

**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.

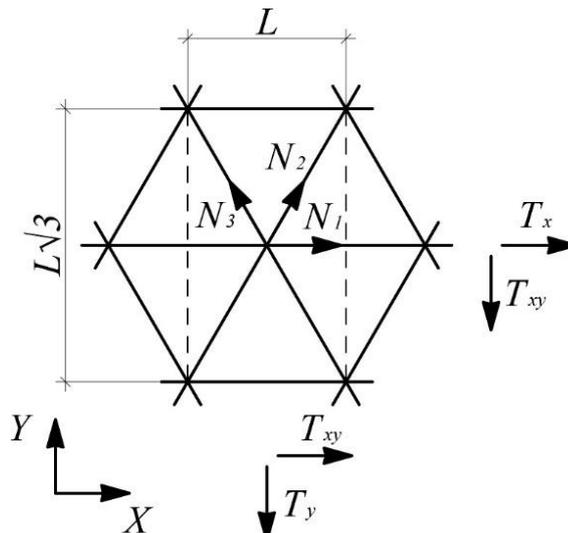


Рис. 1 – Схема распределения усилий в стержнях купола и в сплошном аналоге

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  $b \times h = 3 \times 6 \text{ см}$ , длиной  $L = 1150 \text{ мм}$  (центральные) и  $L = 1135 \text{ мм}$  (крайние), имеют два симметрично расположенных относительно нейтральной оси паза для заведения арматуры. Угол наклона ребер к горизонтали  $9.5^\circ$ . Значение угла было выбрано по натурной конструкции. Торцы ребер снабжены стальными накладками. Для армирования применялась стальная проволока  $d = 5 \text{ мм}$ . Процент армирования составлял  $\mu = 2,2\%$ . Концы арматуры снабжены резьбой. Арматура расположена на расстоянии  $h_0/2 = 20 \text{ мм}$  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].

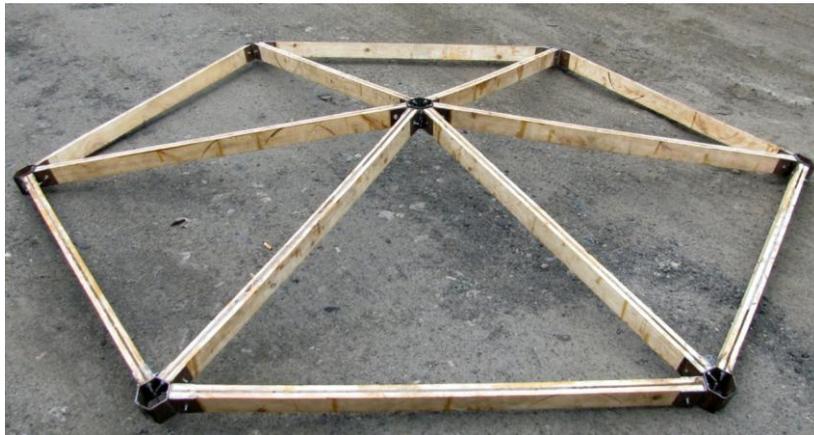


Рис. 1 – Схема №1, общий вид



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. Опирание узлов ячейки – шарнирно-неподвижное в опорных точках (см. рис. 3.4).

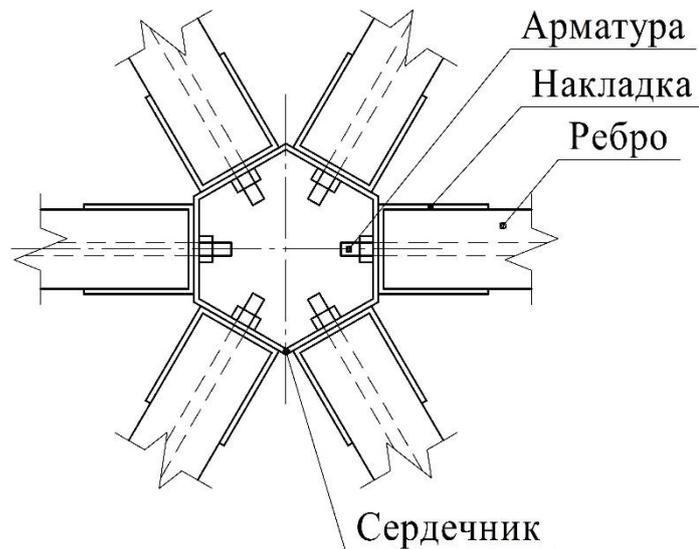


Рис. 3 – Узел крепления ребер к сердечнику

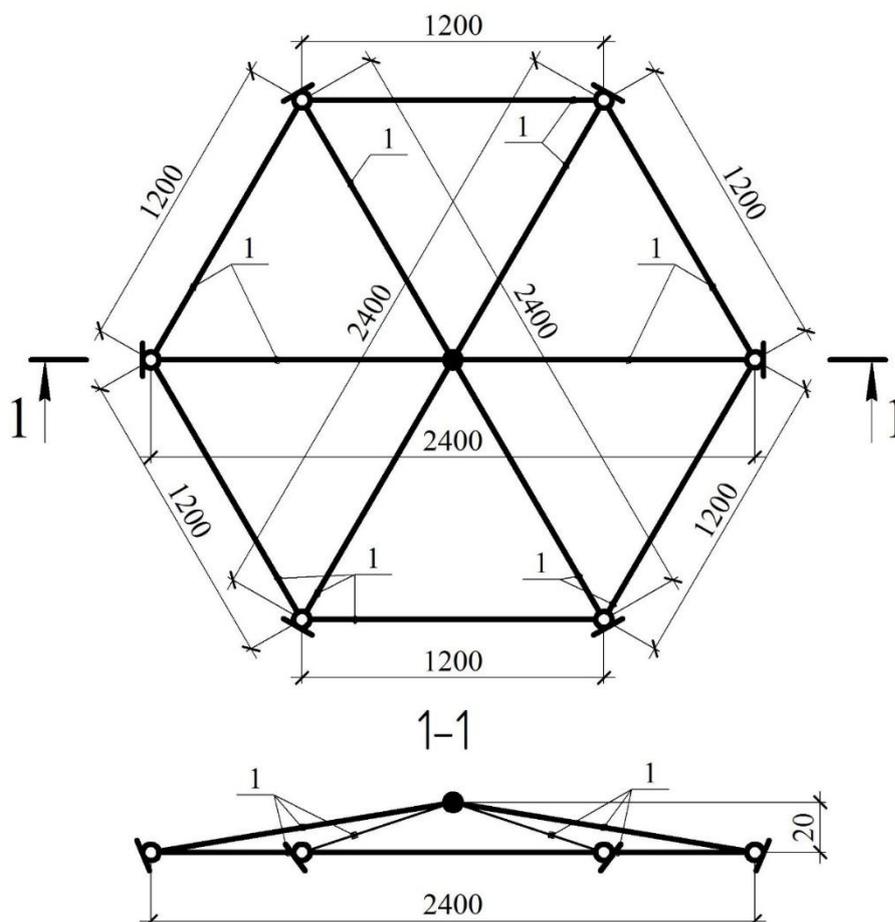
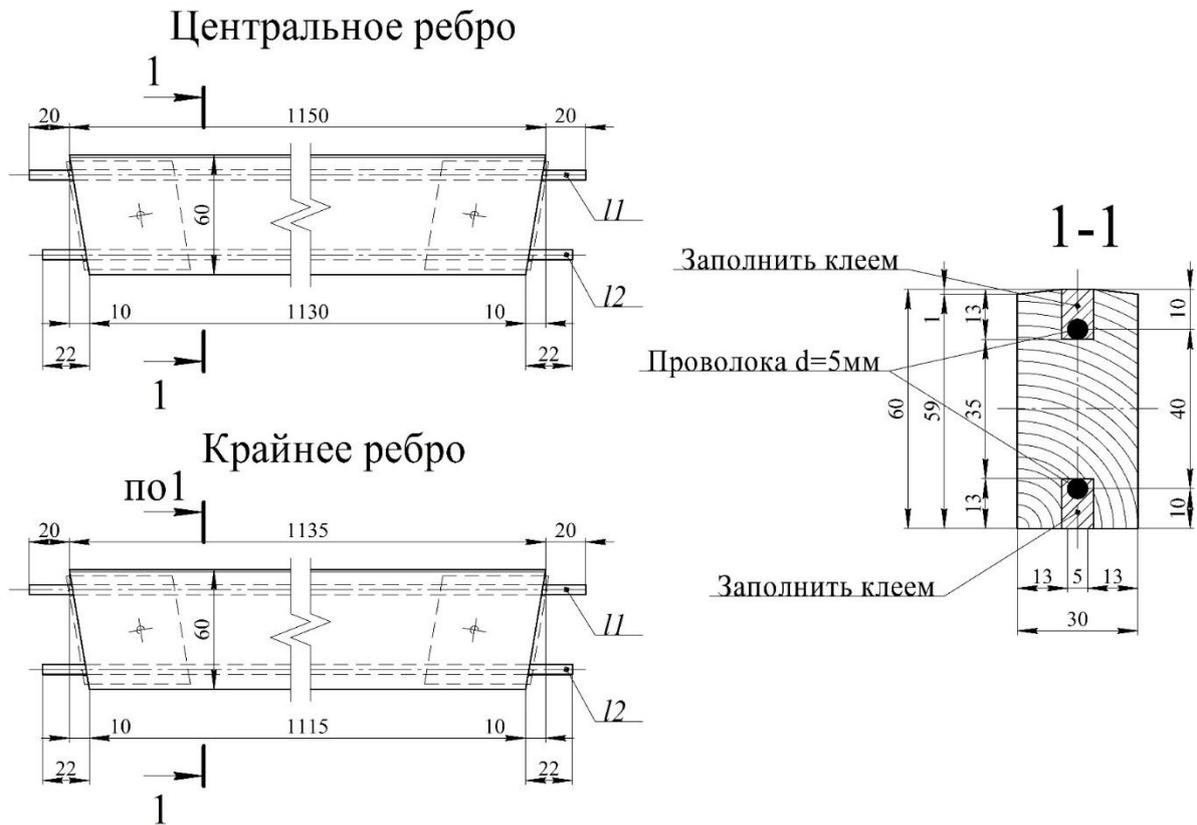


Рис. 4 – Расчетная схема пространственной шестигранной ячейки купола:  
1 – армированные ребра.

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



**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  $b \times h = 3 \times 6 \text{ см}$ . Узлы сопряжения прогонов с ребрами болтовые (см. рис. 7).



Рис. 6 – Схема №2. Общий вид

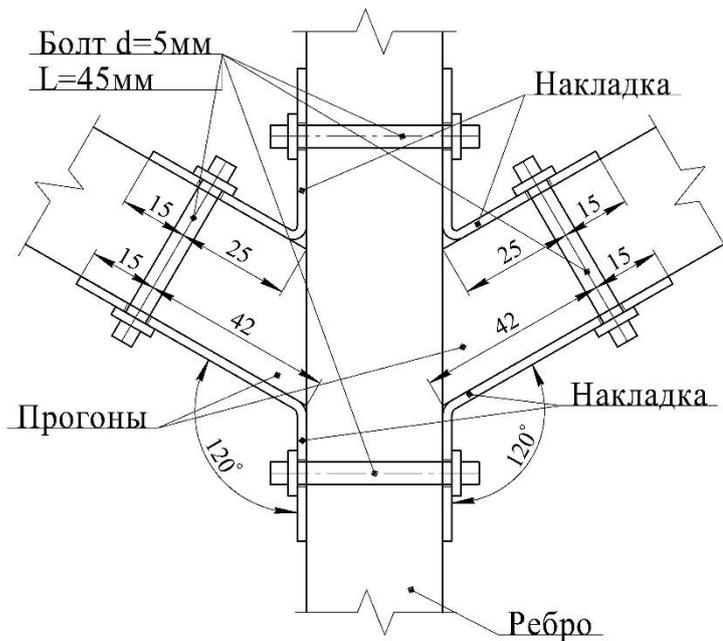


Рис. 7 – Узел крепления прогонов к ребру

**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 крючков 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.

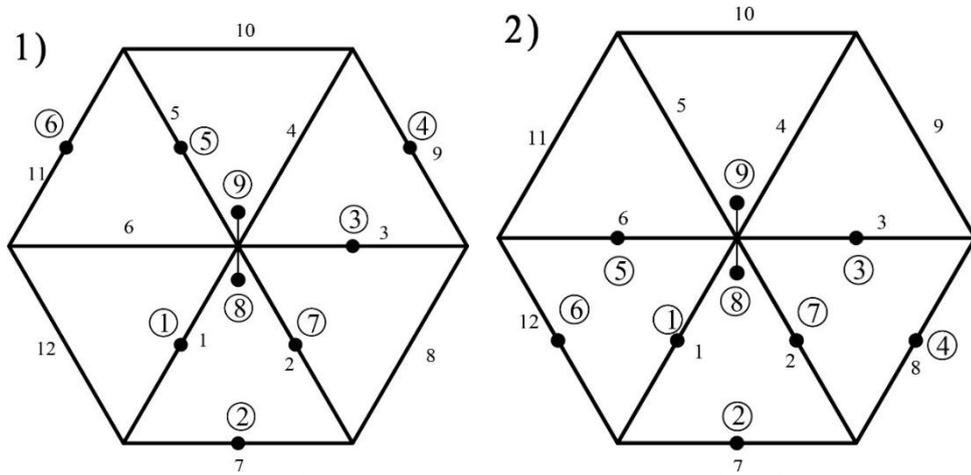


Рис. 11 – Схема расположения прогибомеров 6-ПАО:

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:

$$E = \frac{E_0 + E_{90}}{2} \tag{1}$$

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:

$$A_{пр} = A_1 + A_2 \frac{E_2}{E_1} + A_3 \frac{E_3}{E_1} \tag{2}$$

$$J_{пр} = J_1 + J_2 \frac{E_2}{E_1} + J_3 \frac{E_3}{E_1} \tag{3}$$

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.

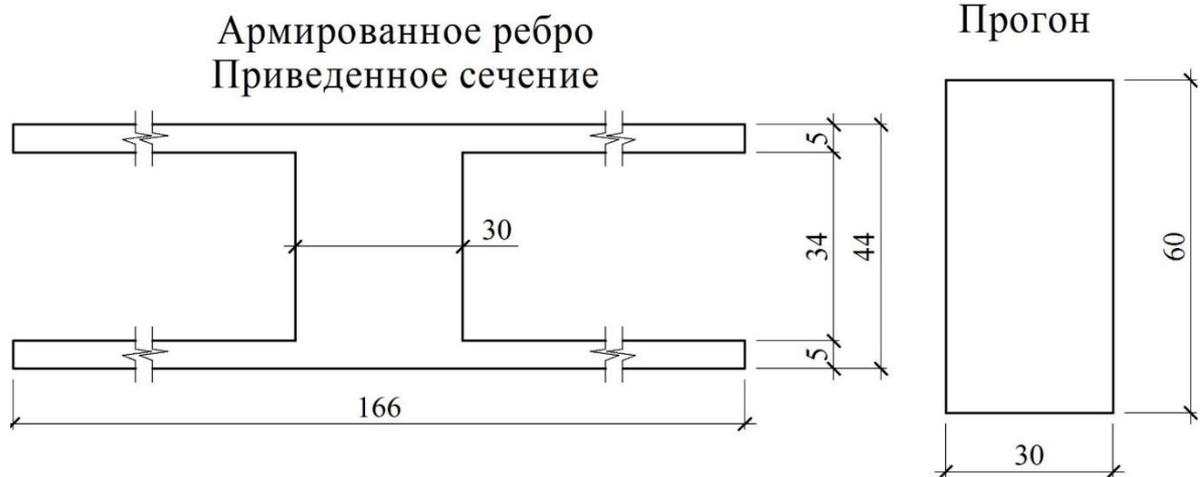


Рис. 12 – Приведенное сечение армированного ребра и прогона (размеры в мм)

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.

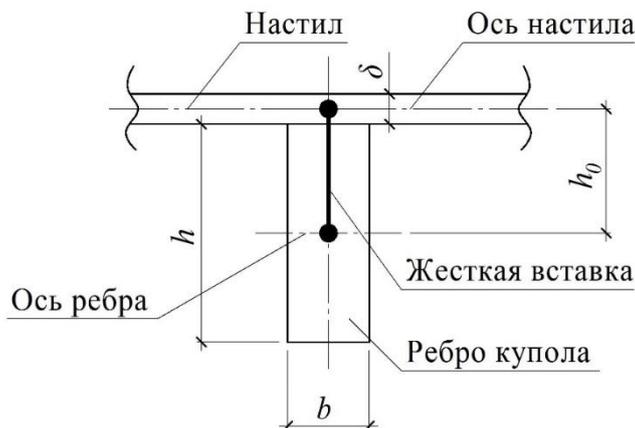


Рис. 13 – Соединение ребер с настилом через жесткую вставку

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.

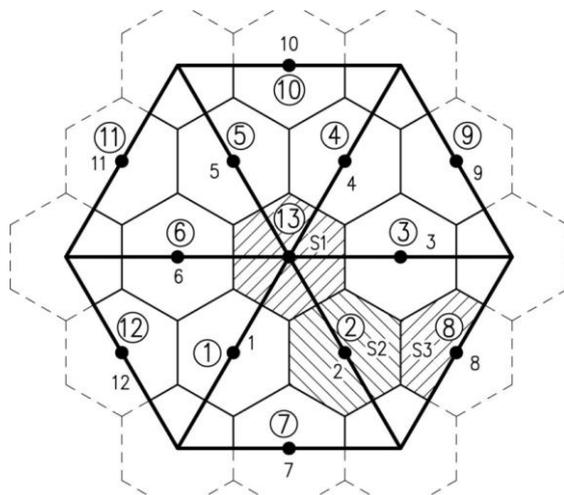


Рис.14 – Схема расположения точек загрузки и формы грузовых площадей

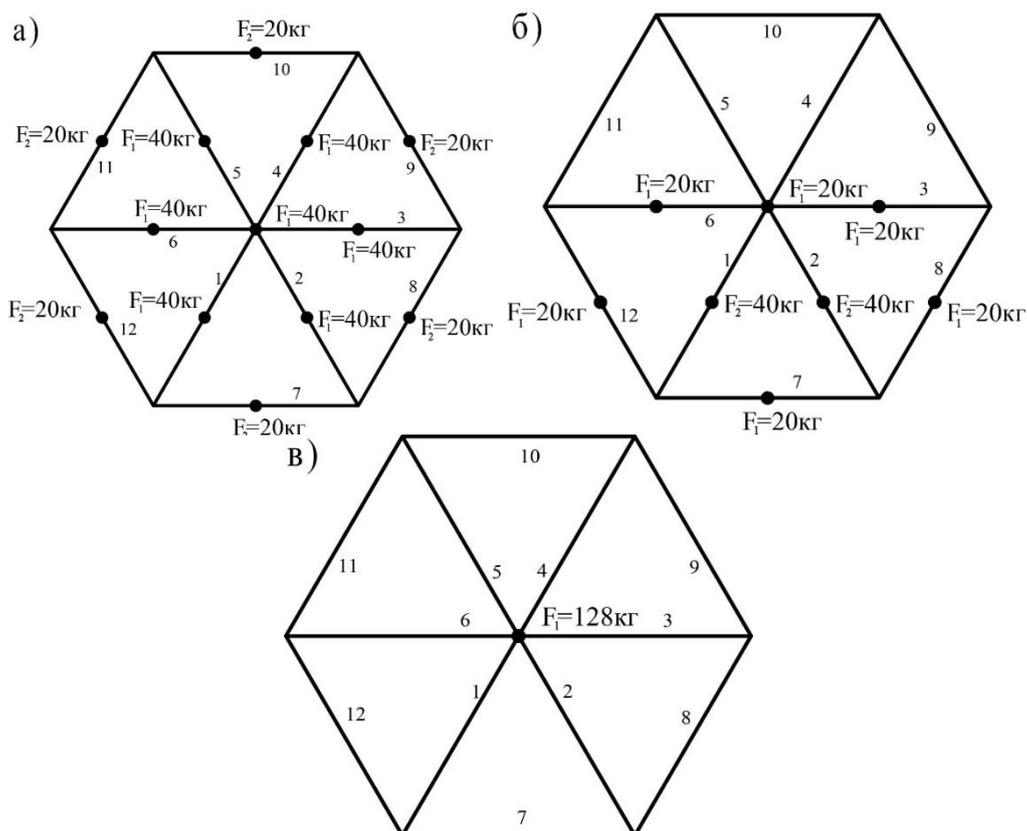


Рис. 15 – Действующие нагрузки: а) симметричная; б) несимметричная; в) сосредоточенная в центральном узле

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

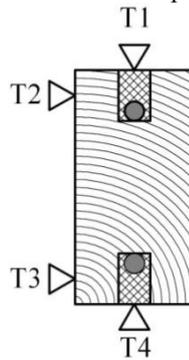


Рис. 16 – Расположение тензометрических датчиков Т1...Т4

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  $\Delta$  – 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

<b>РЕБРО 1</b>						
	$M_{\text{ЛИРА-САПР}}$ КГ·М	$M_{\text{экспер}}$ КГ·М	$\Delta\%$	$N_{\text{ЛИРА-САПР}}$ КГ	$N_{\text{экспер}}$ КГ	$\Delta\%$
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%
<b>РЕБРО 7</b>						
	$M_{\text{ЛИРА-САПР}}$	$M_{\text{экспер}}$	$\Delta\%$	$N_{\text{ЛИРА-САПР}}$	$N_{\text{экспер}}$	$\Delta\%$
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  $N$ ,  $M$ ,  $\Delta Z$ ,  $\sigma$ , 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. Pasyнков – 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.