceedings of international scientific and practical conference], g. Vologda, 28 dek. 2016 g. Chast 1, Vologda, 2017, pp. 53-57.

16. Popov E. V., Melekhov V. I., Shilovskaya N. A., Tropina P. M., Myakshikova E. A. Raschet trekhslonnykh rebristykh derevokompozitnykh paneley s uprugodeform-iruyemyimi svyazyami [Calculation of three-layer ribbed wooden composite panel with poroelastic bonds], *Sovremennyye stroitelnyye konstruksii iz metalla, dereva i plastmass: sbornik nauchnykh trudov No. 21* [Modern building structures made of metal, wood and plastic: collection of scientific papers No. 21], Odesskaya gosudarstvennaya akademiya stroitelstva i arkhitektury [Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture], Odessa, 2017, pp. 58-65.

17. DIN EN 1995-1-1/A2-2014 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings; German version EN 1995-1-1:2004/A2:2014.

18. Rzhanitsyn A. R. Sostavnyye sterzhni i plastinki [Compound rods and plates], Moscow: Stroyizdat, 1986, 315 p.

#### Information about the authors

*POPOV Egor Vyacheslavovich* – Doctor of Engineering Sciences, Design Engineer, LLC “Arkhpromservice”, Arkhangelsk. Research interests – investigation, design and manufacturing technology of composite wooden structures. E-mail: EPV1989@yandex.ru

*TROPINA Polina Mikhailovna* – PhD student, Geodetic Engineer, LLC “MKK-Stroi”, Saint Petersburg. Research interests – investigation of composite wooden on elastically deformable constraints. E-mail: polinomka@mail.ru

*SHILOVSKAYA Nadezhda Arkadevna* – Senior Lecturer, Department of Mathematics, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk. Area of scientific interests – mathematical modeling of socio-economic processes. E-mail: shnalti@gmail.com

*RUSLANOVA Anastasia Vladimirovna* – PhD student, Chief Engineer, LLC “RemStroiProekt”, Arkhangelsk. Research interests – investigation, design of structures and manufacturing technology of composite wooden volume modules for conditions of the Far North and the Arctic. E-mail: kalipso64@gmail.com

*LABUDIN Boris Vasilevich* – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Engineering Constructions, Architecture and Graphics, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk. Research interests – improvement of structural scheme and design method of large-span space-regular and cyclically-symmetric systems of glued wood. E-mail: sevned@mail.ru

*MELEKHOV Vladimir Ivanovich* – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Technology of Logging and Woodworking Operations, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk. Research interests – energy efficiency and resource saving in the manufacture of glued wooden structures and wooden house construction. E-mail: v.melekhov@narfu.ru

#### Библиографическая ссылка

Трехслойная ребристая панель на податливых связях / Е. В. Попов, П. М. Тропина, Н. А. Шиловская, А. В. Русланова, Б. В. Лабудин, В. И. Мелехов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 4. – С. 33-42.