

УДК 624.073.1

DOI 10.47367/0021-3497_2023_2_199

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ РЕБРИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ
С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА
ТЕХНОЛОГИЙ ТЕКСТИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**CALCULATION METHOD OF RIBBED PANELS STABILITY
CONSIDERING THE TEMPERATURE AND HUMIDITY CONDITIONS OF TEXTILE
PRODUCTION TECHNOLOGIES**

Б.В. ЛАБУДИН¹, Е.В. ПОПОВ¹, Д.В. ГЕТМАН¹, Д.А. СТОЛЫПИН², В.Е. РУМЯНЦЕВА^{3,4}

B.V. LABUDIN¹, E.V. POPOV¹, D.V. GETMAN¹, D.A. STOLYPIN², V.E. RUMYANTSEVA^{3,4}

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
²ООО "Архитектура и Дизайн",

³Ивановский государственный политехнический университет,

⁴Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий)

(¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,

²Ltd "Architecture and Design",

³Ivanovo State Polytechnic University,

⁴Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters)

E-mail: getman.d@edu.narfu.ru

Рассматриваются трехслойные деревокомпозитные ребристые стеновые панели на механических податливых связях сдвига, которые рекомендуются к применению в объектах гражданского и промышленного строительства, в том числе в текстильной промышленности. Они отличаются от железобетонных панелей легкостью, полной заводской готовностью, высокой скоростью монтажа, высокими теплотехническими показателями, экологической безопасностью, химической стойкостью в агрессивных средах, безотказной эксплуатацией в зданиях высотой до 80 м. Характерной особенностью рассматриваемых конструкций является возможность существенного повышения общей устойчивости панели за счет включения в работу обшивок и рационального шага связей сдвига. На основании теории расчета составных элементов А.Р. Ржаницына представлены физико-математическая модель и алгоритм расчета, позволяющие производить оценку устойчивости таких конструкций, как композитного составного сечения, принимая во внимание взаимные сдвиги на границе ребер и обшивок. При меняющемся температурно-влажностном режиме эксплуатации

стенowych ограждающих конструкций из древокомпозитных ребристых панелей рекомендуется учитывать только изменение влажности материала обшивок и ребер, а при расчете на устойчивость – изменчивость коэффициента продольного изгиба. Рассмотрен расчет деревянной составной панели с двухсторонней обшивкой, приведено сравнение результатов, полученных при варьировании различных статико-геометрических параметров конструкции. Установлено, что включение обшивок в работу ребер позволяет увеличить значения критической силы в 1,3...3 раза.

The article discusses three-layer wood composite wall panels on mechanical pliable shear bonds recommended for use in textile industry facilities. They differ from reinforced concrete panels in lightness, complete factory readiness, high installation speed, high thermal performance, environmental safety, chemical resistance in aggressive environments, safety operation in buildings up to 80 m high. A characteristic feature of these structures is the possibility of a significant increase in the overall stability of the panel due to the sheathing inclusion. Based on A.R. Rzhantsyn theory of composite rods calculation a mathematical model and calculation algorithm are presented to make it possible to assess the stability of such structures as a composite split section, considering shifts in the seams at the "rib-plating" boundary. Temperature and humidity changing conditions of operation of wall enclosing structures made of wood-composite ribbed panels suggests to consider only the change in the moisture content of the material of the covers and ribs, and variability of the buckling coefficient for critical force calculating. The calculation of a wood composite split panel with double-sided sheathing is considered, a comparison of the results obtained by varying several static-geometric parameters of the structure is given. It has been established that if the sheathing is included in the work of the frame and ribs, it allows to increase the values of the critical force by 1,3 ... 3 times.

Ключевые слова: древокомпозитные ребристые панели, средовые условия, податливые связи сдвига, составные стержни, критическая сила, устойчивость, нелинейность, жесткость, податливость, безопасная эксплуатация.

Keywords: timber-composite ribbed panels, environmental conditions, semi-rigid shear ties, composite rods, critical force, buckling, non-linearity, rigidity, ductility, safety operation.

Введение

Расширение базы новых материалов и конструкций на основе древесины обусловило не только техническую возможность, но и экономическую целесообразность применения в зданиях и сооружениях различного назначения панелей на деревянном каркасе стен и объемных модулей [1...4]. Наиболее полно преимущества таких панелей (рис. 1) проявляются при совмещении ими несущих и ограждающих функций. Они могут применяться как в новом строительстве, так и при рекон-

струкции, в том числе на объектах текстильного производства в условиях ненормативного температурно-влажностного режима.

Здесь основные продольные ребра выполняют роль стоек, а обшивки с утеплителем выполняют роль ограждений для создания теплового контура зданий и сооружений. Несомненным достоинством этих панелей на основе древесины является экологическая безопасность, легкость, стойкость в химически агрессивных средах. За счет рационального шага связей

сдвига, кроме этого, достигается повышение надежности плитно-ребристых конструкций стеновых панелей и их безопасная эксплуатация в различных средовых условиях, в том числе в зданиях высотой до 80 м [4], [5].

Повысить несущую способность деревокомпозитных панелей возможно за счет эффективного вовлечения в их работу обшивок, для чего традиционно применяется жесткое клеевое соединение на границе "ребро-обшивка" [6]. В то же время применение клеевых соединений ощутимо усложняет технологический процесс производства стеновых панелей, что противоречит основной идее применения таких конструкций – простоте и низкой себестоимости производства. Ряд проведенных экспериментально-теоретических исследований [7, 8] показал целесообразность учета обшивки при креплении ее к деревянным элементам с использованием податливых механических связей. В качестве механических связей используются гвозди, винты, скобы или комбинированные соединения на основе когтевых шайб [5], [9].

Как отмечается в [10], неучет повышения влажности для ограждающих конструкций из ЦСП приводит к увеличению характеристики ползучести в 1,5...3 раза. Следовательно, основными мероприятиями для защиты как наружных стеновых панелей, так и внутренних является устройство навесных влагостойких вентилируемых фасадов и влагозащитная обработка ребер и листовых материалов (обшивок), применение оцинкованных связей. Количественные значения предельных характеристик ползучести для различных видов соединений и расчетные формулы приведены в [11]. Они позволяют воспользоваться расчетом на длительную прочность и устойчивость деревокомпозитных и деревянных конструкций с использованием различных видов соединений. Для других видов соединений деформативность (податливость) их должна определяться по методике [12]. Для учета меняющейся во времени влажности материала деревянных ребер и листовых обшивок, а следовательно, и податливости соединений на границе "ребро-

обшивка" предлагается использовать наименьший из коэффициентов: φ_0 – формула (9), $\varphi_0(\omega)$ – формула (11).

Несмотря на множество уже имеющихся исследований, касающихся изучения напряженно-деформированного состояния композитных элементов деревянных конструкций [8], [13...15], в представленных работах рассматриваются преимущественно вопросы прочности и деформативности изгибаемых элементов, а вопрос влияния податливости связей на устойчивость сжатых стоек требует проведения дополнительных исследований.

Целью настоящей работы является разработка адекватной физико-математической модели и расчетного алгоритма для стеновых панелей на деревянном каркасе с применением дискретных механических коннекторов с переменными статико-геометрическими параметрами для проверки устойчивости системы "ребро-обшивка", направленной на повышение эксплуатационной надежности и безопасности.

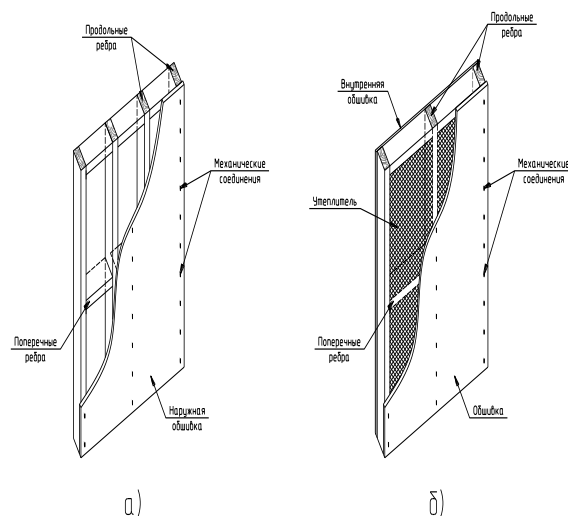


Рис. 1

Методика

Физико-математическая модель деревокомпозитной панели на деревянном каркасе и расчетный алгоритм реализуются на основе классических положений теории составных стержней [16].

В практических расчетах сечения деревокомпозитных панелей с деревянными стойками и обшивками из материалов на основе древесины могут рассматриваться

как приведенные тавровые или двутавровые, в которых обшивки включаются в работу совместно со стойками и выполняют роль полок. Нормальные напряжения имеют неравномерный характер распределения по ширине поперечного сечения, в связи с чем возникает необходимость замены фактического сечения панели расчетным (рис. 2) с редуцированной шириной обшивки [17].

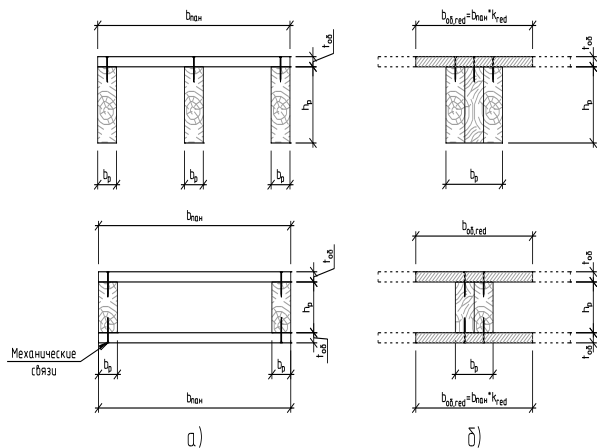


Рис. 2

Для определения величины силы $N_{кр}$, соответствующей потере устойчивости, в случае стеновой панели с двухсторонней обшивкой рассматривается 3-слойный составной стержень, наружными слоями которого являются обшивки, а внутренним слоем – деревянные стойки. Система дифференциальных уравнений составного сжатого стержня с учетом продольного изгиба имеет вид [17]:

$$\begin{cases} T_1''/\xi_1 = \Delta_{11}T_1 + \Delta_{12}T_2 + \Delta_{1y}y + \Delta_{10} \\ T_2''/\xi_2 = \Delta_{21}T_1 + \Delta_{22}T_2 + \Delta_{2y}y + \Delta_{20} \\ \Sigma N^0 y'' = \Delta_{y1}T_1 + \Delta_{y2}T_2 + \Delta_{yy}y_2 + \Delta_{y0} \end{cases}, \quad (1)$$

где $y=y(z)$ – кривая элемента при продольном изгибе; $T_1=T_1(z)$, $T_2=T_2(z)$ – функции распределения сдвигающих усилий в швах; Δ_{11} , Δ_{12} , Δ_{1y} , Δ_{2y} , Δ_{yy} – коэффициенты при искомым функциях; Δ_{10} , Δ_{20} , Δ_{y0} – свободные члены; ΣN – суммарная продольная сила, приложенная к деревянным стойкам панели.

$$\Delta_{11} = \Delta_{22} = \frac{1}{E_1 I_2} + \frac{1}{E_2 I_2} + \frac{c_1^2}{\Sigma E I}; \quad \Delta_{12} = \Delta_{21} = -\frac{1}{E_2 I_2} + \frac{c_1 c_2}{\Sigma E I}; \quad \Delta_{10} = \frac{\Sigma N}{E_2 F_2}; \quad \Delta_{20} = \frac{-\Sigma N}{E_2 F_2}, \quad (2)$$

$$\Delta_{y1} = \Delta_{1y} = \frac{\Sigma N}{\Sigma E I} c_1; \quad \Delta_{y2} = \Delta_{2y} = \frac{\Sigma N}{\Sigma E I} c_2; \quad \Delta_{yy} = \frac{(\Sigma N)^2}{\Sigma E I}; \quad \Delta_{y0} = -\frac{\Sigma N}{\Sigma E I} M^0, \quad (3)$$

где E_1 , E_2 , F_1 , F_2 – модуль Юнга и площадь сечения обшивок и стойки соответственно; I_1 , I_2 – моменты инерции; $\Sigma E I$ – суммарная изгибная жесткость обеих обшивок и стоек без учета работы коннекторов (при $\xi_i=0$); c_1 , c_2 – расстояния от центров тяжести наружной/внутренней обшивок до центра тяжести сечения стойки; $M_0=M_0(z)$ – функция изгибающего момента; ΣN – продольная сжимающая сила, приложенная к стойкам.

Для случая центрального сжатия $M_0=0$, следовательно, грузовые члены $\Delta_{i0}=\Delta_{y0}=0$, система уравнений – однородная. Тривиальным решением системы будут $T_1=T_2=0$, $y=0$. Но при определенных суммарных значениях продольной сжимающей силы ΣN такая система уравнений будет иметь решения, не равные нулю, которые определяют различные формы бифуркации элемента, то есть могут являться критической силой. В рассматриваемом случае граничными условиями являются: $x=0 \rightarrow T_1=T_2=0 \rightarrow y=0$; $x=l \rightarrow T_1=T_2=0$, $y=0$, следовательно, неизвестные функции $y(z)$, $T_1(z)$ и $T_2(z)$ могут быть представлены однопараметрическими кривыми:

$$\begin{aligned} T_1(z) &= \alpha_1 \cdot \sin \chi z; \\ T_2(z) &= \alpha_2 \cdot \sin \chi z; \\ y(z) &= \alpha_y \cdot \sin \chi z, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\chi=n\pi/l$, n – целое неотрицательное число, определяющее форму изгиба панели при выпучивании из плоскости; α_1 , α_2 , α_y – неизвестные числовые коэффициенты, задающие амплитудные значения кривых выпучивания.

$$\begin{cases} \left(\Delta_{11} + \frac{\chi^2}{\xi_1} \right) \alpha_1 + \Delta_{12} \alpha_2 + \frac{\Sigma N}{\Sigma EI} c_1 \alpha_y = 0; \\ \Delta_{21} \alpha_1 + \left(\Delta_{22} + \frac{\chi^2}{\xi_2} \right) \alpha_2 + \frac{\Sigma N}{\Sigma EI} c_2 \alpha_y = 0; \\ \frac{\Sigma N}{\Sigma EI} c_1 \alpha_1 + \frac{\Sigma N}{\Sigma EI} c_2 \alpha_2 + \left[\frac{(\Sigma N)^2}{\Sigma EI} + \Sigma N \chi^2 \right] \alpha_y = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Нетривиальные решения системы уравнений (1), в которых искомыми являются коэффициенты $\alpha_1 \neq 0$, $\alpha_2 \neq 0$, можно получить, приравняв нулю детерминант, составленный из коэффициентов при неизвестных.

$$N_{кр} = - \frac{\chi^2 \Sigma EI^2 (\chi^4 + \chi^2 \xi_1 \Delta_{11} + \chi^2 \xi_2 \Delta_{22} + \xi_1 \xi_2 \Delta_{11} \Delta_{22} - \xi_1 \xi_2 \Delta_{12}^2)}{\left(\chi^2 (\chi^2 \Sigma EI - c_1^2 \xi_1 - c_2^2 \xi_2 + \xi_1 \Delta_{11} \Sigma EI + \xi_2 \Delta_{22} \Sigma EI) - \right. \\ \left. - \xi_1 \xi_2 (c_2^2 \Delta_{11} + c_1^2 \Delta_{22} - 2c_1 c_2 \Delta_{12} - \Delta_{11} \Delta_{22} \Sigma EI + \Delta_{12}^2 \Sigma EI) \right)}. \quad (7)$$

Наименьшие значения критической нагрузки получаются при изгибе элемента по одной полуволне синусоиды, что соответствует числу $n=1$. В случае двухсторонней панели с обшивками одинаковой тол-

$$N_{кр} = - \frac{\chi^2 \Sigma EI^2 (\chi^4 + 2\chi^2 \xi \Delta_{11} + \xi^2 \Delta_{11}^2 - \xi^2 \Delta_{12}^2)}{\left(\chi^2 (\chi^2 \Sigma EI - 2c^2 \xi + 2\xi \Delta_{11} \Sigma EI) - \xi^2 (2c^2 \Delta_{11} - 2c^2 \Delta_{12} - \Delta_{11}^2 \Sigma EI + \Delta_{12}^2 \Sigma EI) \right)}. \quad (8)$$

Результаты

В качестве расчетного варианта принимается стеновая панель (рис. 3) с обшивкой листами фанеры конструкционной (ФК) габаритами $0,012 \times 1,525 \times H$ м и ориентированно-стружечными плитами (ОСП) $0,012 \times 1,22 \times H$ м, где H – высота стены. Коэффициент жесткости шва ($\xi = 1/\delta S$, где δ – величина сдвига связи (коннектора) при единичной сдвигающей нагрузке) зависит как от типа и размера соединителей, так и от шага их расстановки S , поэтому может задаваться в широком диапазоне значений ($\xi = 1 \cdot 10^3 \dots 40 \cdot 10^3$ кН/м² при фанерной обшивке и $\xi = 0,5 \cdot 10^3 \dots 20 \cdot 10^3$ кН/м² при обшивке из ОСП) [8]. Высота сечения ребер принимается равной: $h_p = 0,15; 0,175$ и $0,2$ м, толщина обшивки $t_{об} = 0,012$ м, высота ребер $H = 2,5; 2,75$ и 3 м.

С увеличением параметра податливости сдвиговых связей ξ работа панели ста-

сокращение системы на $(\Sigma N)^2 / \Sigma EI$ дает детерминантное уравнение:

$$\begin{vmatrix} (\Delta_{11} + \chi^2 / \xi_1) & \Delta_{12} & c_1 \\ \Delta_{21} & (\Delta_{22} + \chi^2 / \xi_2) & c_2 \\ c_1 & c_2 & [\Sigma EI + \chi^2 (\Sigma EI)^2 / \Sigma N] \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

Раскрытием определителя относительно ΣN может быть выражена формула для вычисления величины критической нагрузки $N_{кр} = \Sigma N$:

щины $\Delta_{11} = \Delta_{22}$; $\Delta_{11} = \Delta_{22}$; $c_1 = c_2 = c$ и $\xi_1 = \xi_2 = \xi$, после подстановки в (7) получено упрощенное выражение:

новится эквивалентной работе составного композитного двутавра, стенка которого ориентирована в плоскости изгиба, что дает возможность значительно увеличить критическую нагрузку по сравнению с одиночными стойками без вовлечения в работу обшивки. Для стены с обшивкой из фанеры конструкционной при опирании листов обшивки на две стойки с размерами поперечного сечения стойки $0,05 \times 0,1$ м относительное возрастание доли критической нагрузки $|N_{кр}|$ составляет $0,42 \dots 2,26$, при размерах $0,05 \times 0,15$ м – $0,28 \dots 1,41$; при размерах $0,05 \times 0,2$ м – $0,20 \dots 1,02$. Для стен с обшивками из ориентированно-стружечных плит возрастание доли критической нагрузки наблюдается в пределах $0,39 \dots 1,3$; $0,33 \dots 0,81$ и $0,19 \dots 0,59$ при вышеуказанных параметрах сечения деревянных стоек.

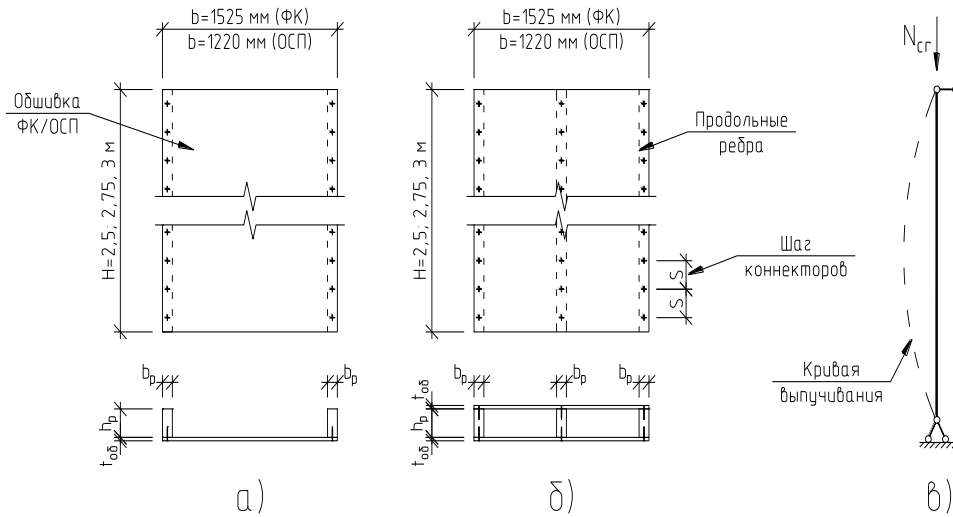


Рис. 3

Для стены с обшивкой из конструкционной фанеры при опирании листов на три стойки доля возрастания критической нагрузки $|N_{кр}|$ составляет 0,67...3,7; 0,42...2,3 и 0,3...1,65 при размерах поперечного сечения стоек панели 0,05×0,1 м; 0,05×0,15 м и 0,05×0,2 м соответственно. Применение обшивок из ориентированно-стружечных плит позволяет повысить значения критической $|N_{кр}|$ силы на 0,61...1,99, 0,39...1,21 и 0,28...0,87 при указанных выше параметрах сечения стоек соответственно. Результаты расчета изображены на графиках рис. 4.

Для инженерного расчета рассмотренных конструкций предлагается методика, основанная на определении характеристик цельного двутаврового сечения (с абсолютно неподатливыми связями сдвига) с введением корректирующего коэффициента k_ϕ , который учитывает негативный эффект от податливости связей, снижающий общую устойчивость сжатого элемента:

$$\phi = \phi_0 k_\phi, \quad (9)$$

где ϕ_0 – коэффициент, учитывающий возможность потери элементом устойчивости, определяемый, как для элемента с цельным композитным двутавровым сечением.

Значение корректирующего коэффициента определяется по формуле:

$$k_\phi = \frac{N_{кр, \xi_{факт}}}{N_{кр, \xi \rightarrow \infty}}, \quad (10)$$

где $N_{кр, \xi \rightarrow \infty}$ – критическая нагрузка для цельного двутаврового сечения; $N_{кр, \xi_{факт}}$ – критическая нагрузка для составного элемента с заданной жесткостью связей сдвига ξ .

Результаты вычислений значений корректирующего коэффициента k_ϕ для стены с двухсторонней обшивкой представлены в табл. 1.

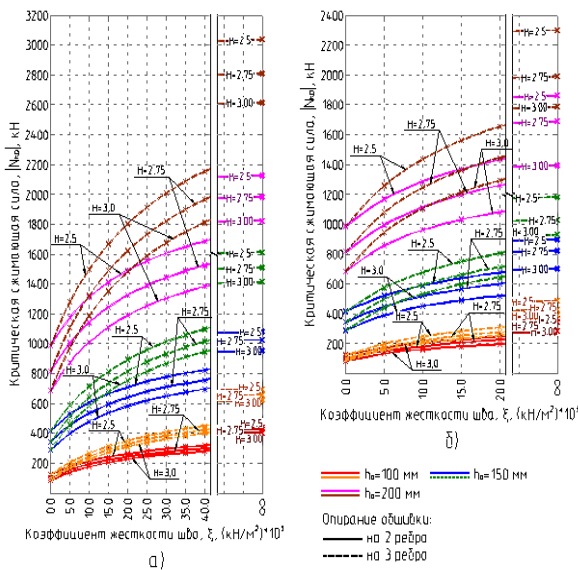


Рис. 4

Таблица 1

Сечение стоек $b \times h$, м	Высота стены h , м	Распределенная жесткость шва $\xi \cdot 10^3$, кН/м ²							
		5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0
Опираие обшивки на 2 ребра									
0,05×0,1	2,5	<u>0,399</u> 0,472	<u>0,483</u> 0,562	<u>0,549</u> 0,624	<u>0,596</u> 0,675	<u>0,639</u> –	<u>0,671</u> –	<u>0,700</u> –	<u>0,721</u> –
	2,75	<u>0,365</u> 0,441	<u>0,452</u> 0,534	<u>0,520</u> 0,605	<u>0,571</u> 0,652	<u>0,615</u> –	<u>0,648</u> –	<u>0,677</u> –	<u>0,702</u> –
	3,0	<u>0,345</u> 0,471	<u>0,437</u> 0,573	<u>0,506</u> 0,642	<u>0,561</u> 0,693	<u>0,603</u> –	<u>0,642</u> –	<u>0,672</u> –	<u>0,695</u> –
0,05×0,15	2,5	<u>0,487</u> 0,616	<u>0,561</u> 0,659	<u>0,616</u> 0,712	<u>0,658</u> 0,754	<u>0,692</u> –	<u>0,720</u> –	<u>0,741</u> –	<u>0,761</u> –
	2,75	<u>0,445</u> 0,547	<u>0,522</u> 0,631	<u>0,581</u> 0,689	<u>0,627</u> 0,732	<u>0,662</u> –	<u>0,692</u> –	<u>0,714</u> –	<u>0,740</u> –
	3,0	<u>0,420</u> 0,555	<u>0,501</u> 0,642	<u>0,563</u> 0,700	<u>0,611</u> 0,741	<u>0,652</u> –	<u>0,681</u> –	<u>0,708</u> –	<u>0,732</u> –
0,05×0,2	2,5	<u>0,553</u> 0,628	<u>0,618</u> 0,692	<u>0,665</u> 0,734	<u>0,702</u> 0,768	<u>0,732</u> –	<u>0,755</u> –	<u>0,775</u> –	<u>0,792</u> –
	2,75	<u>0,507</u> 0,591	<u>0,575</u> 0,661	<u>0,627</u> 0,708	<u>0,667</u> 0,745	<u>0,702</u> –	<u>0,726</u> –	<u>0,751</u> –	<u>0,768</u> –
	3,0	<u>0,481</u> 0,614	<u>0,552</u> 0,691	<u>0,608</u> 0,742	<u>0,651</u> 0,775	<u>0,686</u> –	<u>0,714</u> –	<u>0,738</u> –	<u>0,757</u> –
Опираие обшивки на 3 ребра									
0,05×0,1	2,5	<u>0,295</u> 0,405	<u>0,383</u> 0,507	<u>0,452</u> 0,581	<u>0,505</u> 0,632	<u>0,551</u> –	<u>0,589</u> –	<u>0,618</u> –	<u>0,646</u> –
	2,75	<u>0,278</u> 0,408	<u>0,371</u> 0,515	<u>0,442</u> 0,592	<u>0,498</u> 0,648	<u>0,543</u> –	<u>0,581</u> –	<u>0,615</u> –	<u>0,641</u> –
	3,0	<u>0,268</u> 0,406	<u>0,362</u> 0,516	<u>0,438</u> 0,596	<u>0,495</u> 0,652	<u>0,542</u> –	<u>0,582</u> –	<u>0,612</u> –	<u>0,643</u> –
0,05×0,15	2,5	<u>0,365</u> 0,487	<u>0,442</u> 0,572	<u>0,503</u> 0,635	<u>0,553</u> 0,682	<u>0,593</u> –	<u>0,627</u> –	<u>0,657</u> –	<u>0,681</u> –
	2,75	<u>0,342</u> 0,483	<u>0,426</u> 0,577	<u>0,488</u> 0,642	<u>0,541</u> 0,690	<u>0,582</u> –	<u>0,617</u> –	<u>0,648</u> –	<u>0,673</u> –
	3,0	<u>0,323</u> 0,472	<u>0,411</u> 0,573	<u>0,481</u> 0,641	<u>0,532</u> 0,692	<u>0,575</u> –	<u>0,611</u> –	<u>0,642</u> –	<u>0,668</u> –
0,05×0,2	2,5	<u>0,421</u> 0,548	<u>0,492</u> 0,625	<u>0,548</u> 0,678	<u>0,593</u> 0,721	<u>0,632</u> –	<u>0,662</u> –	<u>0,688</u> –	<u>0,708</u> –
	2,75	<u>0,393</u> 0,541	<u>0,472</u> 0,625	<u>0,531</u> 0,683	<u>0,578</u> 0,725	<u>0,615</u> –	<u>0,651</u> –	<u>0,677</u> –	<u>0,698</u> –
	3,0	<u>0,372</u> 0,528	<u>0,453</u> 0,618	<u>0,516</u> 0,678	<u>0,568</u> 0,723	<u>0,606</u> –	<u>0,642</u> –	<u>0,668</u> –	<u>0,692</u> –

Примечание: в числителе представлены значения для стены с обшивками из фанеры, в знаменателе – с обшивками из ориентированно-стружечной плиты. При промежуточных значениях величины сдвиговой жесткости ξ и высоты сечения стойки h_p (0,125; 0,175 м) значения корректирующего коэффициента k_φ следует определять по линейной интерполяции.

Влияние изменения температурно-влажностного режима внутренней среды на деформативность и устойчивость будет существенным для незащищенных наружных конструкций стеновых панелей и малозначимым – для внутренних. При увеличении влажности будет возрастать деформативность связей, следовательно, снижаться их жесткость и критическая сила.

Температурные воздействия на сухую древесину и обшивки панелей, по сравнению с влажностными воздействиями, несущественны [18]. Как известно, влажность интенсифицирует развитие деформаций ползучести древесины, что может быть учтено формулами [11]:

$$\gamma(\omega) = \frac{\gamma}{1 + \lambda\omega}, \quad (11)$$

$$\gamma(\omega) = \frac{\gamma}{1 + \lambda\omega}, \quad (12)$$

где $\gamma(\omega)$ – предельная характеристика ползучести соединения в момент стабилизации его деформации; γ – коэффициент, характеризующий скорость развития деформации ползучести во времени t (сут); λ – реологический параметр; ω – предельное значение накопленных остаточных деформаций, мм.

Таким образом, расчетный алгоритм для определения критической нагрузки для панелей на деревянном каркасе включает следующую последовательность:

1. Определение коэффициента редукции обшивок для учета неравномерного распределения нормальных сжимающих напряжений по ширине (эффект запаздывания сдвига). При этом необходимо учитывать анизотропные свойства материала обшивок.

2. Выбор типа соединителей, назначение их размера и шага расстановки, определение погонного коэффициента сдвиговой жесткости ξ .

3. Вычисление геометрических характеристик, составляющих поперечного сечения.

4. Подстановка полученных значений в формулы (7) или (8) и определение критической силы, сравнение ее с нормируемым значением [18], [19].

5. Для учета деформаций ползучести соединений вследствие повышенной (>15%) влажности древесины рекомендуется в инженерном расчете корректировать коэффициент k_ϕ (п. 3).

6. В случае невыполнения нормативных требований коэффициента запаса устойчивости необходимо увеличение геометрических характеристик сечения или повышение погонной жесткости связей, перерасчет по пп. 1...4.

ВЫВОДЫ

1. Созданы физико-математическая модель и расчетный алгоритм, позволяющие определить значение критической силы

для стеновой панели на деревянном каркасе с двухсторонней обшивкой из конструкционной фанеры и ОСП с учетом включения обшивок в совместную работу с продольными стойками каркаса за счет податливых механических соединений с повышенной сдвигоустойчивостью связей на границе "ребро-обшивка".

2. Установлено, что в зависимости от варьируемых статико-геометрических параметров конструкции можно добиться увеличения критической нагрузки на панель: до 230% для панели с обшивкой из фанеры конструкционной при опирании на две стойки и 366% – при опирании обшивки на три стойки; до 130% для панели с обшивкой из ОСП при опирании на две стойки и 200% – при опирании обшивки на три стойки.

3. Предложен инженерный расчет и корректирующий коэффициент k_ϕ , позволяющий производить расчет рассматриваемых конструкций упрощенным методом (как цельного сечения) и учитывающий снижение критической силы вследствие податливости связей сдвига.

4. Предложенную методику расчета деревокомпозитных панелей с податливыми связями рекомендуется использовать при проектировании стеновых конструкций наружных стен и внутренних помещений текстильных предприятий с химически агрессивной средой, а также жилых и общественных зданий для обеспечения их высокой экологической безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кавелин А.С.* Исследование работы на сдвиг гвоздевого соединения обшивки и ребра деревянной стеновой панели // *Строительство-2014: Современные проблемы промышленного и гражданского строительства: мат. междунар. науч.-практ. конф.* / Ростовский государственный строительный университет, Институт промышленного и гражданского строительства. Ростов н/Д, 2014. С. 98...100. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_24672247_47513863.pdf Дата доступа 12.01.2023.

2. *Лабудин Б.В., Воронков С.А., Гмырина А.П., Русланова А.П.* Исследование прочности стеновых панелей на деревянном каркасе для условий Крайнего Севера // *Строительная наука – XXI: теория, образование, практика, инновации Северарктическому региону: мат. междунар. науч.-техн.*

конф., 28–30 июня 2015 г. Архангельск, 2015. С. 187...193.

3. *Рощина С.И., Лисятников М.С., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Лукин М.В.* Применение высоких деревоклееных балок в покрытии зданий текстильных цехов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. № 5. С. 267...271.

4. ГОСТ 55658-2013. Панели стеновые с деревянным каркасом. Технические условия [Электронный ресурс]. – Введ. 2014–05–01. – Электрон. дан. // Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293776/4293776925.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.

5. *Черных А.Г., Черных А.С., Коваль П.С. и др.* Прочность и жесткость стеновых панелей на деревянном каркасе // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 171...179.

6. *Жаданов В.И., Инжутов И.С., Украинченко Д.А., Яричевский И.И.* О неиспользуемых резервах в проектировании панельных конструкций на основе деревянного каркаса // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 2 (686). С. 15...24.

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

8. *Русланова А.В.* Совершенствование конструкций и технологии изготовления деревоклееных панелей: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2021.

9. *Попов Е.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И.* Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб "Bulldog" // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: мат. Междунар. академических чтений / Курск. гос. университет. Курск, 2015. С.189...198.

10. *Андреев О.О.* Учет податливости соединений в методе конечных элементов // Численные методы и алгоритмы: Труды ЦНИИСК. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1975. Вып. 46. С. 54...62.

11. *Лабудин Б.В.* Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой. Архангельск: Архангельский гос. техн. ун-т, 2007.

12. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1981.

13. *Popov E.V., Sopilov V.V., Bardin I.N., & Lyapun D.M.* (2021). Calculation of Vertical Deformations of Composite Bending Wooden Structures with Non-Linear Behavior of Shear Bonds. 109–116. Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_15 Дата доступа 12.01.2023.

14. *Labudin B., Popov E., Vladimirova O., Sopilov V., Bobyleva A.* Wood-Composite Structures with Non-Linear Behavior of Semi-Rigid Shear Ties; 2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 97 Article No 9702. doi: 10.4123/CUBS.97.2

15. *Popov E.V. et al.* Calculation features of compressed-bent build-up timber columns with nonlinear-deformable shear bracings. 2022 IOP Conf. Ser.:

Mater. Sci. Eng. 1211 012007 DOI 10.1088/1757-899X/1211/1/012007. Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1211/1/012007/meta> Дата доступа 12.01.2023.

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

17. *Labudin B., Popov E., Stolypin D., Sopilov V.* The wood composite ribbed panels on mechanical joints. E3S Web Conf. Volume 91, 2019. Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018). Режим доступа: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/17/e3sconf_tpacee2019_02021/e3sconf_tpacee2019_02021.html Дата доступа 12.01.2023.

18. СП 64.13330.2017. Свод правил. Деревяные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II–25–80 (с Изменением №1) [Электронный ресурс]. – Введ. 2017–07–28. Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456082589>, свободный.

19. CEN EN 1995–1–1:2004/A2–2014 Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1–1: General – Common rules and rules for buildings. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/552380618> Дата доступа 12.01.2023.

REFERENCES

1. Kavelin A.S. The study of the shear work of the nail connection of the sheathing and the rib of the wooden wall panel // In the collection: Construction-2014: modern problems of industrial and civil construction. Materials of the international scientific-practical conference. Rostov State University of Civil Engineering, Institute of Industrial and Civil Engineering. 2014. S. 98...100. Access mode: https://elibrary.ru/download/elibrary_24672247_47513863.pdf Access date 01/12/2023.

2. *Labudin B.V., Voronkov S.A., Gmyrina A.P., Ruslanova A.P.* Study of the strength of wall panels on a wooden frame for the conditions of the Far North // In the collection: Building science – XXI: theory, education, practice, innovations for the North Arctic region. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, June 28–30, 2015. P. 187...193.

3. *Roshchina S.I., Lisyatnikov M.S., Melekhov V.I., Labudin B.V., Lukin M.V.* The use of high wood glued beams in the coating of buildings of textile shops // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2016. No. 5 (365). S. 267...271.

4. GOST 55658-2013 Wall panels with a wooden frame. Specifications [Electronic resource]. – Input. 2014–05–01. – Electron. Dan. // Techexpert: electronic fund of legal and normative-technical documentation. – Access mode: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293776/4293776925.pdf>, free. – Title from the screen.

5. *Chernykh A.G., Chernykh A.S., Koval P.S.* [et al.] Strength and stiffness of wall panels on a wooden

frame // Modern problems of science and education 2012. No. 3. P. 171..179.

6. Zhadanov V.I., Inzhutov I.S., Ukrainchenko D.A., Yarichevsky I.I. On unused reserves in the design of panel structures based on a wooden frame // News of higher educational institutions. Building. 2016. No. 2 (686). Pp. 15...24.

7. Mekhanikov V.M. Connection of elements in structures using DSP: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.23.01. M., 1995. 211 p.

8. Ruslanova A.V. Improving the designs and manufacturing technology of wood-composite panels: dis. ... candidate of technical sciences: 05.21.05 /; [Place of defense: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov]. Arkhangelsk, 2021. 178 p.

9. Popov E.V. Shear test of elements of wooden structures connected with the use of toothed washers "Bulldog" / Popov E.V., Labudin B.V., Melekhov V.I. // Safety of the building fund of Russia. Problems and Solutions: Materials of the International Academic Readings / Kursk. state university. Kursk, 2015. Pp. 189...198.

10. Andreev O.O. Accounting for the compliance of joints in the finite element method // Sat. scientific papers. M.: TsNIISK im. V.A. Kucherenko, 1975. Issue 46. S. 54...62.

11. Labudin B.V. Improvement of glued wooden structures with a spatially regular structure: monograph. Arkhangelsk: Arkhang. state tech. un-t, 2007. 267 p.

12. Recommendations for testing joints of wooden structures. M.: TsNIISK im. V.A. Kucherenko, 1981. 41 p.

13. Popov E.V., Sopilov V.V., Bardin I.N. & Lypin D.M. (2021). Calculation of Vertical Deformations of Composite Bending Wooden Structures with Non-linear Behavior of Shear Bonds. 109–116. Access mode: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_15 Access date 01/12/2023.

14. Labudin B., Popov E., Vladimirova O., Sopilov V., Bobyleva A. Wood-Composite Structures with Non-Linear Behavior of Semi-Rigid Shear Ties; 2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 97 Article No 9702. doi: 10.4123/CUBS.97.2

15. Popov E.V. et al. Calculation features of compressed-bent build-up timber columns with nonlinear-deformable shear bracings. 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. sci. Eng. 1211 012007 DOI 10.1088/1757-899X/1211/1/012007. Access mode: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1211/1/012007/meta> Access date 01/12/2023.

16. Rzhantsyn A.R. Composite rods and plates: scientific publication / A.R. Rzhantsyn. M.: Stroyizdat, 1986. 314 p.

17. Labudin B., Popov E., Stolypin D., Sopilov V. The wood composite ribbed panels on mechanical joints. E3S Web Conf. Volume 91, 2019. Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018). Access mode: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/17/e3sconf_tpacee2019_02021/e3sconf_tpacee2019_02021.html

18. SP 64.13330.2017. Set of rules. Wooden structures. Updated edition of SNiP II–25–80 (with Amendment No. 1) [Electronic resource]. – Enter. 2017-07-28. Techexpert: electronic fund of legal and regulatory and technical documentation. – Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/456082589>, free.

19. CEN EN 1995-1-1:2004/A2-2014 Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Accessmode: <https://docs.cntd.ru/document/552380618> Accessdate 01/12/2023.

Рекомендована кафедрой инженерных конструкций, архитектуры и графики Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Поступила 19.01.23.