УДК 624.078.4; 624.011.2

© Б. В. Лабудин, д-р техн. наук, профессор
© В. И. Мелехов, д-р техн. наук, профессор
© А. С. Торопов, д-р техн. наук, профессор
© А. В. Карельский, канд. техн. наук, доцент
© Е. В. Попов, канд. техн. наук, доцент
© А. В. Русланова, аспирант
© Д. А. Столыпин, студент
(Северный (Арктический) федеральный университет
имени М. В. Ломоносова)
E-mail: EPV1989@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-1-31-37

© B. V. Labudin, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. I. Melekhov, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. S. Toropov, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. V. Karelskiy, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© E. V. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© A. V. Ruslanova, post-graduate student
© D. A. Stolypin, student
(Northern (Arctic) Federal University
named after M. V. Lomonosov)
E-mail: EPV1989@yandex.ru

КОЭФФИЦИЕНТЫ РЕДУКЦИИ ОБШИВОК СЖАТО-ИЗГИБАЕМЫХ РЕБРИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ С ПОДАТЛИВЫМИ СВЯЗЯМИ

REDUCTION COEFFICIENTS OF THE CLADDING MADE OF COMPRESSED BENT RIBBED PANELS WITH FLEXIBLE CONNECTIONS

Исследовано влияние соотношения изгибающих моментов, продольных сил и материала анизотропной обшивки на коэффициенты редукции обшивки сжато-изгибаемых деревокомпозитных ребристых стеновых панелей. В качестве обшивки рассмотрены ориентированно-стружечные плиты, цементно-стружечные плиты и конструкционная фанера; ребра — из пиломатериалов хвойных пород. Рассчитаны коэффициенты редукции для сжато-изгибаемых ребристых деревокомпозитных стеновых панелей с механическими связями. Полученные результаты позволяют более точно рассчитывать стеновые конструкции как из панелей и объемных модулей, так и из каркасов с обшивками из плитных материалов.

Ключевые слова: деревокомпозитные панели, сжато-изгибаемые элементы, механические соединения, коэффициенты редукции, жесткость, податливость.

The article presents the study results of the impact of the interrelation of the bending moments, longitudinal forces and anisotropic cladding material on the reduction coefficients of the cladding of compressed-bent wood-composite ribbed wall panels. Oriented wood chipboards, cement-bonded particle boards, structural plywood boards are regarded as cladding, ribs being made of coniferous lumber. As a result of the numerical studies, there have been determined reduction coefficients for compressed-bent wood-composite wall panels with mechanical connections. The obtained results allow to more accurately design the wall structures of panels and volumetric modules, as well as frames with the plate materials cladding.

Keywords: wood composite panels, compressed-bent elements, mechanical connections, reduction coefficients, stiffness, flexibility.

Развитие базы материалов и конструкций на основе древесины обусловило не только техническую возможность, но и экономическую целесообразность применения в зданиях и сооружениях различного назначения ребристых панелей стен и объемных модулей [1–8]. Применение таких панелей (рис. 1) наиболее выгодно, когда они совмещают несущие и ограждающие функции: основные продольные ребра работают как стойки, а обшивки, включенные в общую работу стеновой панели, играют роль ограждений.

При этом стеновая панель работает как сжато-изгибаемый элемент, от вышерасположенных конструкций воспринимает нагрузку сжатия и поперечную нагрузку — от ветра.

Традиционная конструкция узловых соединений предусматривает передачу нагрузки от верхних панелей к нижним через продольные ребра, а обшивка вовлекается в работу только за счет механических упругоподатливых соединений. В качестве механических связей используются гвозди, винты, скобы [9–11].

Рис. 1. Конструкция деревокомпозитной ребристой стеновой панели

Одним из факторов ресурсосбережения при использовании таких конструкций является отсутствие научных и конструкторских исследований в области корректного учета обшивки при работе продольных ребер. При расчете этих конструкций по нормам^{1,2} [12] недостаточно достоверно отражаются условия совместной работы обшивок и ребер сжато-изгибаемых ребристых панелей, особенно при использовании податливых механических соединений взамен жесткого клеевого шва. Из-за этого зачастую при эксплуатации выявляется несоответствие расчетных моделей и реального поведения конструкции.

При инженерном расчете ребристых панелей на деревянном каркасе, в зависимости от конструктивного решения, в расчетной схеме допускается рассматривать приведенные тавровые или двутавровые сечения, где обшивки выступают в роли полок. При этом нормальные напряжения, направленные вдоль оси панели, возникающие в полках, будут иметь максимальное значение у ребер и уменьшаться по мере удаления от них. В середине обшивки напряжения будут минимальными. Поэтому в расчет следует вводить не фактическую, а уменьшенную приведенную ширину обшивки, которая определяется

с учетом того, чтобы значения наибольших продольных напряжений для фактического и приведенного сечения оказались равными по площади эпюр [13].

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

$$b_{\text{ред}} = k_{\text{ред}} b_{\text{факт}}. \quad (1)$$

Редукционный коэффициент $k_{\text{ред}}$ определяется по формуле

$$k_{\text{ред}} = \frac{\sigma_x^{\text{ср}}}{\sigma_E^{\text{max}}}, \quad (2)$$

где $\sigma_x^{\text{ср}}$ — среднее нормальное напряжение по всей ширине обшивки в поперечном сечении панели, вычисляемое по формуле (3); σ_x^{max} — максимальное нормальное напряжение.

$$\sigma_x^{\text{ср}} = \frac{1}{b_{\text{об}}} \int_a^{b_{\text{об}}} \tilde{\sigma}_x(y) dy \approx \frac{1}{b_{\text{об}}} \sum_{i=1}^n \sigma_x^i \Delta y_i, \quad (3)$$

где σ_x^i — значение нормального напряжения в каждой точке по ширине поперечного сечения; Δy_i — бесконечно малая ширина участка между точками измерения напряжений; $b_{\text{об}}$ — габаритная ширина панели обшивки.

Пренебрегая толщиной и изгибом обшивки, условно полагаем, что усилия от ребер передаются на обшивку в ее срединной плоскости, а распределение напряжений в обшивке можно считать двумерным. В таком случае дифференциальное уравнение плоской ортотропной пластинки-обшивки (рис. 3) будет иметь вид [14]

$$\frac{1}{E_x} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\mu_{xy}}{E_x} \right) \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1}{E_y} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} = 0, \quad (4)$$

где $\varphi = \varphi(x, y)$ — функция напряжений Эри; E_x — модуль упругости обшивки по направлению продольных ребер; E_y — модуль упругости обшивки в перпендикулярном направлении; μ_{xy} — коэффициент Пуассона; G_{xy} — модуль сдвига.

В видоизмененном решении Файлона функция $\varphi(x, y)$ имеет вид

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ -\frac{1}{\alpha^2} \left[a_n \psi_1(y) + b_n \psi_2(y) + c_n \psi_3(y) + g_n \psi_4(y) \right] \right\} \sin \alpha x, \quad (5)$$

где $\alpha = n\pi/l$ ($n = 1, 2, 3, \dots$); l — высота панели; a_n, g_n — коэффициенты разложений в тригонометрические ряды контурных, нормальных к продольным кромкам нагрузок соответственно

¹ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81. М., 2017. 105 с.

² 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.

Рис. 2. Схема распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивке:
а — поперечное сечение панели и фактическая схема распределения напряжений в обшивке;
б — схема расчетного поперечного сечения и приведенная эпюра напряжений

при $y = \pm b_n/2$, b_n — ширина рассматриваемого участка обшивки между продольными ребрами в осях; c_n, g_n — то же касательных нагрузок; $\psi_i(y)$ — функции, зависящие от корней характеристического уравнения:

$$r^4 - m_1 \alpha^2 r^2 + m_2 \alpha^4 = 0, \quad (6)$$

где $m_1 = E_x/G - 2\nu_{xy}$; $m_2 = E_x/E_y$.

Функция распределения нормальных напряжений σ_x при исходных нагрузках, приложенных вдоль длинных кромок обшивки:

$$\sigma_x(x, y) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{1}{\alpha^2} [c_n \psi_3''(y) + g_n \psi_4''(y)] \sin \alpha x; \quad (7)$$

$$\sigma_y(x, y) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \psi_3(y) + g_n \psi_4(y)] \sin \alpha x. \quad (8)$$

При комплексных корнях уравнения (6) вида $\pm s \pm k_i$ функции ψ_i имеют вид [15]:

$$\begin{aligned} \psi_3(y) &= \varphi_5 \operatorname{ch}(s\alpha y) \cdot \cos(k\alpha y) - \\ &\quad - \varphi_4 \operatorname{sh}(s\alpha y) \cdot \cos(k\alpha y) + \\ &\quad + \varphi_3 \operatorname{ch}(s\alpha y) \cdot \sin(k\alpha y) - \varphi_6 \operatorname{sh}(s\alpha y) \cdot \sin(k\alpha y); \quad (9) \\ \psi_4(y) &= -\varphi_5 \operatorname{ch}(s\alpha y) \cdot \cos(k\alpha y) - \\ &\quad - \varphi_4 \operatorname{sh}(s\alpha y) \cdot \cos(k\alpha y) + \varphi_3 \operatorname{ch}(s\alpha y) \cdot \sin(k\alpha y) + \\ &\quad + \varphi_6 \operatorname{sh}(s\alpha y) \cdot \sin(k\alpha y). \quad (10) \end{aligned}$$

Коэффициенты φ_i определяются выражениями: $\varphi_3 = A \operatorname{sh}(su_n) \cos(ku_n)$; $\varphi_4 = A \operatorname{ch}(su_n) \sin(ku_n)$; $\varphi_5 = B \operatorname{sh}(su_n) \sin(ku_n)$; $\varphi_6 = B \operatorname{ch}(su_n) \cos(ku_n)$; $u_n = n\pi b/l$, а коэффициенты A и B — по формулам

$$A = \frac{1}{k \operatorname{sh}(2su_n) - s \sin(2ku_n)}; \quad (11)$$

$$B = \frac{1}{k \operatorname{sh}(2su_n) + s \sin(2ku_n)}. \quad (12)$$

При действительных корнях уравнения (6) вида s_1, s_2 :

$$\psi_3(y) = 0,5 \left(-\varphi_3 \operatorname{ch}(s_1 \alpha y) + \varphi_4 \operatorname{ch}(s_2 \alpha y) - \right. \\ \left. - \varphi_5 \operatorname{sh}(s_1 \alpha y) + \varphi_6 \operatorname{sh}(s_2 \alpha y) \right). \quad (13)$$

$$\psi_4(y) = 0,5 \left(\varphi_3 \operatorname{ch}(s_1 \alpha y) - \varphi_4 \operatorname{ch}(s_2 \alpha y) - \right. \\ \left. - \varphi_5 \operatorname{sh}(s_1 \alpha y) + \varphi_6 \operatorname{sh}(s_2 \alpha y) \right). \quad (14)$$

Коэффициенты φ_i определяются выражениями: $\varphi_3 = A \operatorname{ch}(s_2 u_n)$; $\varphi_4 = A \operatorname{ch}(s_1 u_n)$; $\varphi_5 = B \operatorname{sh}(s_2 u_n)$; $\varphi_6 = B \operatorname{sh}(s_1 u_n)$; коэффициенты A и B — по формулам

Рис. 3. Схема распределения касательных нагрузок на продольных кромках обшивки

$$A = \frac{1}{s_1 \operatorname{ch}(s_2 u_n) \operatorname{sh}(s_1 u_n) - s_2 \operatorname{sh}(s_2 u_n) \operatorname{ch}(s_1 u_n)}; \quad (15)$$

$$B = \frac{1}{s_2 \operatorname{ch}(s_2 u_n) \operatorname{sh}(s_1 u_n) - s_1 \operatorname{sh}(s_2 u_n) \operatorname{ch}(s_1 u_n)}. \quad (16)$$

Граничные условия для панели с двумя продольными ребрами $\sigma_y(\pm b/2) = 0$. Коэффициенты $a_n = b_n = 0$, коэффициенты разложения c_n и g_n определяются формулами Фурье:

$$c_n = \frac{2}{l} \int_0^l \tau(x) \cos(\alpha x) dx; \quad g_n = -\frac{2}{l} \int_0^l \tau(x) \cos(\alpha x) dx. \quad (17)$$

Для панели с податливыми связями, нагруженной равномерно распределенной поперечной нагрузкой и продольной силой, прикладываемой на торцах ребер, необходимо получить функции $\tau(x)$ распределения сдвигающих усилий на границе «ребро – обшивка», которые в случае с податливыми связями будут нелинейными.

Запишем дифференциальное уравнение двухслойного составного элемента [16]:

$$T'' / \xi = \gamma T + \Delta, \quad (18)$$

где T — сдвигающее усилие на границе «ребро – обшивка» (рис. 4); ξ — коэффициент жесткости связей сдвига, определяемый по формуле (19); γ , Δ — коэффициент и свободный член дифференциального уравнения, определяемые по формулам (20) и (21) соответственно;

$$\xi = nc_{\text{св}} / S_{\text{св}}, \quad (19)$$

где $c_{\text{св}}$ — коэффициент жесткости одного соединения; $S_{\text{св}}$ — шаг соединений; n — количество продольных ребер;

$$\gamma = 1 / E_1 A_1 + 1 / E_2 A_2 + c^2 / \Sigma EI, \quad (20)$$

где E_1 , E_2 , A_1 , A_2 — модуль упругости и площадь сечения обшивки и ребра соответственно; c — расстояние между центрами тяжести обшивки и ребра; ΣEI — сумма изгибных жесткостей обшивки и ребра;

$$\Delta = -N_1^0 / E_1 A_1 + N_2^0 / E_2 A_2 - M_0 c / \Sigma EI, \quad (21)$$

где N_1^0 , N_2^0 — продольные силы, приложенные к обшивке и ребру соответственно (в нашем случае $N_1^0 = 0$); M_0 — значение изгибающего момента только от поперечной нагрузки q :

$$M_0(t) = (qlt/2) - (qt^2/2), \quad (22)$$

где t — координата рассматриваемого сечения; l — высота панели (расстояние между точками крепления продольных ребер).

Решение дифференциального уравнения (18) при подстановке в него (21) и (22) будет иметь вид:

$$T = C_1 \operatorname{sh} \lambda x + C_2 \operatorname{ch} \lambda x + \frac{\xi}{\lambda} \int_0^x \left(\frac{N_2}{E_2 A_2} - \frac{M_0(t)c}{\Sigma EI} \right) \sin(\lambda(x-t)) dt. \quad (23)$$

Интегрируя правую часть решения (23), получаем выражение

$$T = C_1 \operatorname{sh} \lambda x + C_2 \operatorname{ch} \lambda x + \left(\frac{clq(e^{-\lambda x} - e^{\lambda x} + 2\lambda x)}{4 \Sigma EJ \cdot \lambda^2} - \frac{cq(2 - 2 \operatorname{ch} \lambda x + \lambda^2 x^2)}{2 \Sigma EJ \cdot \lambda^3} + \frac{2N_2^0 \operatorname{sh} \left(\frac{\lambda x}{2} \right)^2}{A_2 E_2 \lambda} \right). \quad (24)$$

Постоянные интегрирования определяются из граничных условий: $T(0) = T(l) = 0$, $C_2 = 0$,

$$N_2^0 \xi \lambda^2 \Sigma EJ (1 - \operatorname{ch} \lambda l) + C_1 = \frac{+A_2 E_2 \xi cq (1 - \operatorname{ch} \lambda l + 0,5 \lambda l \cdot \operatorname{sh} \lambda l)}{A_2 E_2 \lambda^4 \Sigma EJ \cdot \operatorname{sh} \lambda l}. \quad (25)$$

Подставляя (25) в (24), после преобразований получим выражение для определения суммарной сдвигающей силы в рассматриваемом сечении:

$$2\xi (N_2^0 \lambda^2 \Sigma EJ + A_2 E_2 cq) \times (\operatorname{sh} \lambda l - \operatorname{sh} \lambda x + \operatorname{ch} \lambda l \cdot \operatorname{sh} \lambda x - \operatorname{sh} \lambda l \cdot \operatorname{ch} \lambda x) + \frac{+A_2 E_2 \xi \lambda^2 cq x (x \operatorname{sh} \lambda l - l \operatorname{sh} \lambda l)}{2 A_2 E_2 \lambda^4 \Sigma EJ \cdot \operatorname{sh} \lambda l}. \quad (26)$$

Искомая функция распределения сдвигающих усилий на границе «ребро – обшивка» является производной от функции $T(x)$:

$$\tau(x) = T'(x) = 2(N_2^0 \xi \lambda^2 \Sigma EJ + A_2 E_2 \xi cq) \times \frac{\times (\operatorname{ch}(\lambda l - \lambda x) - \operatorname{ch} \lambda x) - A_2 E_2 \xi \lambda cq \operatorname{sh} \lambda l (l - 2x)}{2 A_2 E_2 \Sigma EJ \cdot \lambda^3 \cdot \operatorname{sh} \lambda l}, \quad (27)$$

где λ — характеристическое число, $\lambda = \sqrt{\xi \gamma}$.

Значения максимальных напряжений в рассматриваемом сечении с координатой x определяются по формуле (7) при $y = b_{\text{об}}/2$, средних напряжений — по формуле

$$\sigma_{x,\text{ср}} = \frac{2}{t_{\text{об}} b_{\text{об}}} \int_0^x \tau(x) dx. \quad (28)$$

После вычисления максимальных и средних значений напряжений определяется коэффициент приведения обшивки $k_{\text{ред}}$ по формуле (2).

Рис. 4. Схема действия касательных усилий на границе «ребро – обшивка»: а — основной вид; б — разрез а-а

Для исследования влияния отношения моментов к продольной силе $M_{\max}/|N|$ на коэффициент редукиции обшивки k_{red} рассмотрим стеновую панель на деревянном каркасе размерами 1,25×3,0 м с двумя продольными ребрами (сосна/ель³). Ребра шарнирно закреплены по концам. Толщина обшивки 12 мм, сечение ребер 40×100 мм. Обшивка соединена с ребрами податливыми соединениями ($\xi = 10\,000\text{ кН/м}^2$). На ребра панели действует продольная сжимающая нагрузка $|\Sigma F| = 11,25\text{ кН}$, передаваемая с вышестоящих панелей без эксцентриситета, и ветровая нагрузка, приведенная к погонной q . Рассматриваем панели с обшивкой из ориентированно-стружечных плит (ОСБ)⁴, конструкционной фанеры марки ФК⁵ и цементно-стружечных плит (ЦСП)⁶.

При увеличении отношения $M_{\max}/|N|$ коэффициент редукиции обшивки возрастает. Нами предлагается учитывать данное обстоятельство при расчете сжато-изгибаемых стеновых панелей введением коэффициента k_M :

$$k_M = \frac{k_{red}(M_{\max}^{\text{факт}})}{k_{red}(M = 0)}. \quad (29)$$

³ ГОСТ 24454–80*. Пиломатериалы хвойных пород. Размеры. Введ. 01.01.1995. М.: Изд-во стандартов, 1995. 20 с.

⁴ ГОСТ 32567–2013. Плиты древесные с ориентированной стружкой. Технические условия. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 17 с.

⁵ ГОСТ 3916.1–96. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Технические условия. Введ. 01.07.2004. Минск: Изд-во стандартов, 2004. 27 с.

⁶ ГОСТ 26816–2016. Плиты цементно-стружечные. Технические условия. Введ. 01.04.2017. М.: Стандартинформ, 2016. 15 с.

Для всех рассмотренных (рис. 5) соотношений $\alpha = M_{\max}/|N|$ определим значения коэффициента k_M и, аппроксимируя полученные зависимости, получим формулы для определения коэффициента при любых значениях α .

Панель с обшивкой из ОСБ: при $\alpha \geq 0,5$ $k_M = 1,18$. При $\alpha < 0,5$:

$$k_N = 2,886\alpha^3 - 3,239\alpha^2 + 1,217\alpha + 1. \quad (30)$$

Панель с обшивкой из фанеры ФК: при $\alpha > 0,2$ $k_M = 1,2$. При $\alpha \leq 0,2$:

$$k_N = -533,3\alpha^4 + 284,4\alpha^3 - 54,66\alpha^2 + 4,755\alpha + 1. \quad (31)$$

Рис. 5. Зависимости коэффициента редукиции обшивки k_{red} от величины $M_{\max}/|N|$

Панель с обшивкой из ЦСП: при $\alpha > 0,25$ $k_M = 1,19$. При $\alpha \leq 0,25$:

$$k_N = -201,5\alpha^4 + 135,2\alpha^3 - 33,05\alpha^2 + 3,374\alpha + 1. \quad (32)$$

Выводы

1. Представленная методика позволяет рассчитывать сжато-изгибаемые деревокомпозитные стеновые панели и определять величину напряжений в любом сечении как по высоте, так и по ширине панели.

2. Материал обшивки и ее физико-механические характеристики значительно влияют на коэффициент редукиции k_{red} . Наиболее низкие значения коэффициента редукиции у панелей с фанерной обшивкой (0,3...0,364), наиболее высокие — с обшивкой из OSB (0,618...0,638); для панелей с обшивкой из ЦСП значения $k_{red} = 0,463...0,563$.

3. При расчете сжато-изгибаемых панелей на коэффициент приведения обшивки оказывает влияние соотношение продольной силы N и момента M_{max} в наиболее опасном сечении. Полученные зависимости позволяют уточнить k_{red} в зависимости от $M_{max}/|N|$.

Библиографический список

1. Линьков И. М. Исследование стеновых панелей с деревянным каркасом и асбестоцементной обшивкой // Стеновые панели на основе древесных материалов и асбестоцемента. ЦНИИСК. Вып. 26. М.: Госстройиздат, 1963. С. 16–19.

2. Ковальчук Л. М., Турковский С. Б., Пискунов Ю. В. Деревянные конструкции в строительстве. М.: Стройиздат, 1995. 248 с.

3. Гребенюк Г. И., Дмитриев П. А., Жаданов В. И., Асташенков Г. Г. Конструирование, расчет и оптимизация совмещенных ребристых конструкций на основе древесины // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 11–12 (659–660). С. 48–57.

4. Украинченко Д. А., Жаданов В. И., Калинин С. В. Численные исследования плит покрытия и панелей стен с клеодощатой обшивкой // Вестник Томского гос. архит.-строит. ун-та. 2014. № 1 (42). С. 68–79.

5. Лабудин Б. В., Воронков С. А., Гмырина А. П., Русланова А. П. Исследование прочности стеновых панелей на деревянном каркасе для условий крайнего севера // Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Строительная наука — XXI: теория, образование, практика, инновации Северо-арктическому региону», 28–30 июня 2015 г. СПб.: Свое издательство, 2015. С. 187–193.

6. Жаданов В. И., Чарикова В. В., Хорошавин Е. А. Конструктивные решения малоэтажных зданий на основе древесины, применяемые в Финляндии // Материалы Всерос. науч.-метод. конф. «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры», 3–5 февраля 2016 г. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2016. С. 520–525.

7. Жаданов В. И., Инжутов И. С., Украинченко Д. А., Яричевский И. И. О неиспользуемых резервах в проектировании панельных конструкций на основе деревянного каркаса // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 2 (686). С. 15–24.

8. Русланова А. В., Лабудин Б. В., Мелехов В. И., Филиппов В. В. Объемно-модульное домостроение для высоких широт Арктики // Сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. конф. «Строительная наука — XXI: теория, образование, практика, инновации Северо-арктическому региону». Архангельск: Свое издательство, 2017. С. 242–250.

9. Кавелин А. С. Исследование работы на сдвиг гвоздевого соединения обшивки и ребра деревянной стеновой панели // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Строительство-2014: современные проблемы промышленного и гражданского строительства», 18–19 декабря 2014 г. Ростов н/Д: Ростовский гос. строит. ун-т, 2014. С. 98–100.

10. Механиков В. М. Соединение элементов в конструкциях с применением ЦСП: дис. ... канд. техн. наук. М., 1995. 137 с.

11. Черных А. Г., Черных А. С., Коваль П. С., Григорьев К. С. Прочность и жесткость стеновых панелей на деревянном каркасе // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 171–179.

12. Черных А. Г., Бызов В. Е. Краткий курс лекций «Международная нормативная база проектирования (Еврокоды)». М.: АСВ, 2015. 74 с.

13. Украинченко Д. А. Деревянные унифицированные панельные конструкции с клеодощатой обшивкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2011. 21 с.

14. Лехницкий С. Г. Анизотропные пластинки. М.: ОГИЗ Гостехиздат, 1947. 355 с.

15. Лозбинев В. П. Форма решения плоской задачи теории упругости для прямоугольной ортотропной пластинки // Вопросы транспортного машиностроения. Брянск, 1974. Вып. 3. С. 190–202.

16. Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 314 с.

References

1. Lin'kov I. M. *Issledovanie stenovykh paneley s derevyannym karkasom i asbestotsementnoy obshivkoy* [Study of wall panels with a wooden frame and asbestos-cement cladding]. *Sbornik TsNIISK «Stenovyye paneli na*

osnove drevesnykh materialov i asbestotsementa» [Collected works TsNIISK "Wall panels based on wood materials and asbestos cement"]. Iss. 26. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1963, pp. 16–19.

2. Koval'chuk L. M., Turkovskiy S. B., Piskunov Yu. V. *Derevyannye konstruksii v stroitel'stve* [Wooden structures in construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1995, 248 p.

3. Grebenyuk G. I., Dmitriev P. A., Zhadanov V. I., Astashenkov G. G. *Konstruirovaniye, raschet i optimizatsiya sovmeshchennykh rebristyykh konstruksiy na osnove drevesiny* [Design, calculation and optimization of ribbed combined structures based on wood]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – Bulletin of higher educational institutions. Construction*, 2013, no. 11–12 (659–660), pp. 48–57.

4. Ukrainchenko D. A., Zhadanov V. I., Kalinin S. V. *Chislennyye issledovaniya plit pokrytiya i paneley sten s kledoshchatoy obshivkoy* [Numerical studies of plate and wall panel cladding with cleaved sheathing]. *Vestnik Tomskogo gos. arkhitekt.-stroit. un-ta – Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2014, no. 1 (42), pp. 68–79.

5. Labudin B. V., Voronkov S. A., Gmyrina A. P., Ruslanova A. P. *Issledovanie prochnosti stenovykh paneley na derevyannom karkase dlya usloviy kraynego severa* [The study of the strength of wall panels on a wooden frame for the Extreme North conditions]. *Trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Stroitel'naya nauka — XXI: teoriya, obrazovanie, praktika, innovatsii Severo-arkticheskoy regionu»*, 28–30 iyunya 2015 g. [Proc. of the Int. sci.-tech. conf. "Construction science–XXI century: theory, education, practice, innovations for the North Arctic region", June 28–30, 2015]. St. Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 2015, pp. 187–193.

6. Zhadanov V. I., Charikova V. V., Khoroshavin E. A. *Konstruktivnye resheniya maloetazhnykh zdaniy na osnove drevesiny, primenyaemye v Finlyandii* [Design solutions of low-rise buildings based on wood used in Finland]. *Trudy Vseros. nauch.-metod. konf. «Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury»*, 3–5 fevralya 2016 g. [Proc. of All-Russia. sci.-method. conf. "University complex as a regional center of education, science and culture", February 3–5, 2016]. Orenburg, Orenburg State University Publ., 2016, pp. 520–525.

7. Zhadanov V. I., Inzhutov I. S., Ukrainchenko D. A., Yarichevskiy I. I. *O neispol'zuemykh rezervakh v proektirovani panel'nykh konstruksiy na osnove derevyannogo karkasa* [About unused reserves in the design of panel structures on the basis of the wooden frame]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – Bulletin of higher educational institutions. Construction*, 2016, no. 2 (686), pp. 15–24.

8. Ruslanova A. V., Labudin B. V., Melekhov V. I., Filippov V. V. *Ob'emno-modul'noye domostroeniye dlya vysokikh shirot Arktiki* [Space-modular construction for the High Arctic]. *Trudy VIII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Stroitel'naya nauka — XXI: teoriya, obrazovanie, praktika, innovatsii Severo-arkticheskoy regionu»* [Proc. of the VIII Int. sci.-tech. conf. "Construction science–XXI century: theory, education, practice, innovations for the North Arctic region"]. Arkhangelsk, Svoe izdatel'stvo Publ., 2017, pp. 242–250.

9. Kavelin A. S. *Issledovanie raboty na sdvig gvozdevogo soedineniya obshivki i rebra derevyannoy stenovoy paneli* [Investigation of shear displacement probability of the cladding nailed connection and ribs wooden wall panels]. *Trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Stroitel'stvo-2014: sovremennyye problemy promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva»*, 18–19 dekabrya 2014 [Proc. of the Int. sci.-tech. conf. "Construction-2014: modern problems of industrial and civil construction", December 18–19, 2014]. Rostov-on-Don, Rostovskiy gos. stroit. un-t Publ., 2014, pp. 98–100.

10. Mekhanikov V. M. *Soedinenie ehlementov v konstruksiyakh s primeneniem TsSP. Diss. kand. tekhn. nauk* [Connection of elements in structures with the use of CBPB. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1995, 137 p.

11. Chernykh A. G., Chernykh A. S., Koval' P. S., Grigor'ev K. S. *Prochnost' i zhestkost' stenovykh paneley na derevyannom karkase* [Strength and rigidity of the wall panels on the wooden frame]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no. 3, pp. 171–179.

12. Chernykh A. G., Byzov V. E. *Kratkiy kurs lektsiy «Mezhdunarodnaya normativnaya baza proektirovaniya (Evrokody)»* [Short course of lectures "International normative base of design (Eurocodes)"]. Moscow, ASV Publ., 2015, 74 p.

13. Ukrainchenko D. A. *Derevyannyye unifitsirovannyye panel'nye konstruksii s kledoshchatoy obshivkoy. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Wooden unified panel constructions with wood board cladding. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Orenburg, 2011, 21 p.

14. Lekhnitskiy S. G. *Anizotropnyye plastinki* [Anisotropic plates]. Moscow, Leningrad, OGIZ Gostekhizdat Publ., 1947, 355 p.

15. Lozbinev V. P. *Forma resheniya ploskoy zadachi teorii uprugosti dlya pryamougol'noy ortotropnoy plastinki* [A form of solution of the plane problem of elasticity theory for a rectangular orthotropic plate]. *Voprosy transportnogo mashinostroeniya* [Transport engineering issues]. Bryansk, 1974, iss. 3, pp. 190–202.

16. Rzhantsyn A. R. *Sostavnyye sterzhni i plastinki* [Composite rods and plates]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 314 p.