

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СИСТЕМ ПЕРЕКРЕСТНЫХ БАЛОК
ИЗ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ДИНАМИЧЕСКИЕ И СТАТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ**

**EXPERIMENTAL RESEARCH
OF CROSS BEAMS SYSTEMS
OF WOODEN ELEMENTS
FOR THE STATIC AND DYNAMIC LOADS**

A.V. ТУРКОВ, А.А. МАКАРОВ
A.V. TURKOV, A.A. MAKAROV

(Юго-Западный государственный университет,
Брянский государственный инженерно-технологический университет,
Приокский государственный университет)
(South-West State University,
Bryansk State Engineering Technological University,
Oka State University)

E-mail: aturkov@bk.ru; plotn57@mail.ru; mak_ar@inbox.ru

Рассматривается экспериментальное исследование системы перекрестных балок (СПБ) на квадратном плане без включения в работу элементов покрытия. В ходе эксперимента проводятся статистические и динамические испытания, в результате которых находятся максимальный прогиб и частота собственных колебаний СПБ при различных схемах опирания конструкции. Проведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных.

The pilot study of the system cross beams on a square plan without inclusion in work of elements of a covering. During experiment statistical and dynamic tests as a result of which, there is the maximum deflection and frequency of own fluctuations are carried out. Comparison of theoretical and experimental data is made.

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

Keywords: system of cross beams, test bench, dynamic testing, static testing, the elastic modulus, natural frequency, the maximum deflection.

Текстильное производство, возникшее в виде мануфактур, является одним из старейших производств. Как правило, такие предприятия изначально располагались в кирпичных зданиях и некоторые из них продолжают эксплуатироваться до настоящего времени. Покрытия таких зданий в основном выполнено из деревянных конструкций небольших пролетов в виде балок цельного или составного сечения. И если кирпичные конструкции находятся, как правило, в удовлетворительном техни-

ческом состоянии, то деревянные покрытия исчерпали свой эксплуатационный ресурс и требуют усиления или замены на новые. Одними из таких конструкций являются системы перекрестных балок из деревянных элементов, сочетающие в себе эффективность пространственных конструкций, малый вес, что важно с точки зрения ограничения нагрузок на существующие стены и фундаменты старых зданий. При применении таких конструкций необходим комплекс исследований, в

том числе и экспериментальных, для оценки основных параметров покрытия.

Статические и динамические испытания системы перекрестных балок проводили на специальном стенде. Стенд представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из вертикальных опор, сложенных из кирпича и установ-



а)



б)

Рис. 1

Сама система перекрестных балок выполнена из деревянных элементов цельного сечения 10×100 (h) мм, длиной 590 мм, которые в узлах соединяются при помощи стальных гнутых уголков из листа толщиной 1 мм на болтах М6. Система перекрестных балок имеет в плане размер 2400×2400 мм, размер ячейки 600×600 мм.

На первом этапе выполнены исследования по экспериментальному определению фактической податливости узловых соединений. Элементы СПБ моделировались стержнями со вставками на концах [1], которые, в свою очередь, моделировали податливость узловых соединений. По результатам расчета и по экспериментальным прогибам и частотам колебаний была определена фактическая податливость узлов при креплении элементов четырьмя и двумя нагельми, которая составила $EI_{вс}/EI_{эл} = 0,0033$ при креплении узла 4 болтами и $EI_{вс}/EI_{эл} = 0,0013$ при креплении узла 2 болтами.

Для определения прогиба СПБ при статическом нагружении система нагружалась узловой нагрузкой пятью ступенями, вес каждой ступени составлял $15,625 \text{ Н/м}^2$. После снятия показания по индикатору от максимальной нагрузки, которая составляла $78,125 \text{ Н/м}^2$, СПБ разгружалась и после пят-

ленных по углам конструкции. По кирпичным опорам сверху уложены железобетонные балки сечением 120×130 (h) мм, на которые СПБ в контурных узлах опирается через стальные цилиндрические стержни диаметром 20 мм, длиной 50 мм (рис. 1 – конструкция СПБ (а) и узел крепления элементов (б)).

надцати минут "отдыха" загружалась вновь. Для каждого типа СПБ испытания проводили не менее трех раз до получения стабильных значений экспериментальных прогибов.

Схема опирания изменялась следующим образом. На первом этапе испытаний под каждым из пяти контурных узлов располагались стальные цилиндрические опоры диаметром 20 мм для осуществления шарнирного опирания. На втором этапе с каждой стороны СПБ убирались опоры через один узел, в результате система опиралась по каждой стороне в трех узлах (в угловых узлах и в середине стороны СПБ). На третьем этапе конструкция опиралась только в угловых узлах. Обработку экспериментальных данных проводили в соответствии с [2]. Данные экспериментальных исследований приведены в табл. 1 (результаты экспериментальных исследований максимального прогиба (мм) при различном количестве опор по одной стороне СПБ) и на рис. 2 (изменение прогибов в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции, где n – количество опор по одной стороне конструкции, m – количество контурных узлов по одной стороне).

Объект исследования	Нагрузка, Н/м ²	Количество болтов в узле 4			Количество болтов в узле 2		
		количество опор по одной стороне конструкции			количество опор по одной стороне конструкции		
		5	3	2	5	3	2
Максимальный прогиб, мм	15,625	0,35	1,46	5,84	3,88	3,86	-
	31,25	2,77	3,12	11,96	7,58	28,11	-
	46,875	4,18	4,78	18,64	10,21	13,04	-
	62,5	5,8	6,51	-	14,37	-	-
	78,125	7,49	8,28	-	18,9	-	-

Примечание. В ячейках таблицы, где стоят прочерки, система перестает работать в упругой стадии, в связи с чем эти результаты в исследованиях не учитывались.

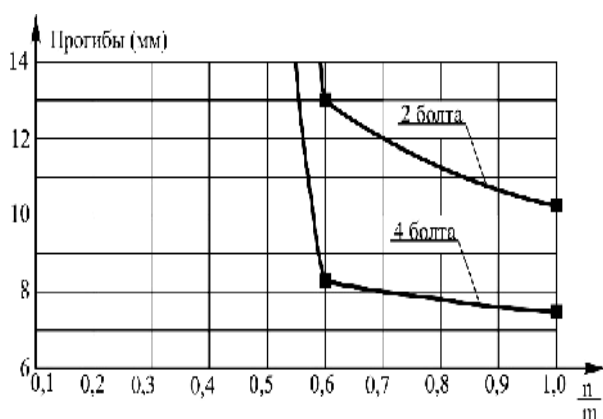


Рис. 2

После проведения каждого этапа статических испытаний опытная конструкция разгружалась и "отдыхала" в течение 15...20 мин, после чего проводили дина-

мические испытания СПБ. В ходе проведения динамических испытаний определяли основные круговые частоты собственных поперечных колебаний системы перекрестных балок в зависимости от податливости узловых соединений и схемы опирания. Измерения основных частот колебаний выполняли при помощи виброанализатора "ВИБРАН – 2.0". Датчик закрепляли снизу в центральном узле СПБ; колебания возбуждались путем удара сверху резиновой киянкой по центральному узлу конструкции. Для каждого типа системы перекрестных балок динамические испытания проводили также не менее трех раз до получения стабильных значений экспериментальных круговых частот колебаний.

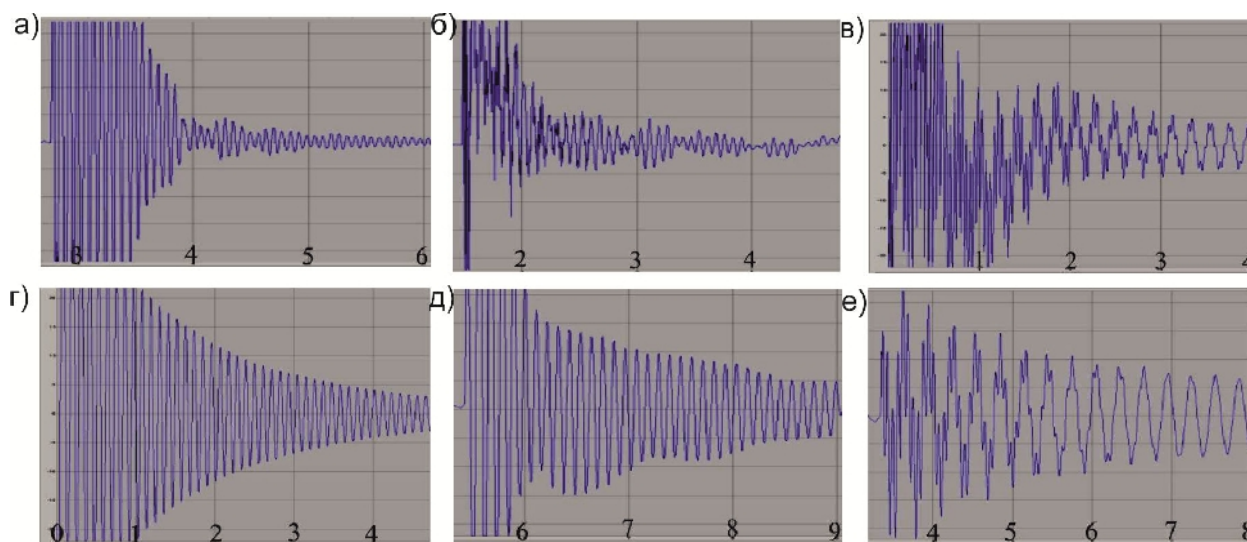


Рис. 3

Характерные виброграммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рис. 3 (характерные виброграммы собственных колебаний СПБ: а – 4 болта, 5

опор; б – 4 болта, 3 опоры; в – 4 болта, 2 опоры; г – 2 болта, 5 опор; д – 2 болта, 3 опоры; е – 2 болта, 2 опоры).

Результаты измерения частот колебаний представлены в табл. 2 (экспериментальные частоты собственных колебаний (c^{-1}) СПБ при различной жесткости крепления узлов соединений при изменении схемы опирания) и на рис. 4 (изменение частот собственных колебаний в зависимости от количества опор по одной стороне конструкции).

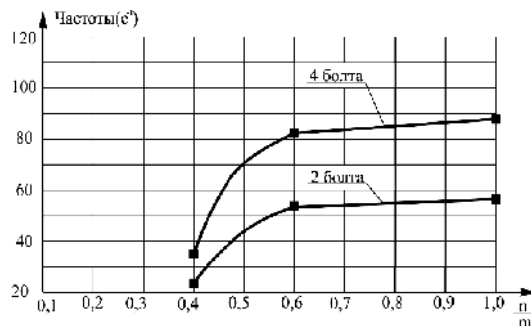


Рис. 4

Таблица 2

Объект исследования		Количество болтов в узле 4		Количество болтов в узле 2	
		частота f	круговая частота ω	частота f	круговая частота ω
Количество опор по одной стороне	5	14,00	87,92	9,00	56,52
	3	13,20	82,87	8,50	53,38
	2	5,60	35,47	3,50	21,98

Сопоставление результатов экспериментальных и численных исследований представлены в табл. 3 (сопоставление экспериментальных и теоретических данных для СПБ при различной жесткости узлов и при изменении схемы опирания). Критерием точности является коэффициент K, связывающий частоту собственных поперечных колебаний СПБ ω распределенной массой m и максимальный прогиб

W_0 при действии равномерно распределенной нагрузки q в формуле В.И. Коробко [3]. Этот коэффициент для квадратных пластин с шарнирно опертым контуром составляет $K=1,582$.

$$W_0 \omega^2 = K \frac{q}{m} \quad (1)$$

Таблица 3

Объекты исследования		Количество болтов в узле 4			Количество болтов в узле 2		
		количество опор по одной стороне			количество опор по одной стороне		
		5	3	2	5	3	2
Максимальный прогиб W_0 , мм	Эксперимент	7,49	8,28	18,64	10,21	13,04	-
	Численно	7,35	10,13	14,11	9,44	13,21	33,14
Откл. эксп. от числ. (%)		1,87	18,26	24,30	7,54	1,29	-
Круговая частота ω , c^{-1}	Эксперимент	87,92	82,87	35,47	56,52	53,38	21,98
	Численно	87,84	72,83	42,61	56,91	47,26	27,79
Откл. эксп. от числ. (%)		0,09	12,14	16,76	0,69	11,47	20,91
K по (2)	Эксперимент	1,551	1,524	1,029	1,456	1,659	-
	Численно	1,519	1,439	1,14	1,365	1,317	1,142
$K_{аналит}$		1,582					
Отклонение K от $K_{аналит}$, %	Эксперимент	1,98	1,67	34,95	7,97	4,85	-
	Численно	3,98	9,03	27,71	13,72	16,74	27,79

Анализ полученных данных показывает, что при опирании системы во всех контурных узлах экспериментальные прогибы и частоты больше полученных численно. При опирании системы в 3-х контурных

узлах, прогибы меньше, а частоты – выше полученных численно. А при опирании системы только по углам – прогибы значительно больше, а частоты – меньше полученных экспериментально.

Для СПБ, в зависимости от схемы опирания, при креплении узла четырьмя болтами разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,87 до 24%, а разница между частотами составляет от 0,09 до 16,76%. При креплении узла двумя болтами разница между экспериментальными и численными значениями прогибов составляет от 1,29 до 7,54%, а разница между частотами составляет от 0,69 до 20,91%.

Основной причиной расхождения экспериментальных и численных значений прогибов и частот поперечных колебаний является то обстоятельство, что за счет высокой степени податливости узлов системы ее деформации при высоких уровнях нагрузки проходят в нелинейной области. Для коэффициента K разница между теоретическими и экспериментальными данными достигает 20,61% – при опирании конструкции только по углам. Необходимо отметить, что формула (1) выведена для изотропных пластин, непрерывно опертых по контуру, и это обстоятельство приводит к большим ошибкам при определении коэффициента K .

ВЫВОДЫ

На основании приведенных исследований можно сделать вывод о достаточно хорошей сходимости результатов численных и экспериментальных прогибов и частот собственных колебаний, а также о со-

ответствии экспериментального коэффициента K и его применимости для СПБ аналитическим значениям, выведенным В.И. Коробко для изотропных пластин.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Нefeldов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К., Халин В.И. Метрология и радиоизмерение. – М.: Высшая школа, 2006.
3. Коробко В.И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989, №11. С. 32...36.

REFERENCES

1. Turkov A.V., Makarov A.A. Progiby i chastoty sobstvennyh kolebanij sistem perekrestnyh balok na kvadratnom plane s uchetom podatlivosti uzlovyh soedinenij // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2013, №1. S. 33...36.
2. Nefedov V.I., Sigov A.S., Bitjukov V.K., Hahin V.I. Metrologija i radioizmerenie. – M.: Vysshaja shkola, 2006.
3. Korobko V.I. Ob odnoj "zamechatel'noj" zakonornosti v teorii uprugih platinok // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1989, №11. S.33...36.

Рекомендована кафедрой уникальных зданий и сооружений ЮЗГУ. Поступила 08.04.16.