

**К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК
НА НАКЛОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЯХ
ДЛЯ ПОКРЫТИЙ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ
ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**ON THE QUESTION OF DESIGNING COMPOSITE WOODEN BEAMS
ON INCLINED METAL RODS FOR COATINGS OF RECONSTRUCTED
IN TEXTILE INDUSTRY**

В.И. ЛИНЬКОВ
V.I. LINKOV

(Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering)
E-mail: Linkov-kdip@mail.ru

На кафедре металлических и деревянных конструкций НИУ МГСУ развивается направление реконструкции объектов текстильной промышленности на основе деревянных элементов составного сечения на наклонных ввинченных стержнях без применения клея. Представлены результаты расчета деревянных изгибаемых элементов с учетом фактической податливости соединений по методике Г.В.Свенцицкого. Выполнено сравнение результатов расчета с результатами испытаний натурных конструкций. Установлено минимально допустимое количество наклонных ввинченных стержней для обеспечения совместной работы составного сечения в балках пролетом 6 и 9 м. Для расчетов по методике СП 64.13330.2017 "Деревянные конструкции" определены коэффициенты K_w и $K_{ж}$ с учетом фактической податливости НМС-соединений на ввинченных стержнях.

At the Department of Metal and Wood Structures in NRU MGSU direction of reconstruction of textile industry facilities on the basis of wooden elements of the composite section on inclined screwed rods without application of glue. The results of calculation of composite wooden elements with taking into account the actual compliance of compounds according to the method of GV Sventsitsky. The results of the calculation are compared with the results of field tests constructions. The minimum allowed number of inclined screwed rods to ensure the joint work of the composite section in the beams by a span of 6 and 9 m. For calculations according to the methodology set of rules 64.13330.2017 "Wooden structures" the coefficients K_w and K_h are determined taking into account the actual compliance of the connections on screwed rods.

Ключевые слова: деревянные конструкции составного сечения, податливые связи, соединения на наклонных ввинченных стержнях, деформации сдвига, коэффициент податливости.

Keywords: wooden constructions of composite section, compliant connections, connections on inclined screwed rods, shear deformation, compliance coefficient.

Для деревянных элементов составного сечения в качестве податливых связей применяют соединения на наклонных металлических стержнях (НМС) без использования клея [1], [3], [4], [6], [9]. Такие соединения, в отличие от клеевых [2], [10...12], обладают податливостью [4], [7], [8], что приводит к снижению несущей способности деревянных элементов составного сечения [5]. Цель работы – учет влияния податливости соединений на наклонных ввинченных стержнях при проектировании составных деревянных балок.

Применим методику Г.В.Свенцицкого и рассмотрим балку составного сечения под равномерно распределенной нагрузкой. Поперечное сечение балки составлено из трех брусьев, которые соединяются в единый пакет с помощью наклонных металлических стержней. Принимаем линейную зависимость между сдвигающими усилиями и деформациями податливых соединений. Погонное сдвигающее усилие на опоре балки в шве сплачивания:

$$T'_{\text{оп}} = R_A \frac{S_{1-1}}{I_{\text{цельн}}} = \frac{qL}{2} \frac{S_{1-1}}{I_{\text{цельн}}},$$

где $R_A = \frac{qL}{2}$ – опорная реакция балки при равномерно распределенной нагрузке; $I_{\text{цельн}}$ – момент инерции поперечного сечения, как для цельного элемента; S_{1-1} – статический момент сдвигаемой части сечения относительно нейтральной оси балки. Обозначим количество связей в шве на всей длине балки $n_{\text{св}}$. При равномерной расстановке и пролете конструкции L шаг связей составит $L/n_{\text{св}}$. Тогда усилие на одну связь на опоре для абсолютно жесткого соединения:

$$T_{\text{св.цельн}} = T'_{\text{оп}} \frac{L}{n_{\text{св}}} = \frac{qL}{2} \frac{S_{1-1}}{I_{\text{цельн}}} \frac{L}{n_{\text{св}}}.$$

Величина сдвига на опоре балки зависит от расстояния e_1 между центрами тяжести смежных брусьев поперечного сечения балки и угла наклона опорного сечения под нагрузкой:

- для составной балки без связей сдвига под равномерно распределенной нагрузкой

$$\delta_0 = e_1 \operatorname{tg} \alpha = e_1 \frac{qL^3}{24E \sum I_1},$$

- то же для балки цельного сечения:

$$\delta_{\text{ц}} = e_1 \operatorname{tg} \alpha = e_1 \frac{qL^3}{24EI_{\text{цельн}}}.$$

Сдвиг на опоре балки составного сечения на податливых связях $\delta_{\text{п}}$ составит:

$$\delta_{\text{п}} = \delta_0 - \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.цельн}}} \delta_0 = \delta_0 \left(1 - \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.цельн}}}\right).$$

При этом величине сдвига $\delta_{\text{п}}$ соответствует усилие в связи $T_{\text{св.п}}$. Поскольку принята линейная зависимость между сдвигающими усилиями и деформациями податливых соединений, справедливо отношение $\frac{\delta_{\text{п}}}{T_{\text{св.п}}} = \frac{\delta}{T_{\text{св}}}$. Отсюда $\delta_{\text{п}} = \frac{\delta T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св}}}$, где $T_{\text{св}}$ – расчетное усилие на связь, δ – соответствующая этому усилию деформация сдвига для данного вида соединения.

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\delta T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св}}} &= \delta_0 \left(1 - \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.цельн}}}\right), \\ \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.цельн}}} &= \frac{1}{1 + \frac{T_{\text{св.цельн}}}{\delta_0} \frac{\delta}{T_{\text{св}}}}, \\ \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.цельн}}} &= \frac{1}{1 + 12 \frac{\sum I_1}{I_{\text{цельн}}} \frac{E S_{1-1}}{e_1 L n_{\text{св}}} \frac{\delta}{T_{\text{св}}}}. \end{aligned}$$

Обозначим

$$\alpha = \frac{\sum I_1}{I_{\text{цельн}}}, \quad B = 12 \frac{E S_{1-1}}{e_1 L n_{\text{св}}} \frac{\delta}{T_{\text{св}}}.$$

Тогда

$$\frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.цельн}}} = \frac{1}{1 + \alpha B}.$$

Коэффициент B называется коэффициентом податливости шва. Тот же коэффициент, полученный Г.В.Свенцицким для синусоидальной нагрузки, составил:

$$B = \pi^2 \frac{E S_{1-1}}{e_1 L n_{\text{св}}} \frac{\delta}{T_{\text{св}}}.$$

Прогиб балки составного сечения без связей сдвига:

$$f_0 = f_{\text{цельн}} \frac{I_{\text{цельн}}}{\sum I_1} = f_{\text{цельн}} \frac{1}{\alpha},$$

где $f_{\text{цельн}}$ – прогиб балки цельного сечения.

Если в швах балки приложить усилия, соответствующие несущей способности податливых связей $T_{\text{св.п}}$, то прогиб f_0 умень-

шится на величину $(f_0 - f_{\text{цельн}}) \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.ц}}}$.

Тогда прогиб балки на податливых связях составит:

$$f_{\text{п}} = f_0 - (f_0 - f_{\text{цельн}}) \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.ц}}} = f_{\text{цельн}} + f_{\text{цельн}} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha B} \right) = f_{\text{цельн}} \frac{1 + B}{1 + \alpha B}. \quad (1)$$

Нормальные напряжения в балке цельного сечения $\sigma_{\text{цельн}}$ и в балке составного сечения без связей сдвига σ_0 составят:

$$\sigma_{\text{цельн}} = \frac{M}{I_{\text{цельн}}} Y, \quad \sigma_0 = \frac{M}{\Sigma I_1} Y_1,$$

где Y – координата наиболее удаленной точки сечения относительно нейтральной оси балки; Y_1 – расстояние от нейтральной

оси ветви, в которой определяют напряжения, до расчетной точки этой ветви. Также если в швах балки приложить усилия, соответствующие несущей способности податливых связей $T_{\text{св.п}}$, то напряжения σ_0 уменьшатся на величину $(\sigma_0 - \sigma_{\text{цельн}}) \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.ц}}}$.

Тогда напряжения в балке на податливых связях составят:

$$\sigma_{\text{п}} = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_{\text{цельн}}) \frac{T_{\text{св.п}}}{T_{\text{св.ц}}} = \sigma_{\text{цельн}} + \sigma_{\text{цельн}} \left(\frac{Y_1}{\alpha Y} - 1 \right) \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha B} \right) = \sigma_{\text{цельн}} \frac{1 + \frac{Y_1 B}{\alpha Y}}{1 + \alpha B} = \frac{M}{I_{\text{цельн}}} Y \frac{1 + \frac{Y_1 B}{\alpha Y}}{1 + \alpha B}. \quad (2)$$

Параметры $1 / \left(\frac{1 + B}{1 + \alpha B} \right)$ и $1 / \left(\frac{1 + \frac{Y_1 B}{\alpha Y}}{1 + \alpha B} \right)$ в формулах (1) и (2) соответствуют коэффициентам $K_{\text{ж}}$ и $K_{\text{в}}$, которые применяют при расчете прогибов и нормальных напряжений в деревянных балках составного сечения по СП 64.13330.2017, а также позволяют учесть количество и фактическую деформативность податливых связей, которая представлена в коэффициентах B как отношение деформации сдвига δ соединения к сдвигающему усилию $\frac{\delta}{T_{\text{св}}}$ и определяется экспериментально. Для НМС-соединений деформации δ при нагрузке, соответствующей расчетной несущей способности, соединения составили: для соединений тип 1 на наклонных ввинченных стержнях-винтах $\delta_1 = 0,73$ мм; для соединений тип 2 на наклонных ввинченных стержнях-шурупах $\delta_2 = 0,65$ мм; для соединений тип 3 на НМС с шайбами $\delta_3 = 0,42$ мм.

Для проверки полученных выражений (1) и (2) сравним расчетные и фактические значения прогибов и нормальных напряже-

ний, полученные при испытаниях составных деревянных балок натуральных размеров с НМС-соединениями на ввинченных стержнях. Балки составного сечения из 3-х брусьев размерами $b \times h = 150 \times 150$ мм каждый нагружались кратковременной нагрузкой двумя сосредоточенными силами в четвертях пролета. Для обеспечения сопоставимости результатов расчета и экспериментальных данных нагрузку на балку, действующую в виде сосредоточенных сил, приводили к эквивалентной равномерно распределенной нагрузке по величине изгибающего момента. Результаты представлены в табл. 1 (нормальные напряжения и прогибы, фактические и расчетные, в середине пролета балок составного сечения на наклонных ввинченных стержнях) и на графиках на рис. 1 (расчетные и фактические нормальные напряжения и прогибы деревянных балок составного сечения на наклонных металлических стержнях без применения клея: а – нормальные напряжения, б – прогибы в середине пролета).

Таблица 1

№ ступ.	M, кН·м	Нормальные напряжения, МПа					Прогибы в середине пролета, мм				
		$\sigma_{н.1}^*$	$\sigma_{н.2}^*$	$\sigma_{н.3}^*$	$\sigma_{сост. расч.}$	$\sigma_{н. факт.1}$	f.1*	f.2*	f.3*	f _{сост. расч.}	f _{факт.1}
1	6,075	1,36	1,34	1,29	1,41	1,34	3,05	2,95	2,62	3,33	3,17
2	12,15	2,72	2,69	2,59	2,82	2,74	6,10	5,9	5,24	6,67	6,47
3	18,225	4,07	4,03	3,88	4,24	3,98	9,15	8,86	7,87	10,00	9,40
4	24,3	5,43	5,37	5,17	5,65	5,53	12,20	11,81	10,49	13,33	13,07
5	30,375	6,79	6,71	6,47	7,06	6,85	15,25	14,76	13,11	16,67	16,17
6	36,45	8,15	8,06	7,76	8,47	7,96	18,30	17,71	15,73	20,00	18,80
7	42,53	9,50	9,40	9,05	9,88	9,69	21,35	20,66	18,35	23,33	22,87
8	48,6	10,86	10,74	10,35	11,29	10,62	24,41	23,61	20,97	26,67	25,07
9	54,675	12,22	12,08	11,64	12,71	12,45	27,46	26,57	23,60	30,00	29,40
10	60,75	13,58	13,43	12,93	14,12	13,69	30,51	29,52	26,22	33,33	32,33

Примечание. * - $\sigma_{н.1}$, f.1 – нормальные напряжения и прогибы балки составного сечения с соединениями тип 1; $\sigma_{н.2}$, f.2 – то же, тип 2; $\sigma_{н.3}$, f.3 – то же, тип 3.



Рис. 1

На рис. 1 представлены нормальные напряжения (рис. 1-а) и прогибы (рис. 1-б) в середине пролета, расчетные для балки составного сечения на податливых связях и фактические, полученные из эксперимента. Графики отражают работу материалов и соединений в упругой стадии в пределах расчетной несущей способности конструкции. На основании деформаций δ_1 , δ_2 и δ_3 при расчете балок для каждого типа соединений определяли коэффициент податливости шва В и вычисляли расчетные значения прогибов и нормальных напряжений на основании выражений (1) и (2) для трех типов соединений: 1 – на наклонных ввинченных стержнях-винтах (кривые 1); 2 – на наклонных ввинченных стержнях-шурупах (кри-

вые 2); 3 – на наклонных стержнях с шайбами (кривые 3). Там же представлены фактические нормальные напряжения и прогибы балки составного сечения на соединении тип 1 (кривые 4) и расчетные значения прогибов и напряжений по методике СП 64.13330–2017 (кривые 5).

Из графиков на рис. 1 и табл. 1 следует, что на уровне расчетной несущей способности конструкций фактические прогибы и напряжения больше расчетных на 5...8% и 1...2% соответственно. Расчетные прогибы и нормальные напряжения, определенные по методике СП 64.13330–2017, больше расчетных значений, полученных по выражениям (1) и (2), на 9...12% и 4...5% соответственно.

Из выполненных расчетов следует, что выражения (1) и (2) позволяют получать результаты, более точно отражающие напряженно-деформированное состояние и работу конструкций составного сечения по сравнению с методикой СП 64.13330–2017. Более высокая, по сравнению со стандартной методикой, сходимость фактических и расчетных данных получена за счет применения в расчетах фактических деформаций соединений и соответствующих коэффициентов жесткости шва.

Определим для соединений на наклонных ввинченных стержнях значения коэффициентов K_w и $K_{ж}$, учитывающих снижение несущей способности составных деревянных конструкций за счет податливости связей сдвига. В расчетах рассмотрены де-

ревянные балки составного сечения пролетом 6 и 9 м с количеством слоев от 2 до 10 брусьев и с количеством податливых связей на полупролете конструкции от 2 до 10 наклонных ввинченных стержней. Деформации сдвига приняты максимальными из трех рассмотренных типов соединений $\delta_1=0,73$ мм. Составные сечения приняты из одинаковых брусьев сечением $b \times h = 100 \times 100, 125 \times 125, 150 \times 150, 175 \times 175, 200 \times 200$ мм. Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 2 (коэффициенты условия работы K_w и $K_{ж}$ для расчета деревянных балок составного сечения пролетом 6 и 9 м. Соединения на наклонных ввинченных стержнях без применения клея).

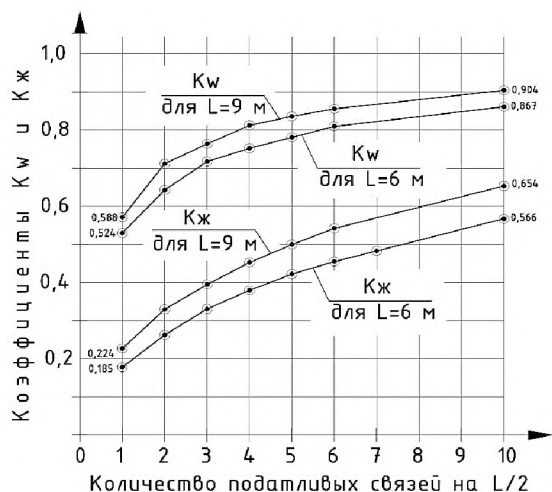


Рис. 2

Графики на рис. 2 позволяют установить минимальное количество податливых связей в виде наклонных ввинченных стержней: для балок составного сечения пролетом 6 м – 3 стержня, для балок составного сечения пролетом 9 м – 4 стержня на полупролете конструкции.

Установлен возможный диапазон изменения коэффициентов K_w и $K_{ж}$ для деревянных элементов составного сечения с соединениями на наклонных ввинченных стержнях.

По графикам на рис. 2 следует определять значения коэффициентов K_w и $K_{ж}$ для деревянных элементов составного сечения на податливых связях в виде наклонных ввинченных стержней в зависимости от

расчетного количества стержней на полупролете конструкции.

ВЫВОДЫ

1. На основе методики Г.В.Свенцицкого выполнены расчеты по определению нормальных напряжений и прогибов составных деревянных элементов с соединениями на наклонных ввинченных стержнях без применения клея. При этом учитывалась фактическая податливость соединения, так как для вычисления коэффициентов податливости принимали фактические деформации НМС-соединений, полученные из испытаний натуральных конструкций.

2. Выполнено сравнение расчетных значений прогибов и нормальных напряжений с фактическими параметрами напряженно-деформированного состояния натуральных конструкций. Применяя в расчетах фактические деформации НМС-соединений на наклонных ввинченных стержнях и соответствующие коэффициенты жесткости шва, получаем минимальную разницу между фактическими и расчетными значениями прогибов и нормальных напряжений, которая для балок составного сечения на наклонных ввинченных стержнях составила 5 и 1%, тогда как расчет по методике СП 64.13330.2017 дает расхождение в 12 и 5% соответственно.

3. Расчетами установлено минимально допустимое количество податливых связей в виде наклонных ввинченных стержней, необходимых для обеспечения совместной работы брусьев составного сечения балки. Для элементов пролетом 6 м – не менее 3-х наклонных ввинченных стержней, для элементов пролетом 9 м – не менее 4-х наклонных ввинченных стержней на полупролете конструкции.

4. Для проектирования по методике СП 64.13330.2017 составных деревянных элементов на наклонных ввинченных стержнях расчетами установлены и представлены в виде графиков значения коэффициентов K_w и $K_{ж}$, которые определены с учетом фактической деформативности соединений на наклонных ввинченных стержнях в зависимости от количества податливых связей на

ЛИТЕРАТУРА

1. Пятикрестовский К.П., Травуш В.И., Погорельцев А.А., Клюкин А.А. Разработка конструкций из цельной древесины для объектов инфраструктуры // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2018, т. 14, № 1. С.145...154.

2. Турковский С.Б. и др. Клееные деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). – М.: РИФ "Стройматериалы, 2013.

3. Линьков В.И. К оценке деформативности соединений деревянных элементов на наклонных металлических стержнях без применения клея // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017, №3. С. 11...14.

4. Линьков В.И. Соединения на наклонных ввинченных стержнях в деревянных балках для реконструкции зданий текстильной промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 3. С. 212...217.

5. Линьков В.И. Моделирование работы деревянных балок составного сечения на податливых связях с применением теории составных стержней А.Р. Ржаницына // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011, № 5. С. 30...35.

6. Макаров Г.П., Фролов А.Ю. Соединения элементов деревянных конструкций с применением стальных стержней (штырей) и их огнестойкость // В сб.: Наука, образование и экспериментальное проектирование. – Труды МАРХИ: Мат. Междунар. научн.-практ. конф. – М.: МАРХИ, 2015. С.384...386.

7. Попов Е.В., Филиппов В.В., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Тюрикова Т.В. Влияние жесткости связей сдвига при расчете ребристых панелей на деревянном каркасе // Изв. вузов. Лесной журнал. – 2016, № 4 (352). С. 136...146.

8. Жаданов В.И., Аркаев М.А., Котлов В.Г. Исследования деревянных балок, усиленных витыми крестообразными стержнями // Промышленное и гражданское строительство. – 2017, № 11. С. 5...11.

9. Клюкин А.А., Пятикрестовский К.П. Покрытие-оболочка с ребрами из цельнодеревянных элементов составного сечения // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. – 2015, № 1. С. 103...106.

10. Series Type solutions for built-up timber beams with semi-rigid connections. Proceedings of the Institution of Civil Engineers (London). – 1980. P. 707...719.

11. Walford G. Bryan. Tests on nailed and glued layered timber cylindrical shells // ASCE J Struct. Div. – V. 106, 1980. P. 247...263.

12. E. George Stern. Nailed Flitch beams and griders providing opportunities in wood construction. Virginia Polytechnic Institute & State University Department. – VA, USA. 1982. P. 55...64.

1. Pyatikrestovskij K.P., Travush V.I., Pogorelcev A.A., Klyukin A.A. Razrabotka konstrukcij iz celnoj drevesiny dlya obektov infrastruktury // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2018, t. 14, № 1. S.145...154.

2. Turkovskij S.B. i dr. Kleenye derevyannye konstrukcii s uzlami na vkleennyh sterzhnyah v sovremenom stroitelstve (sistema CNIISK). – M.: RIF "Strojmaterialy, 2013.

3. Linkov V.I. K ocenke deformativnosti soedinenij derevyannyh elementov na naklonnyh metallicheskih sterzhnyah bez primeneniya kleya // Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzhenij. – 2017, №3. S. 11...14.

4. Linkov V.I. Soedineniya na naklonnyh vvinchennyh sterzhnyah v derevyannyh balkah dlya rekonstrukcii zdaniy tekstilnoj promyshlennosti // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2017, № 3. S. 212...217.

5. Linkov V.I. Modelirovanie raboty derevyannyh balok sostavnogo secheniya na podatlyvyh svyazyah s primeneniem teorii sostavnyh sterzhnej A.R. Rzhаницына // Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzhenij. – 2011, № 5. S. 30...35.

6. Makarov G.P., Frolov A.Yu. Soedineniya elementov derevyannyh konstrukcij s primeneniem stalnyh sterzhnej (shytyrej) i ih ognestojkost // V sb.: Nauka, obrazovanie i eksperimentalnoe proektirovanie. – Trudy MARHI: Mat. Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. – M.: MARHI, 2015. S. 384...386.

7. Popov E.V., Filippov V.V., Melehov V.I., Labudin B.V., Tyurikova T.V. Vliyanie zhestkosti svyazej sdviga pri raschete rebristyh panelej na derevyanom karkase // Izv. vuzov. Lesnoj zhurnal. – 2016, № 4 (352). S. 136...146.

8. Zhadanov V.I., Arkaev M.A., Kotlov V.G. Issledovaniya derevyannyh balok, usilennyh vitymi krestoobraznymi sterzhnyami // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2017, № 11. S. 5...11.

9. Klyukin A.A., Pyatikrestovskij K.P. Pokrytie-obolochka s rebrami iz celnoderevyannyh elementov sostavnogo secheniya // Vestnik Irkutskogo gos. tehn. un-ta. – 2015, № 1. S. 103...106.

10. Series Type solutions for built-up timber beams with semi-rigid connections. Proceedings of the Institution of Civil Engineers (London). – 1980. P.707...719.

11. Walford G. Bryan. Tests on nailed and glued layered timber cylindrical shells // ASCE J Struct. Div. – V. 106, 1980. P. 247...263.

12. E. George Stern. Nailed Flitch beams and griders providing opportunities in wood construction. Virginia Polytechnic Institute & State University Department. – VA, USA. 1982. P. 55...64.

Рекомендована кафедрой металлических и деревянных конструкций. Поступила 16.04.18.