

УДК 624.072.2.011.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.119

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СИСТЕМ ПЕРЕКРЕСТНЫХ БАЛОК ИЗ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА КВАДРАТНОМ ПЛАНЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ
ДИНАМИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

А.В. Турков, д-р техн. наук, зав. каф.

В.И. Коробко, д-р техн. наук, проф. каф.

А.А. Макаров, аспирант

Приокский государственный университет, Наугорское шоссе, д. 29, г. Орел, Россия, 302020; e-mail: vikor10@mail.ru, aturkov@bk.ru, mak_ar@inbox.ru

Рассмотрены результаты экспериментального изучения системы перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане при изменении жесткости узловых соединений. Определена фактическая податливость узловых соединений по результатам экспериментально-теоретических исследований. В ходе эксперимента проведены статистические и динамические испытания, в результате которых получены максимальный прогиб и частота собственных колебаний системы. Установлено, что при уменьшении жесткости узлового соединения максимальный прогиб увеличивается, частота собственных колебаний системы снижается. Сопоставлены теоретические и экспериментальные данные: экспериментальные прогибы и частоты больше полученных расчетным путем. Разница между экспериментальными и теоретическими прогибами достигает 7,54 %, по частотам собственных колебаний – 0,69 %. Основанием для подобных расхождений являлось то обстоятельство, что за счет высокой степени податливости узлов системы ее деформирование при высоких уровнях нагрузки происходит в нелинейной области. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями коэффициента, связывающего частоту основного тона собственных поперечных колебаний, распределенную по площади массу конструкции и максимальный прогиб при действии равномерно распределенной нагрузки, достигает 7,97 %. На основании исследования можно сделать вывод о достаточно хорошей сходимости значений численных и экспериментальных прогибов и частот собственных колебаний, а также о применимости этого экспериментального коэффициента для систем перекрестных балок.

Ключевые слова: система перекрестных балок, испытательный стенд, динамические испытания, статические испытания, модуль упругости, частота собственных колебаний, максимальный прогиб.

Для цитирования: Турков А.В., Коробко В.И., Макаров А.А. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане при изменении динамических и статических нагрузок // Лесн. журн. 2017. № 5. С. 119–126. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.119

Введение

Системы перекрестных балок (СПБ) являются одними из самых эффективных деревянных пространственных конструкций. Исследованиями СПБ занимались такие крупные ученые, как Э.Н. Байда [1], В.А. Игнатьев [2], Б.Н. Кутуков [7], Е.И. Светозарова и Б.В. Лабудин [8–12], Л.Н. Лубо [13], А. Yettram и Н. Husain [18], W. Martin [16], P. Mase [17] и др. Вопросам взаимосвязи максимальных прогибов и частот собственных колебаний балок и пластинок посвящены работы В.И. Коробко, А.В. Туркова и К.В. Марфина [3–6, 15], для СПБ выполнены исследования А.В. Туркова и А.А. Макарова [14].

Цель данного исследования – получение экспериментальных статических и динамических параметров СПБ и сопоставление их с численными данными для оценки применимости формулы В.И. Коробко к СПБ на квадратном плане.

Объекты и методы исследования

Статические и динамические испытания системы перекрестных балок проводили на специальном стенде (рис. 1).

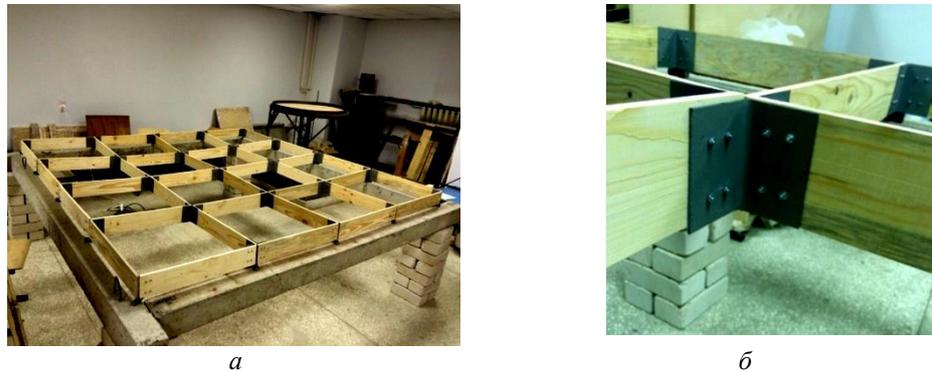


Рис. 1. Конструкция СПБ (а) и узел крепления элементов СПБ (б)

Стенд представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из вертикальных опор, сложенных из кирпича и установленных по ее углам. По кирпичным опорам сверху уложены железобетонные балки сечением 120×130 мм, на которые СПБ в контурных узлах опирается через стальные цилиндрические стержни диаметром 20 мм и длиной 50 мм. Сама система выполнена из деревянных элементов цельного сечения 10×100 мм длиной 590 мм, которые в узлах соединяются с помощью стальных гнутых уголков из листа толщиной 1 мм на болтах М6. Размер СПБ в плане – 2400×2400 мм, размер ячейки – 600×600 мм.

Вначале экспериментально определяли фактическую податливость узловых соединений. Элементы СПБ моделировали стержнями со вставками на концах [15], которые в свою очередь характеризовали податливость узловых соединений. По результатам расчетов и экспериментальным прогибам и частотам колебаний определяли фактическую податливость узлов при креплении элементов нагелями (болтами), для 4 болтов – $EI_{вс}/EI_{эл} = 0,0033$, для 2 болтов – $EI_{вс}/EI_{эл} = 0,0013$ (здесь $EI_{вс}$ и $EI_{эл}$ – соответственно изгибная жесткость вставки и деревянного элемента СПБ).

Для определения прогиба СПБ нагружали статической сосредоточенной нагрузкой во всех узлах (кроме опорных) пятью (1–5) ступенями. Вес каждой ступени в пересчете на равномерно распределенную нагрузку $15,625 \text{ Н/м}^2$. После снятия показаний (по индикатору) от максимальной нагрузки, которая составляла $78,125 \text{ Н/м}^2$, СПБ разгружали и после 15 мин «отдыха» снова загружали. Для каждого типа СПБ испытания проводили не менее 3 раз до получения стабильных значений экспериментальных прогибов (в табл. 1).

Таблица 1

**Экспериментальный максимальный прогиб (мм)
СПБ при различной податливости узловых соединений**

Ступень	Нагрузка, Н/м^2	Максимальный прогиб при количестве болтов в узле, шт.	
		4	2
1	15,625	0,35	3,88
2	31,25	2,77	7,58
3	46,875	4,18	10,21
4	62,50	5,80	14,37
5	78,125	7,49	18,90

После каждого этапа статических испытаний опытную конструкцию разгружали и давали ей «отдыхать» в течение 15...20 мин, после чего проводили динамические испытания, в ходе которых определяли основные круговые частоты собственных поперечных колебаний СПБ в зависимости от податливости узловых соединений. Измерение основных частот колебаний выполняли на виброанализаторе «ВИБРАН-2.0». Датчик закрепляли снизу, в центральном узле СПБ, колебания возбуждали путем удара сверху резиновой киянкой по центральному узлу конструкции. Для каждого типа СПБ динамические испытания проводили не менее 3 раз до стабильных значений экспериментальных круговых частот колебаний.

Характерные виброграммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рис. 2, результаты измерения частот колебаний – в табл. 2.

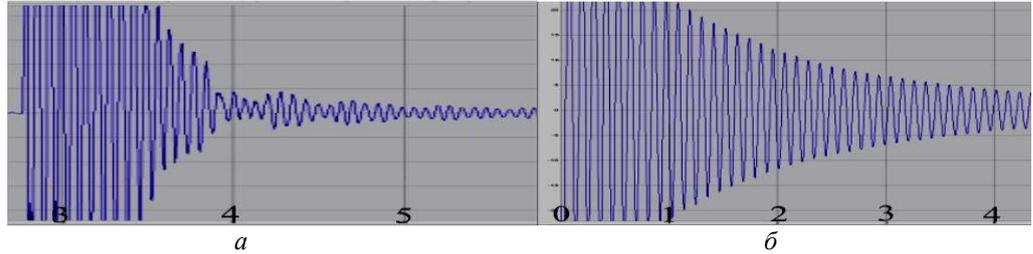


Рис. 2. Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ: *а* – 4 болта в узле; *б* – 2 болта в узле

Таблица 2

Экспериментальная частота собственных колебаний (c^{-1}) СПБ при различной жесткости крепления узловых соединений

Показатель	Значение показателя при количестве болтов в узле, шт.	
	4	2
Частота f	14,00	9,00
Круговая частота, ω	87,92	56,52

Результаты исследования и их обсуждение

При сопоставлении результатов экспериментальных и численных исследований критерием точности является коэффициент K , связывающий частоту ω основного тона собственных поперечных колебаний СПБ, распределенную по площади массу конструкции m и максимальный прогиб W_0 при действии равномерно распределенной нагрузки q в формуле В.И. Коробко [3]:

$$W_0 \omega^2 = K \frac{q}{m}.$$

Для квадратных пластин с шарнирно опертым контуром $K = 1,582$.

Анализ полученных данных показал, что экспериментальные прогибы и частоты собственных колебаний больше численных (аналитических). Для СПБ при креплении узла на 4 болтах разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляла 1,87 %, на 2 болтах – 7,54 %, между частотами – соответственно 0,09 и 0,69 %. Для коэффициента K расхождение между аналитическими и экспериментальными данными – соответственно 1,98 и 7,97 %.

Основной причиной расхождения экспериментальных и численных значений прогибов и частот поперечных колебаний являлось то обстоятельство, что за счет высокой степени податливости узлов деформации СПБ при высоких уровнях нагрузки происходили в нелинейной области.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о достаточно хорошей сходимости значений численных и экспериментальных прогибов и частот собственных колебаний, а также о соответствии экспериментального коэффициента K его аналитическим значениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Байда Э.Н., Лабудин Б.В.* Об одном методе расчета регулярных ортогональных перекрестных систем // Конструкции из клееной древесины и пластмасс. Л.: ЛИСИ, 1978. С. 36–40.
2. *Игнатъев В.А.* Расчет регулярных стержневых систем. Саратов: Сарат. ун-т, 1973. 433 с.
3. *Коробко В.И.* Об одной «замечательной» закономерности в теории упругих пластинок // Строительство и архитектура. 1989. № 11. С. 32–36. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Коробко В.И., Турков А.В.* Поперечные колебания и прогибы однопролетных балок, укрепленных в пролете упругими опорами // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. № 1. С. 53–55.
5. *Коробко В.И., Турков А.В.* Способ определения жесткости вертикального стыка составной балки // Лесн. журн. 2010. № 1. С. 88–92. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. *Коробко В.И., Турков А.В., Бояркина О.В.* Закономерности поперечного изгиба и свободных колебаний упругих балок и пластинок // Строительная механика и расчет сооружений. 2006. № 4. С. 64–69.
7. *Кутуков В.Н.* Некоторые задачи статического и динамического расчета регулярных систем // Расчет пространственных конструкций. Вып. 4. М.: Стройиздат, 1958. С. 225–238.
8. *Лабудин Б.В.* Влияние некоторых факторов на материалоемкость перекрестно-балочных конструкций из клееных деревянных элементов // Исследование конструкций из клееной древесины и пластмасс. 1977. № 1. С. 89–93.
9. *Лабудин Б.В.* К вопросу о расчете перекрестных балок из сборных клееных деревянных элементов с учетом податливости узлов // Конструкции из клееной древесины и пластмасс: межвуз. сб. Л.: ЛИСИ, 1979. С. 65–71.
10. *Лабудин Б.В.* Расчет перекрестных систем с использованием матрицы жесткости коробчатого элемента на упруго-податливых связях // Конструкции из клееной древесины и пластмасс: межвуз. сб. Л.: ЛИСИ, 1980. С. 8–11.
11. *Лабудин Б.В.* Расчет плитно-ребристых конструкций с упруго-податливыми связями // Лесн. журн. 1992. № 1. С. 67–72. (Изв. высш. учеб. заведений).
12. *Лабудин Б.В., Светозарова Е.И.* Пространственные перекрестно-балочные покрытия из клееных деревянных элементов // Исследование конструкций из клееной древесины и пластмасс. 1977. № 1. С. 41–47.
13. *Лубо Л.Н., Миронков Б.А.* Плиты регулярной пространственной структуры. Л.: Стройиздат, 1976. 126 с.
14. *Турков А.В., Макаров А.А.* Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на квадратном плане с учетом податливости узловых соединений // Строительство и реконструкция. 2013. № 1. С. 33–36.
15. *Турков А.В., Марфин К.В.* Исследование прогибов и частот собственных колебаний составных круглых трансформных пластин // Лесн. журн. 2013. № 4. С. 66–71. (Изв. высш. учеб. заведений).
16. *Martin W.* Berechnung einer Fachwerkplatte // Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig. 1966. Heft 4.

17. *Mase P.* Analysis of Building Grid Floare // Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division. 1960. Vol. 41, no. 7. Part 4.

18. *Yettram A.L., Husain H.M.* The Representation of a Plate in Flexure by a Grid of Orthogonally Connected Beams // International Journal of Mechanical Sciences. 1965. Vol. 7, iss. 4. Pp. 243–251.

Поступила 24.02.17

UDC 624.072.2.011.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.119

The Experimental Studies of Cross-Beam Systems of Wood Members on a Square Plan when Dynamic and Static Load Variation

A.V. Turkov, Doctor of Engineering Sciences, Head of Department

V.I. Korobko, Doctor of Engineering Sciences, Professor

A.A. Makarov, Postgraduate Student

Prioksky State University, Naugorskoe sh., 29, Orel, 302020, Russian Federation;

e-mail: vikor10@mail.ru, aturkov@bk.ru, mak_ar@inbox.ru

The paper presents the results of experimental studies of the cross-beam system of wood members on a square plan with a change in the rigidity of node connections. We determine the actual compliance of node connections by the results of the experimental and theoretical studies. In the experiment, statistic and dynamic tests are performed, and the maximum deflection and free frequency of the system are obtained. The maximum deflection increases, free frequency of the system decreases when the stiffness of the node connection decreases. We compare the theoretical and experimental data: the experimental deflections and frequencies are greater than the parameters, obtained by means of a calculation. The difference between the experimental and theoretical deflections is 7.54 %, and 0.69 % is in terms of free frequency. The reason for such discrepancies is the fact that the system deformation at high load levels occurs in the nonlinear region due to the high degree of compliance of the system nodes. The difference between theoretical and experimental data reaches 7.97 % for the coefficient connecting base frequency of free transverse vibrations, mass of the structure distributed over the area and the maximum deflection under the action of an evenly distributed load. Based on the study, we can conclude about fine precision of numerical and experimental deflections and free frequencies, and about the applicability of this experimental coefficient for cross-beam systems.

Keywords: cross-beam system, testing stand, dynamic test, static test, elasticity modulus, free frequency, maximum deflection.

For citation: Turkov A.V., Korobko V.I., Makarov A.A. The Experimental Studies of Cross-Beam Systems of Wood Members on a Square Plan when Dynamic and Static Load Variation. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 5, pp. 119–126. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.119

REFERENCES

1. Bayda E.N., Labudin B.V. Ob odnom metode rascheta regulyarnykh orthogonal'nykh perekrestnykh sistem [On a Method for Calculating Regular Orthogonal Cross Systems]. *Konstruktsii iz kleenoy drevesiny i plastmass* [Structures of Glued Wood and Plastics]. Leningrad, Leningrad Engineering and Construction Institute Publ., 1978, pp. 36–40. (In Russ.)
2. Ignat'ev V.A. *Raschet regulyarnykh sterzhnevyykh system* [Calculation of Regular Frame Structures]. Saratov, Saratov Higher Military School Publ., 1973. 433 p. (In Russ.)
3. Korobko V.I. Ob odnoy “zamechatel'noy” zakonomernosti v teorii uprugikh plastinok [On a “Remarkable” Regularity in the Theory of Elastic Plates]. *Stroitel'stvo i arkhitektura*, 1989, no. 11, pp. 32–36.
4. Korobko V.I., Turkov A.V. Poperechnye kolebaniya i progiby odnoproletnykh balok, podkreplennykh v prolete uprugimi oporami [Transverse Oscillations and Deflections of Single Beams Reinforced by Elastic Supports in the Span]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], 2007, no. 1, pp. 53–55.
5. Korobko V.I., Turkov A.V. Sposob opredeleniya zhestkosti vertikal'nogo styka sostavnoy balki [Method for Determining Vertical Joint Stiffness of Composite Beam]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2010, no. 1, pp. 88–92.
6. Korobko V.I., Turkov A.V., Boyarkina O.V. Zakonomernosti poperechnogo izgiba i svobodnykh kolebaniy uprugikh balok i plastinok [Regularities of Transverse Bending and Free Oscillations of Elastic Beams and Plates]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], 2006, no. 4, pp. 64–69.
7. Kutukov V.N. Nekotorye zadachi staticheskogo i dinamicheskogo rascheta regulyarnykh sistem [Some Problems of Static and Dynamic Calculation of Regular Systems]. *Raschet prostranstvennykh konstruksiy. Vyp. 4* [Space Structures Analysis. Iss. 4]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1958, pp. 225–238. (In Russ.)
8. Labudin B.V. Vliyanie nekotorykh faktorov na materialoemkost' perekrestno-balochnykh konstruksiy iz kleenykh derevyannykh elementov [Influence of Some Factors on the Material Intensity of Two-Way Beam Structures Made of Glued Wood]. *Issledovanie konstruksiy iz kleenoy drevesiny i plastmass* [Investigation of Structures Made of Glued Wood and Plastics], 1977, no. 1, pp. 89–93.
9. Labudin B.V. K voprosu o raschete perekrestnykh balok iz sbornykh kleenykh derevyannykh elementov s uchetom podatlivosti uzlov [On the Calculation of Two-Way Beams from Precast Glued Wood Units, Taking into Account the Joint Mobility]. *Konstruktsii iz kleenoy drevesiny i plastmass* [Structures of Glued Wood and Plastics]. Leningrad, Leningrad Engineering and Construction Institute Publ., 1979, pp. 65–71. (In Russ.)
10. Labudin B.V. Raschet perekrestnykh sistem s ispol'zovaniem matritsy zhestkosti korobchatogo elementa na uprugo-podatlivykh svyazyakh [Calculation of Cross Systems Using the Stiffness Matrix of a Box-Shaped Element on Elastic-Compliant Constraints]. *Konstruktsii iz kleenoy drevesiny i plastmass* [Structures of Glued Wood and Plastics]. Leningrad, Leningrad Engineering and Construction Institute Publ., 1980, pp. 8–11. (In Russ.)
11. Labudin B.V. Raschet plitno-rebristykh konstruksiy s uprugo-podatlivymi svyazyami [Calculation of Slab and Ribbed Structures with Elastic-Compliant Constraints]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 1992, no. 1, pp. 67–72.

12. Labudin B.V., Svetozarova E.I. Prostranstvennye perekrestno-balochnye pokrytiya iz kleenykh derevyannykh elementov [Spatial Two-Way Beam Roofs Made of Glued Wood]. *Issledovanie konstruksiy iz kleenoy drevesiny i plastmass* [Investigation of Structures Made of Glued Wood and Plastics], 1977, no. 1, pp. 41–47.
13. Lubo L.N., Mironkov B.A. *Plity regulyarnoy prostranstvennoy struktury* [Plates of Regular Spatial Structure]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1976. 126 p. (In Russ.)
14. Turkov A.V., Makarov A.A. Progiby i chastoty sobstvennykh kolebaniy sistem perekrestnykh balok na kvadratnom plane s uchedom podatlivosti uzlovykh soedineniy [Deflections and Frequencies of Own Fluctuations of Systems Cross Beams on the Square Plan Taking into Account Pliability of Nodal Connections]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and Reconstruction], 2013, no. 1, pp. 33–36.
15. Turkov A.V., Marfin K.V. Issledovanie progibov i chastot sobstvennykh kolebaniy sostavnykh kruglykh transtropnykh plastin [Study of Deflection and Natural Vibration Frequencies of Composite Circular Transtropic Plates]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2013, no. 4, pp. 66–71.
16. Martin W. Berechnung einer Fachwerkplatte. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule fur Bauwesen Leipzig*, 1966, Heft 4.
17. Mase P. Analysis of Building Grid Floare. *Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division*, 1960, vol. 41, no. 7, part 4.
18. Yettram A.L., Husain H.M. The Representation of a Plate in Flexure by a Grid of Orthogonally Connected Beams. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1965, vol. 7, iss. 4, pp. 243–251.

Received on February 24, 2017