

АРХИТЕКТУРА / ARCHITECTURE

DOI: 10.18454/IRJ.2016.49.016

Таскин И.А.

Магистр строительных наук,

Ассистент кафедры «Строительные конструкции и строительное производство»

Уральский Государственный Университет Путей Сообщения

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ШЕСТИГРАННОЙ ЯЧЕЙКИ СЕТЧАТОГО КУПОЛА**Аннотация**

В статье рассмотрено экспериментальное исследование шестигранной ячейки сетчатого купола, выполненной из клееной армированной древесины в трех различных конструктивных исполнениях. Первое – с ребрами без прогонов и настила, второе – с ребрами и прогонами, третье – с ребрами, прогонами и настилом. Ячейка рассчитана на действие симметричной, несимметричной, сосредоточенной нагрузок. Получены данные о работе ребер конструкции, подкрепленных настилом и прогонами. Результаты эксперимента подтверждены результатами компьютерного моделирования на ПК ЛИРА-САПР.

Ключевые слова: шестигранная ячейка, клееная древесина, эксперимент, сетчатый купол.

Taskin I.A.

Master of construction science,

Assistant department of "Building constructions and construction industry"

Ural State University of Railway transport

EXPERIMENTAL STUDY CONSTRUCTION HEXAGONAL CELL OF MESHY DOME**Abstract**

The article deals with experimental research hexagonal cells mesh dome, made of reinforced laminated wood in three various designs. The first - with the ribs without girders and deck, the second - with ribs and girders, the third - with ribs, girders and decking. The cell is designed to effect a symmetrical, asymmetrical, concentrated loads. The data on the structure of ribs, reinforced flooring and purlins. The experimental results confirmed the results of computer simulation LIRA-SAPR.

Keywords: hexagonal cell, glulam wood, experiment, reticulate dome.

В работах [3, 5] и др. при расчетах сетчатых куполов покрывающий настил рассматривается как нагрузка. Вследствие этого ребра (одни из основных несущих элементов купольной системы) рассчитываются с некоторым запасом прочности. Концепция рассматривать настил как нагрузку присуща почти всем классическим методам расчета стержневых элементов сетчатых куполов (исключением можно считать компьютеризированные методы расчета, к примеру, расчеты в ПК ЛИРА-САПР). Например, при расчете по формулам, приведенным, в [3, 5], определяются усилия в эквивалентном сферическом сплошном куполе для безмоментного состояния T_x , T_y , T_{xy} . Усилия в ребрах купола N_1 , N_2 , N_3 получаются путем обратного перехода к стержневой системе. Схема усилий показана на рис. 1. При расчете по данному методу невозможно определить долю включения настила и его влияние на работу ребер.

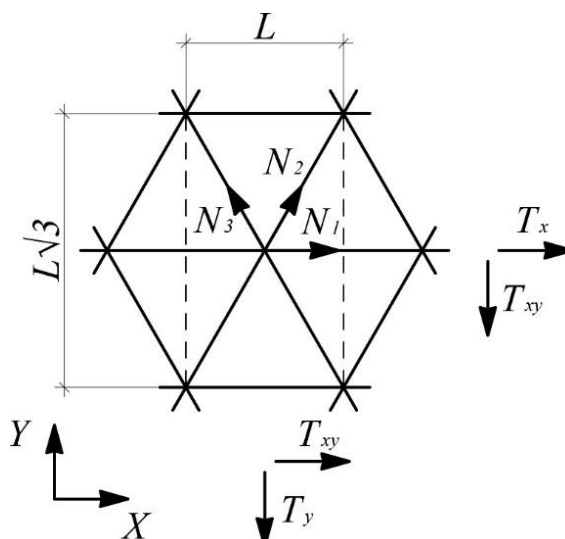


Рис. 1 – Схема распределения усилий в стержнях купола и в сплошном аналоге

Таким образом, работа ребер сетчатых куполов с учетом работы подкрепляющего настила, пока еще недостаточно изучена. Для уточнения данного вопроса автором данной статьи было произведено исследование шестигранной ячейки купола, являющейся моделью масштабом 1:5 центральной ячейки пологого сетчатого купола из армированной древесины диаметром у основания 60 метров и высотой 9 метров, выполненной в трех вариантах исполнения (см. табл. 1).

Таблица 1 – Параметры экспериментальной ячейки

№ схемы	Ребра	Прогоны	Настил
1	+	–	–
2	+	+	–
3	+	+	+

Описание конструкции ячейки**Схема №1.**

Схема состоит из армированных ребер и стальных шестигранных сердечников (см. рис. 1...5). Диагональное расстояние между крайними узлами составляло 2400мм. Ребра выполнены из сосны, сечением $b \times h = 3 \times 6$ см, длиной $L = 1150$ мм (центральные) и $L = 1135$ мм (крайние), имеют два симметрично расположенных относительно нейтральной оси паза для заведения арматуры. Угол наклона ребер к горизонтали 9.5° . Значение угла было выбрано по натурной конструкции. Торцы ребер снабжены стальными накладками. Для армирования применялась стальная проволока $d = 5$ мм. Процент армирования составлял $\mu = 2,2\%$. Концы арматуры снабжены резьбой. Арматура расположена на расстоянии $h_0/2 = 20$ мм от нейтральной оси сечения и фиксировалась в пазах универсальным эпоксидным клеем «Класс». В сердечниках выполнены соосные с арматурой отверстия. Сердечники и торцевые накладки ребер изготовлены из листовой стали толщиной 2.2мм и изготавливались согласно [1].

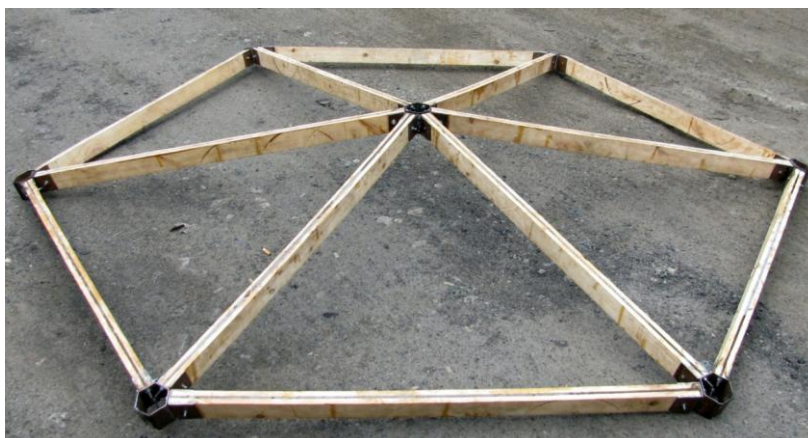


Рис. 1 – Схема №1, общий вид



Рис. 2 – Узлы конструкции: центральный (слева), боковой (справа)

Модули упругости материалов определялись в экспериментальной лаборатории каф. «Путь и путевое хозяйство» УрГУПС (г. Екатеринбург) на испытательной установке Testometric FS100 AT и приведены в табл. 2. Опирающие узлы ячейки – шарнирно-неподвижные в опорных точках (см. рис. 3.4).

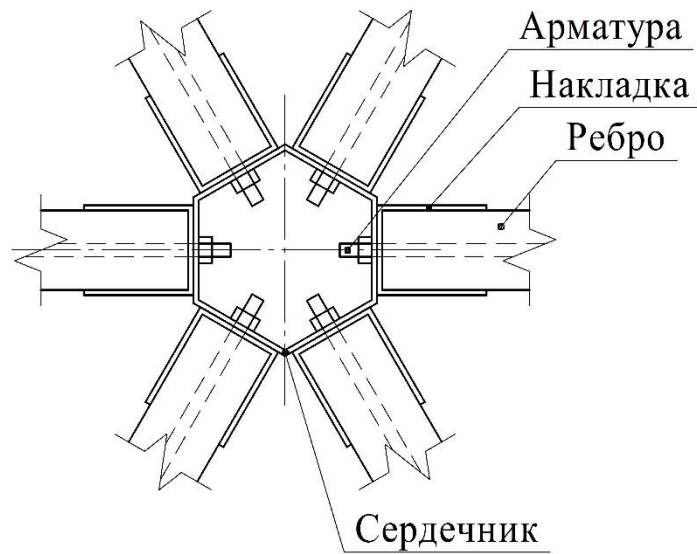


Рис. 3 – Узел крепления ребер к сердечнику

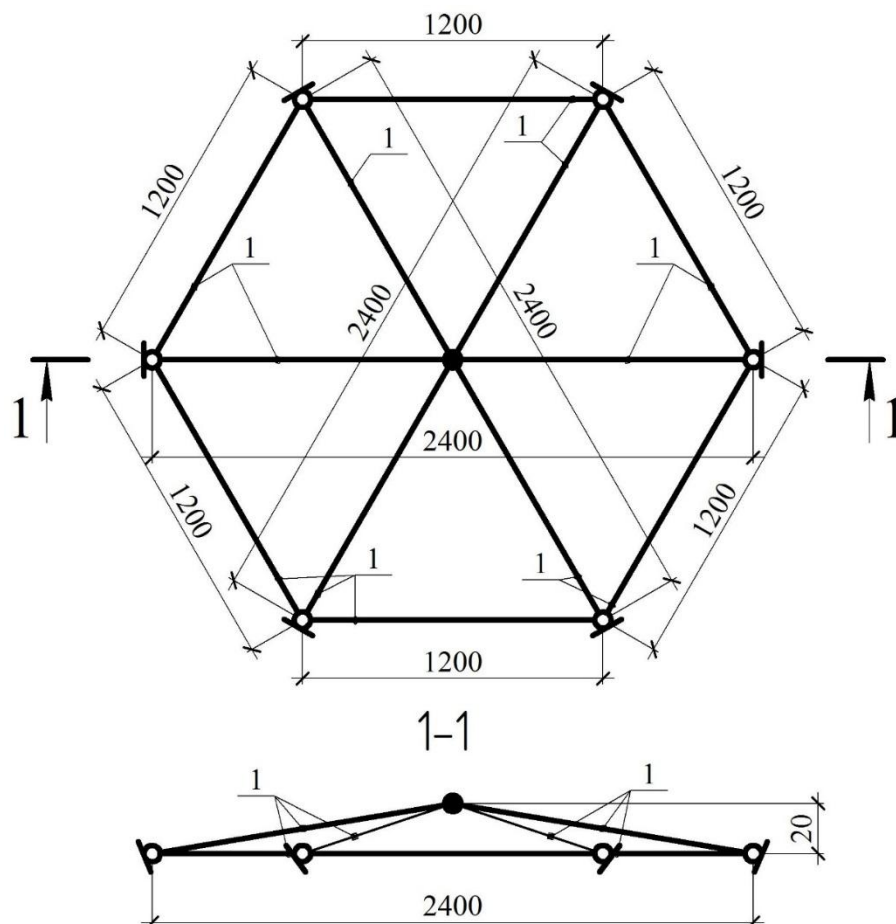
Рис. 4 – Расчетная схема пространственной шестигранной ячейки купола:
1 – армированные ребра.

Таблица 2

№	Материал	Модуль упругости, МПа
1	Древесина	9580
2	Проволока	207500
3	Сталь	205200
4	Эпоксидный клей	5390
5	Фанера вдоль волокон	8670
6	Фанера поперек волокон	5720

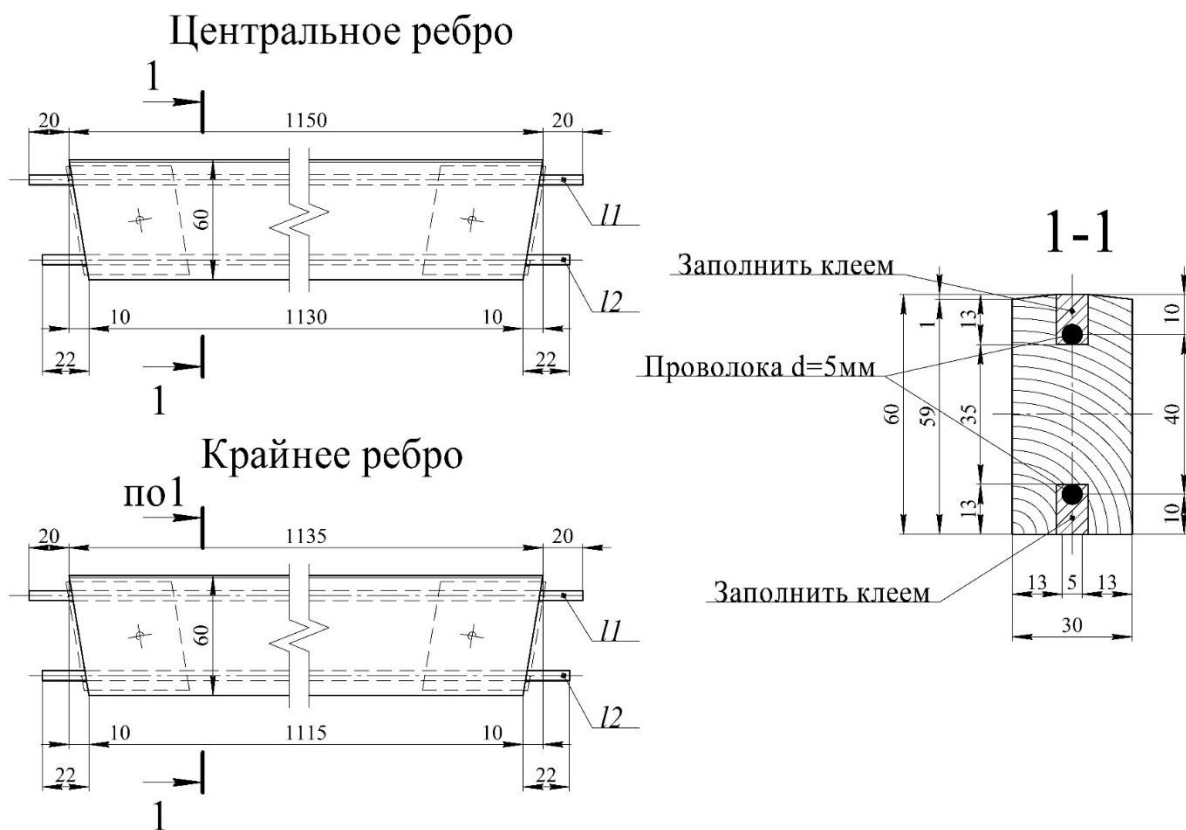


Рис. 5 – Размеры элементов ячейки и сечение армированных ребер

Схема №2.

Выполнена аналогично схеме №1 (см. рис. 6). Отличается тем, что в межреберном пространстве расположены прогоны с шагом 200мм. Элементы прогонов выполнены из сосны и имеют сечение $b \times h = 3 \times 6$ см. Узлы сопряжения прогонов с ребрами болтовые (см. рис. 7).



Рис. 6 – Схема №2. Общий вид

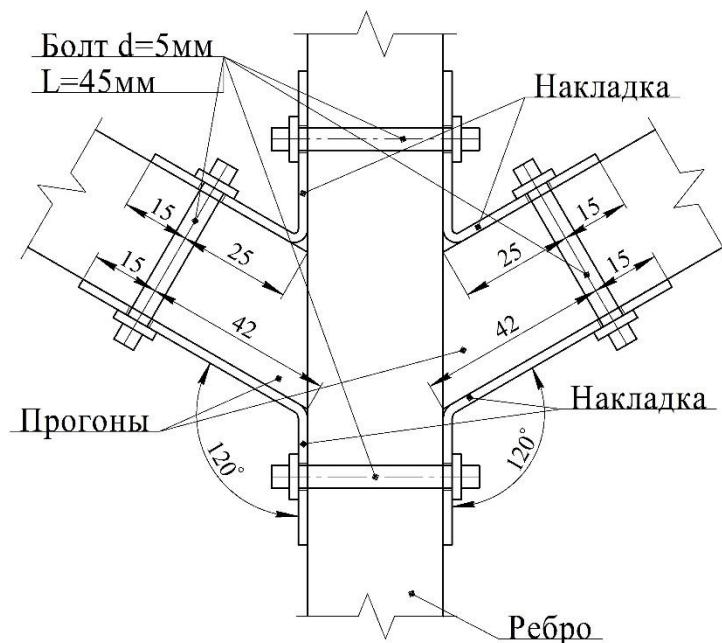


Рис. 7 – Узел крепления прогонов к ребру

Схема №3.

Выполнена аналогично схеме №2. В отличие от предыдущей схемы, сверху ребра покрыты настилом, выполненном из фанеры толщиной 3мм. Соединение фанеры и стержневых элементов конструкции клеегвоздевое (эпоксидный клей «Класс», гвозди, диаметром 2.2мм и длиной 25мм). Общий вид конструкции представлен на рис. 8.



Рис. 8 – Схема №3. Общий вид

Собранная конструкция шестигранной ячейки устанавливалась на испытательную установку (рис. 9). Конструкция установки разрабатывалась исходя из следующих соображений:

- обеспечить неподвижность крайних узлов шестигранной ячейки купола;
- создать удобные условия для нагружения модели.



Рис. 9 – Конструкция опоры. Общий вид

Внешняя нагрузка, прикладываемая к заданному сечению конструкции, имела вертикальное направление и создавалась силой тяжести груза (мешки с песком), помещенного в пакеты и подвешенного за проволоку (см. рис.10).



Рис. 10 – Расположение крючьев с подвешенными грузами

В ходе экспериментального исследования были проведены кратковременные испытания конструкции шестигранной ячейки на действие симметричной, несимметричной и сосредоточенной нагрузки. Кратковременные испытания проводились в соответствии с требованиями, изложенными в [2].

Цель исследования:

Уточнить расчетные НДС стержневых элементов пологого купола.

Задачи исследования:

1. Получить значения усилий и перемещений элементов экспериментальным путем;
 2. Сравнить полученные значения с результатами численных вычислений, выполненных на ПК ЛИРА-САПР.
- Схема расположения прогибомеров П1...9 (прогибомеры 6-ПАО) показана на рис. 11.

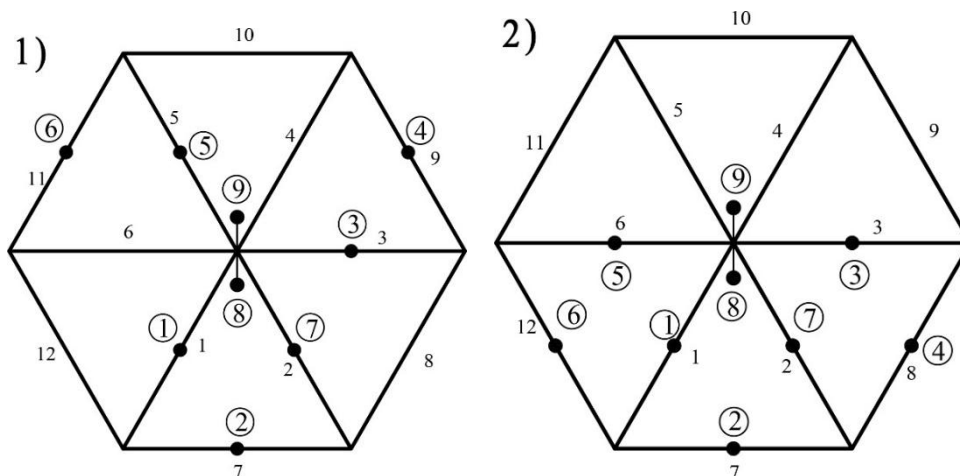


Рис. 11 – Схема расположения прогибомеров 6-ПАО:

1 – для схем с осесимметричной и сосредоточенной нагрузками; 2 – для схем с несимметричной нагрузкой

Описание модели, выполненной на ПК ЛИРА-САПР

Армированные ребра выполнены в виде двутавров, прогоны – в виде прямоугольников, настил представлен пластинами. Ребрам присвоен модуль упругости древесины, пластинам – модуль упругости фанеры, причем, в отличие от реальной анизотропной фанеры, пластинам заданы свойства изотропности. Средний модуль упругости пластин рассчитан по формуле:

$$E = \frac{E_0 + E_{90}}{2} \quad (1)$$

Где E_0 – модуль упругости вдоль волокон, E_{90} – модуль упругости поперек волокон.

Сечения элементов изображены на рис.12. Полки двутавров образуются вследствие влияния разных значений модулей упругости древесины, арматуры и эпоксидного клея. Геометрические размеры и характеристики двутавров приведены к древесине и рассчитаны из формул:

$$A_{np} = A_1 + A_2 \frac{E_2}{E_1} + A_3 \frac{E_3}{E_1} \quad (2)$$

$$J_{np} = J_1 + J_2 \frac{E_2}{E_1} + J_3 \frac{E_3}{E_1} \quad (3)$$

Где A_1, A_2, A_3 – площадь древесины, проволоки, эпоксидного клея;

J_1, J_2, J_3 – момент инерций древесины, проволоки, эпоксидного клея;

E_1, E_2, E_3 – модуль упругости древесины, проволоки, эпоксидного клея.

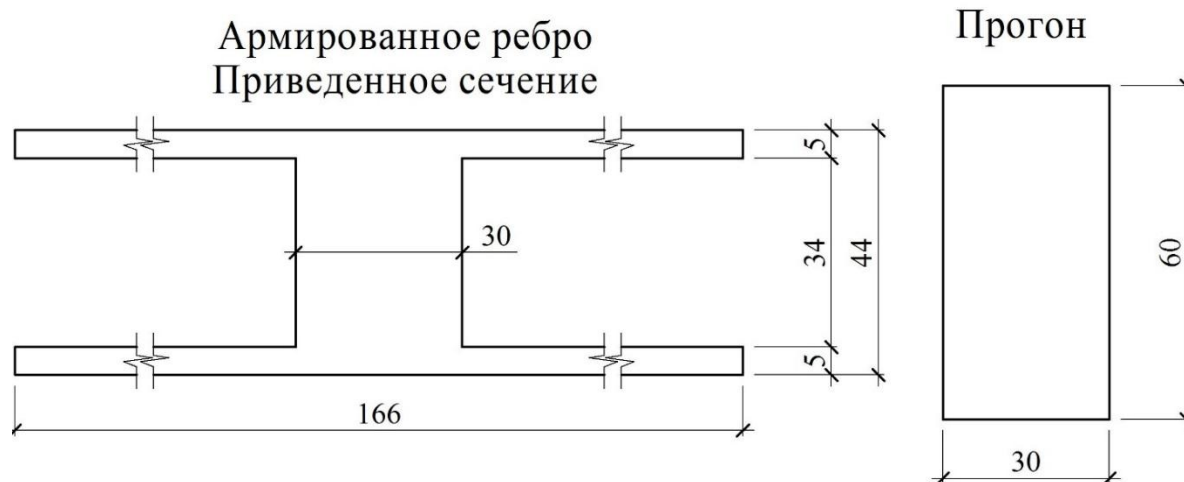


Рис. 12 – Приведенное сечение армированного ребра и прогона (размеры в мм)

Соединения настила и стержневых элементов купола – жесткие, осуществляются через жесткие вставки (см. рис. 13), расположенные на расстоянии $l/10$ друг от друга по всей длине стержня. Вставка соединяет рядовой узел стержня с узлом настила, находящимся над ним. Такой метод соединения элементов позволяет смоделировать совместную работу ребер купола с настилом и описан, например, в [4]. Соединения ребер друг с другом, с прогонами и с опорным кольцом – жесткие. Материал ребер, прогонов и настила – согласно табл. 2. Ребра опираются на связи, моделирующие сферические шарниры.

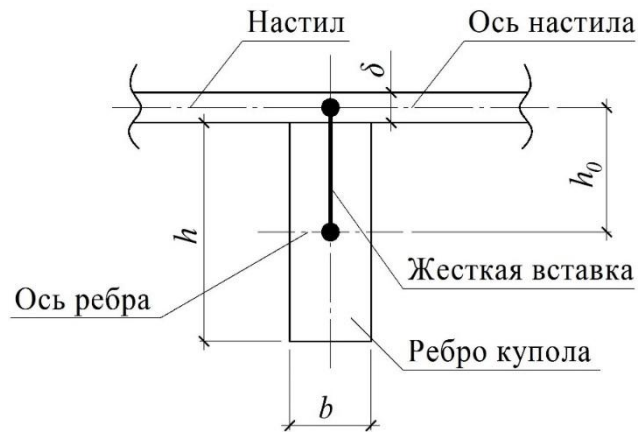


Рис. 13 – Соединение ребер с настилом через жесткую вставку

Распределенная нагрузка приводилась к узловой и передавалась на расчетные схемы через точки, расположенные в соответствии с рис. 14. Соотношение грузовых площадей $S1:S2:S3=2:2:1$. Действующие нагрузки показаны на рис. 15.

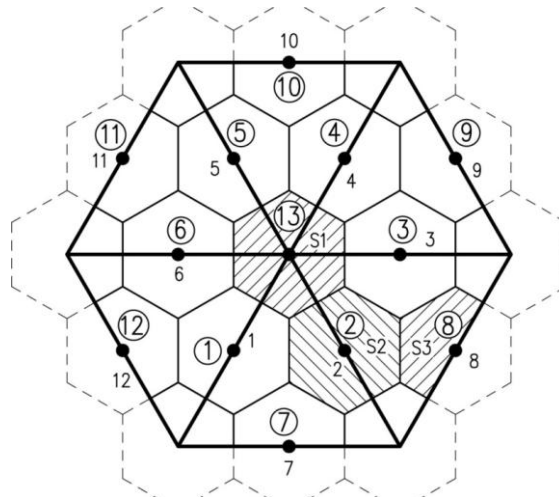


Рис.14 – Схема расположения точек загрузки и формы грузовых площадей

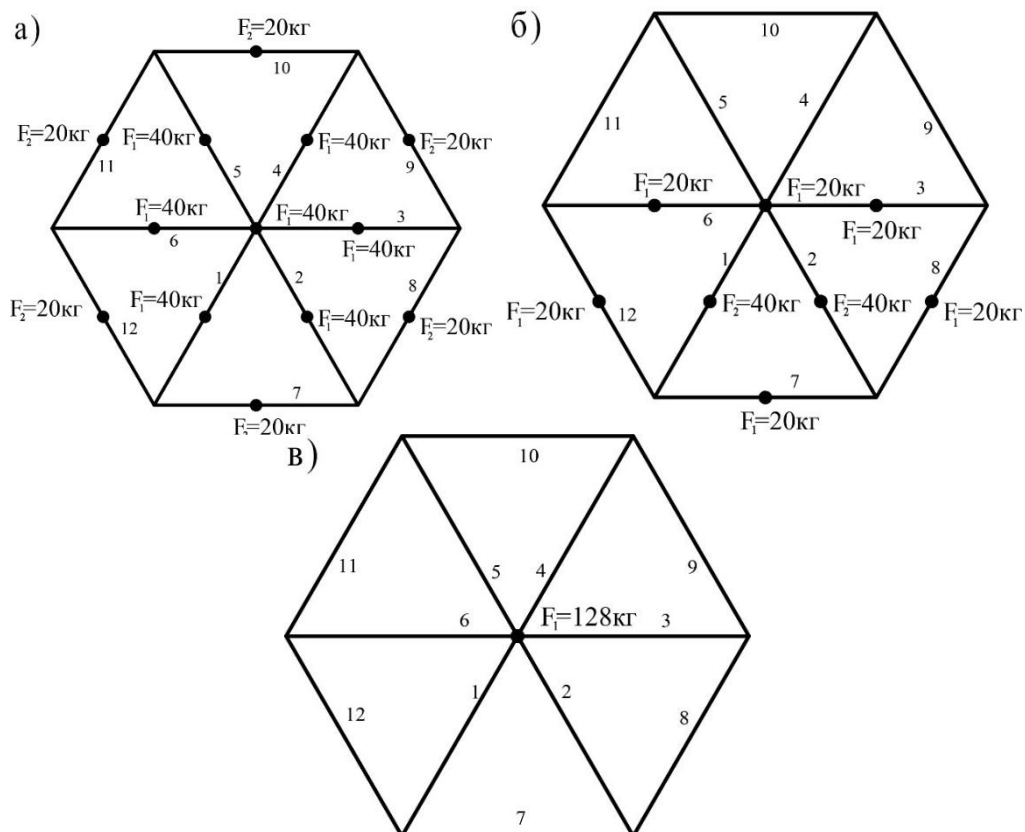


Рис. 15 – Действующие нагрузки: а) симметричная; б) несимметричная; в) сосредоточенная в центральном узле

Тензометрические датчики приклеивались к ребрам ячейки в середине пролета по схеме, показанной на рис. 16.

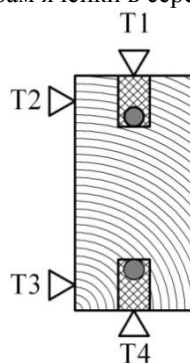


Рис. 16 – Расположение тензометрических датчиков T1...T4

Результаты тензоизмерений были преобразованы в величины относительных деформаций по направлению главных напряжений путем произведения величины отсчета по прибору на цену деления прибора:

$$\varepsilon = \Delta \times n \quad (4)$$

где Δ – показание прибора; n – цена деления.

Так было сделано ребрах 1 и 7.

Результаты усилий в ребрах 1, 7 показаны в табл. 3, перемещений точек 2 и 13 показаны в табл. 4 (расположение точек см. на рис. 14).

Таблица 3 – Усилия в элементах ячейки

РЕБРО 1						
	М _{ЛИРА-САПР} КГ·М	М _{экспер} КГ·М	Δ%	N _{ЛИРА-САПР} КГ	N _{экспер} КГ	Δ%
Симметричная нагрузка						
1 ЭТАП	8.13	7.32	111%	-208.60	-175.20	119%
2 ЭТАП	3.36	3.89	86%	-199.60	-177.80	112%
3 ЭТАП	2.98	3.21	93%	-115.00	-134.10	86%
Несимметричная нагрузка						
1 ЭТАП	9.34	7.39	126%	-111.30	-88.20	126%
2 ЭТАП	5.36	6.60	81%	-115.80	-97.40	119%
3 ЭТАП	3.55	3.80	93%	-51.00	-60.60	84%
Сосредоточенная нагрузка						
1 ЭТАП	0.24	0.15	160%	-124.70	-100.20	124%
2 ЭТАП	0.27	0.20	135%	-124.20	-93.90	132%
3 ЭТАП	0.26	0.21	124%	-84.90	-65.50	130%
РЕБРО 7						
	М _{ЛИРА-САПР}	М _{экспер}	Δ%	N _{ЛИРА-САПР}	N _{экспер}	Δ%
Симметричная нагрузка						
1 ЭТАП	5.07	4.57	111%	45.30	38.60	117%
2 ЭТАП	3.89	3.26	119%	56.30	44.20	127%
3 ЭТАП	3.12	2.52	124%	186.80	141.40	132%
Несимметричная нагрузка						
1 ЭТАП	5.25	4.20	125%	23.70	20.20	117%
2 ЭТАП	4.12	3.50	118%	47.90	39.20	122%
3 ЭТАП	3.07	2.57	119%	144.40	122.70	118%
Сосредоточенная нагрузка						
1 ЭТАП	0.24	0.18	133%	27.30	21.10	129%
2 ЭТАП	0.24	0.17	141%	24.60	19.20	128%
3 ЭТАП	0.20	0.17	118%	61.90	49.50	125%

Таблица 4 – Перемещения точек ячейки

№ этапа	Точка 2			Точка 13		
	$\Delta_{\text{ЛИРА-САПР}}$ мм	$\Delta_{\text{экспер}}$ мм	$\Delta\%$	$\Delta_{\text{ЛИРА-САПР}}$ мм	$\Delta_{\text{экспер}}$ мм	$\Delta\%$
Симметричная нагрузка						
1 ЭТАП	-0.79	-0.65	122%	-0.70	-0.91	77%
2 ЭТАП	-0.83	-0.67	124%	-0.35	-0.44	80%
3 ЭТАП	-0.06	-0.04	150%	-0.43	-0.54	80%
Несимметричная нагрузка						
1 ЭТАП	-0.49	-0.38	129%	-0.58	-0.74	78%
2 ЭТАП	-0.56	-0.44	127%	-0.32	-0.40	80%
3 ЭТАП	-0.06	-0.03	200%	-0.39	-0.48	81%
Сосредоточенная нагрузка						
1 ЭТАП	-0.45	-0.35	129%	-0.69	-0.86	80%
2 ЭТАП	-0.42	-0.33	127%	-0.35	-0.44	80%
3 ЭТАП	-0.08	-0.06	133%	-0.38	-0.43	88%

На основании проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Формы и характер эпюр N , M , ΔZ , σ , построенных на основании экспериментальных данных и численных методов расчета при всех этапах загрузки схожи и повторяют друг друга, это говорит об адекватности исследуемой ячейки купола.

2. Усилия (изгибающий момент и продольная сила), полученные численным методом отличались от фактических и отклонения варьировались в диапазоне $\pm 30\%$ (усилия) и $\pm 30\%$ (перемещения). Отметим, что на малых диапазонах измерений погрешность возрастала в силу погрешности инструментальных приспособлений.

3. Применение в расчетной схеме настила и прогонов позволило снизить усилия в основных ребрах N и M до 50% и повысить жесткость системы (до 50% уменьшение прогибов). Однако, усилия во внешних ребрах возросли, это объясняется скорее всего тем, что доля влияния настила для таких ребер гораздо меньше, чем для внутренних ребер.

4. К возможным причинам описанных выше погрешностей полученных результатов можно отнести следующие:

- конструкция ячейки и опоры имели погрешности при изготовлении и монтаже (неточность изготовления и, как следствие, нарушения геометрии конструкции; некоторая подвижность опорных узлов конструкции и опоры);
- точки конструкции, которые не были загружены и имели незначительные деформации, зачастую не точно возвращались в исходное положение или отклонялись в произвольном направлении;
- прогибомеры отклонялись не строго вертикально и имели некоторые горизонтальные перемещения, контролировать которые было затруднительно;
- природные свойства древесины – склонность к ползучести, зависимость от пороков.

Литература

1. Пат. 2476648 РФ, МПК E04B 1/32. Сетчатый деревянный купол / И.А. Таскин, Б.П. Пасынков – Оpubл. 27.02.2013г. Бюл. №6.
2. Молев И.В. Сетчатые купола в современной строительной практике. – Горький. Изд. ГГУ, 1981. – 64 с.
3. Питлюк Д.А. Испытание строительных конструкций на моделях. Стройиздат: Ленинград. 1971. – 160 с.
4. Юсипенко С.В., Батрак Л.Г., Городецкий Д.А.. МОНОМАХ 4.2. Примеры расчета и проектирования. Киев.: Факт. 2007г. – 292 с.
5. Ярцев В.П., Киселева О.А. Проектирование и испытание деревянных конструкций. – Тамбов.: ТГТУ, 2005. – 86 с.

References

1. Pat. 2476648 RF, MPK E04B 1/32. Setchatyj derevjannyj kupol / I.A. Taskin, B.P. Pasynkov – Opubl. 27.02.2013g. Bjul. №6.
2. Molev I.V. Setchatye kupola v sovremennoj stroitel'noj praktike. – Gor'kij. Izd. GGU, 1981. – 64 s.
3. Pitljuk D.A. Ispytanie stroitel'nyh konstrukcij na modeljah. Strojizdat: Leningrad. 1971. – 160 s.
4. Jusipenko S.V., Batrak L.G., Gorodeckij D.A.. MONOMAH 4.2. Primery rascheta i proektirovanija. Kiev.: Fakt. 2007g. – 292 s.
5. Jarcev V.P., Kiseleva O.A. Proektirovanie i ispytanie derevjannyh konstrukcij. – Tambov.: TGTU, 2005. – 86 s.