

УДК 624.014

## МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБЛЕГЧЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПИРАМИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ

*С.А. Ращепкина, В.Р. Ильин, С.В. Бойчук*

Разработано облегченное конструктивное решение пространственного купольного покрытия пирамидального типа, имеющего высокую архитектурную выразительность; на примере расчета показана эффективность нового решения купольного покрытия крестообразной в плане формы.

*Ключевые слова:* покрытие; купол; пирамидальная форма; металл; расчет; эюры.

---

## METAL OF LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION PYRAMID SHAPE

*S.A. Rashchepkina, V.R. Ilyin, S.V. Boychuk*

It is developed the lightweight design solution spatial dome of the pyramidal type, having a high architectural significance; example calculation shows the effectiveness of the new solution dome cruciform shape.

*Keywords:* cover; dome; pyramid shape; metal; design; diagram.

Облегченные быстровозводимые металлоконструкции – это высокопрочные здания, которые можно построить за несколько месяцев при любых погодных условиях и климатических особенностях региона строительства.

Из легких металлических конструкций можно построить практически любую конструкцию промышленного или жилого назначения. Они отлично подходят для возведения крупных ангаров и складов, офисных зданий, торговых центров, станций технического обслуживания и других зданий сооружений. Оригинальные проекты строгой многогранной формы, выполненные из металла, представлены на рисунках 1 и 2.

Бангкокский университет является эксплуатируемым зданием, построенным в Таиланде. Он имеет очень необычную уникальную архитектурную форму, каждая часть здания выполнена в абстрактном стиле и существенно отличается от других частей, задавая эффектный вид зданию. Но и отсутствие унификаций элементов и частей здания делает его сложным при монтаже, и приводит к увеличению конечной стоимости объекта.

Башня Деланоэ – этот проект разрабатывался для Парижа, но от него отказались из-за существенного отличия сооружения от общего архитектурного стиля города, а также нежелания горожан строить в своем высотные здания.



*а*



*б*

Рисунок 1 – Сооружения из легких металлических конструкций: а – пирамиды Лувра, Франция [1]; б – Пирамида Мемфис, США [1]



а



б

Рисунок 2 – Многогранные сооружения: а – Банковский университет, Таиланд [2]; б – проект 180-метровой парижской башни, Франция [3]

Для возведения легких металлических конструкций может быть использована горячекатаная сталь, специальные алюминиевые сплавы.

Следует отметить, что при проектировании и возведении зданий с зальными помещениями, возникает комплекс сложных архитектурных и инженерных задач. Для создания комфортных условий в зале, обеспечения требований технологии, акустики, изоляции его от других помещений и окружающей среды определяющее значение приобретает конструкция покрытия зала. Зал – основное композиционное ядро большинства общественных зданий. Наиболее часто встречающаяся конфигурация плана – прямоугольник, квадрат, эллипсовидные и подковообразные планы, реже – трапециевидные. При выборе конструкций покрытия зала решающее значение имеет необходимость связать зал с внешним миром посредством открытых остекленных поверхностей.

Проведенный авторами анализ формообразования различных зданий и сооружений многогранной формы, их уникальных особенностей позволил выявить несколько факторов, возникающих при проектировании пространственных металлических конструкций:

- предлагаемая конструкция должна иметь высокую архитектурную выразительность, которая должна гармонировать с общим архитектурным стилем города, в котором данная конструкция будет эксплуатироваться;
- элементы конструкции должны быть максимально унифицированы, что обеспечит конструкции простоту монтажа и меньшую стоимость.

В результате было разработано новое конструктивное решение эффективной пространственной мансардной конструкции, имеющей высокую архитектурную выразительность, гармонирующую

с нижележащей частью многоэтажного здания. Конструкция многогранного купола с уклоном  $45^\circ$  состоит из металлических профилей, основным материалом которых является холодногнутая сталь.

Пространственная конструкция в плане имеет крестообразную форму. Для уменьшения теплопотерь кровля выполнена из энергосберегающих стеклопакетов, заполненных инертным газом – аргоном. Основные размеры и общие виды предлагаемой пространственной мансардной конструкции представлены на рисунке 3. Пирамидальная конструкция опирается на железобетонную шахту, нижняя часть конструкции – на металлический пояс по периметру мансардного помещения. Пояс в свою очередь опирается на несущие монолитные стены.

Для остекления конструкции выбраны стеклопакеты из каленого стекла, заполненные инертным газом – аргоном, которые хороши для понижения теплопередачи и сохранения тепла в помещении в зимнее время.

Выбор данной пространственной металлической конструкции обусловлен тем, что она имеет высокую архитектурную выразительность, которая гармонирует с нижележащей частью здания. Необычная форма конструкции привлекает взгляды людей, оставаясь у них в памяти.

Расчет пирамидальной конструкции купола выполнялся аналитически и с применением программного комплекса “ЛИРА”. Разработка инженерного алгоритма расчета с применением программных комплексов облегчает расчет конструкций и представляет собой метод научного конструирования. Причем его конечная цель достигается подбором рационального сечения элементов пространственного купольного покрытия пирамидального типа, обеспечивающего максимальное снижение его материалоемкости.

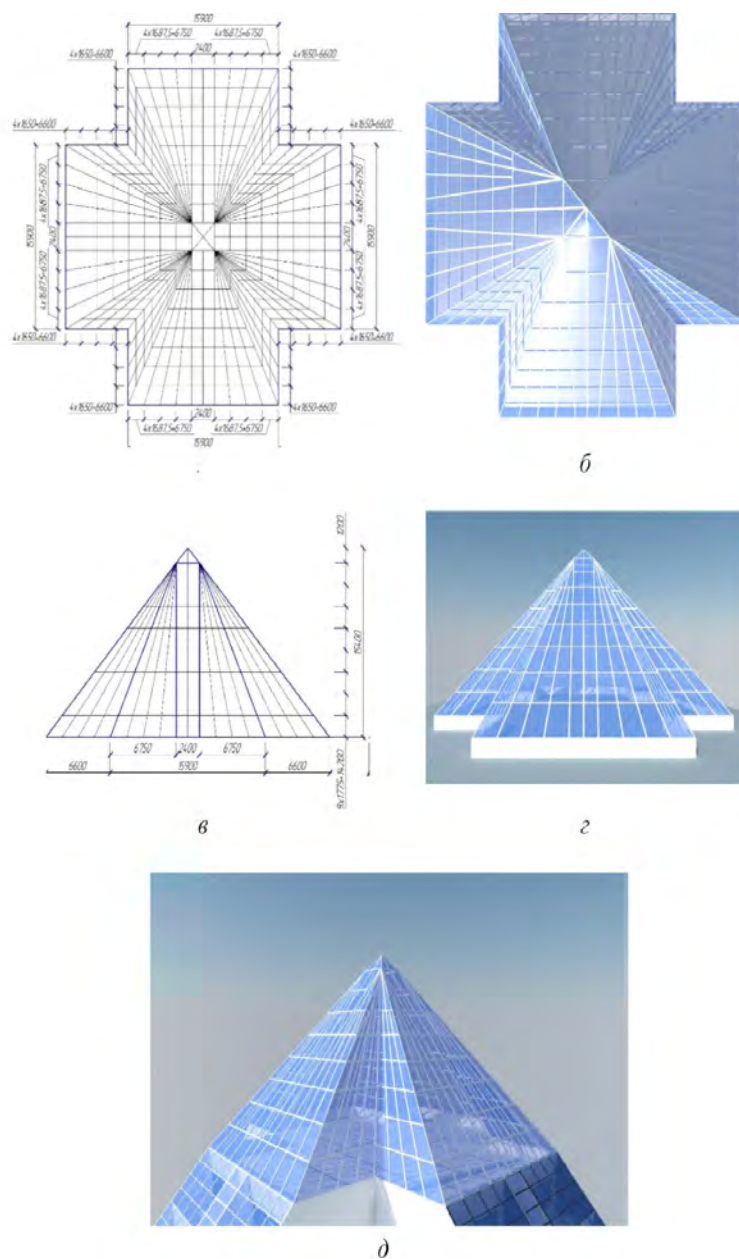


Рисунок 3 – Многогранный купол: а, б – вид в плане; в, г – вид сбоку; д – общий вид

В расчете ПК “ЛИРА” лежит метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в форме перемещений. Выбор именно этой формы объясняется простотой ее алгоритмизации и физической интерпретации. Реализованный вариант МКЭ использует принцип возможных перемещений:

$$a(u, v) = (f, v), \quad (1)$$

где  $u$  – искомое точное решение;  $v$  – любое возможное перемещение;  $a(u, v)$ ,  $(f, v)$  – возможные работы внутренних и внешних сил.

Занимаемая конструкцией область разбивается на конечные элементы  $\Omega_r$ , назначаются узлы и их степени свободы  $L_i$  (перемещения и углы поворота узлов).

Степеням свободы соответствуют базисные (координатные, аппроксимирующие) функции  $\mu_r$  отличные от нуля только на соответствующих звездах элементов и удовлетворяющие равенствам:

$$L_i \mu_i = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}. \quad (2)$$

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели основного несущего элемента

№ п/п	Наименование и профиль	Поперечное сечение	Материалоемкость, т	Цена за тонну, тыс. руб.	Общая цена, тыс. руб.
1	Двутавр № 14 140×80		28,69	50,6	1451,714
2	Тавр, сотавленный из двух уголков № 7 70×6		23,06	43,6	1005,416
3	Двутавр из двух швеллеров 8У 80×40		25,44	41,3	1050,672
4	Профиль круглой трубы 102×5		21,58	55,2	1191,216
5	Профиль квадратной трубы 80×5		21,35	43,3	918,050

Приближенное решение  $U_h$  ищется в виде линейной комбинации базисных функций

$$U_h = \sum_{i=1}^N u_i \mu_i, \quad (3)$$

удовлетворяющей главным (кинетическим) условиям, где  $u_i$  – числа;  $N$  – количество степеней свободы.

Расчет пирамидального купола можно выполнять с использованием линейных задач метода конечных элементов. Для этого, подставляя в (1)  $U_h$  вместо  $U$  и  $\varphi_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) вместо  $V$ , получим систему уравнений МКЭ:

$$\sum_{i=1}^N u_i a(\mu_i \mu_j) = (f, \mu_j), i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Обозначив  $K$  матрицу жесткости с элементами  $k_{ij} = a(\mu_i \mu_j)$ ;  $P$  – вектор нагрузок с элементами  $P_i = (f, \mu_i)$  и  $X$  – искомый вектор с элементами  $u_i$ , запишем систему (4) в матричной форме:

$$KX = P. \quad (5)$$

*Пример.* Требуется определить перемещения и усилия в покрытии виде многогранного купола пирамидального типа с размерами в плане 29,1×29,1 м и высотой 15,4 м. Материал конструкций – сталь С245, нагрузки: постоянная – 0,57 кПа, П – снеговой район; V – ветровой район.

Расчет конструкции производили в программном комплексе “ЛИРА” в следующей последовательности:

- 1) создавали пространственную расчетную схему конструкции с учетом следующих аспектов:
  - степень свободы системы – 6 (X, Y, Z, UX, UY, UZ);
  - закрепление узлов системы – жесткое;

- пространственная схема конструкции в программном комплексе “ЛИРА” трехмерная, построена с соблюдением всех фактических размеров.

2) задавали жесткости для элементов пространственной конструкции;

3) вводили нагрузку: постоянную нагрузку и временную нагрузку (снеговую и ветровую);

4) производили генерацию таблиц РСУ с соблюдением расчетных сочетаний усилий в соответствии с СП [4];

5) выполняли расчет пирамидального купола, результаты расчета представлялись в виде эпюр усилий, мозаик перемещений, интерактивных таблиц и протокола расчета;

6) производили анализ полученных данных, при этом сравнивали несколько вариантов поперечных сечений элементов пирамидального купола, на основе которых выбиралось наиболее выгодное сечение по усилиям и соответственно расходу металла (таблица 1). Размеры сечений приняты в соответствии с [4]. Цены на металл приняты из [6].

Анализ рассмотренных вариантов сечений элементов показывает, что наиболее выгодным с экономической точки зрения является вариант конструирования № 5 – профиль из квадратной трубы 80×5, то есть данный профиль наиболее экономичен для предлагаемой пространственной конструкции пирамидального купола.

На рисунке 4, а представлена мозаика перемещений по оси X: а – от постоянной нагрузки; б – от временной нагрузки, а также эпюры усилий (рисунок 5), полученные по результатам расчета в ПК “ЛИРА”.

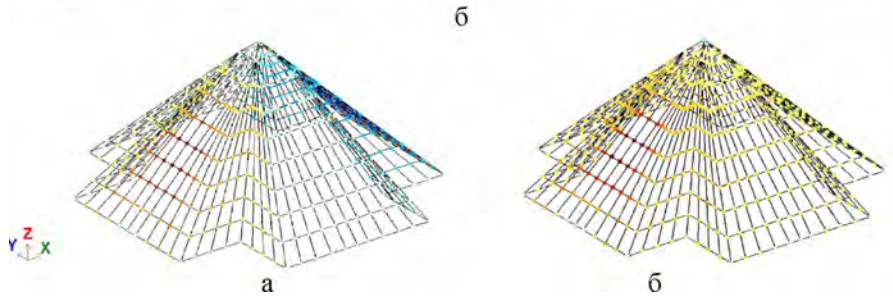


Рисунок 4 – Мозаика перемещений по оси X

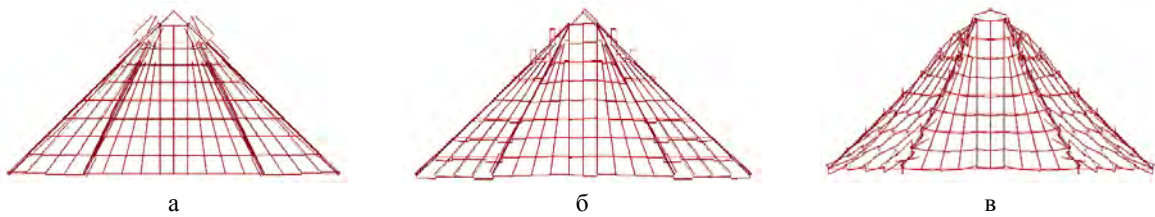


Рисунок 5 – Эпюры и напряжения в элементах пирамидальной конструкции:  
а – эпюра продольных сил N; б – эпюра поперечных сил  $Q_x$ ; в – эпюра изгибающих моментов  $M_x$

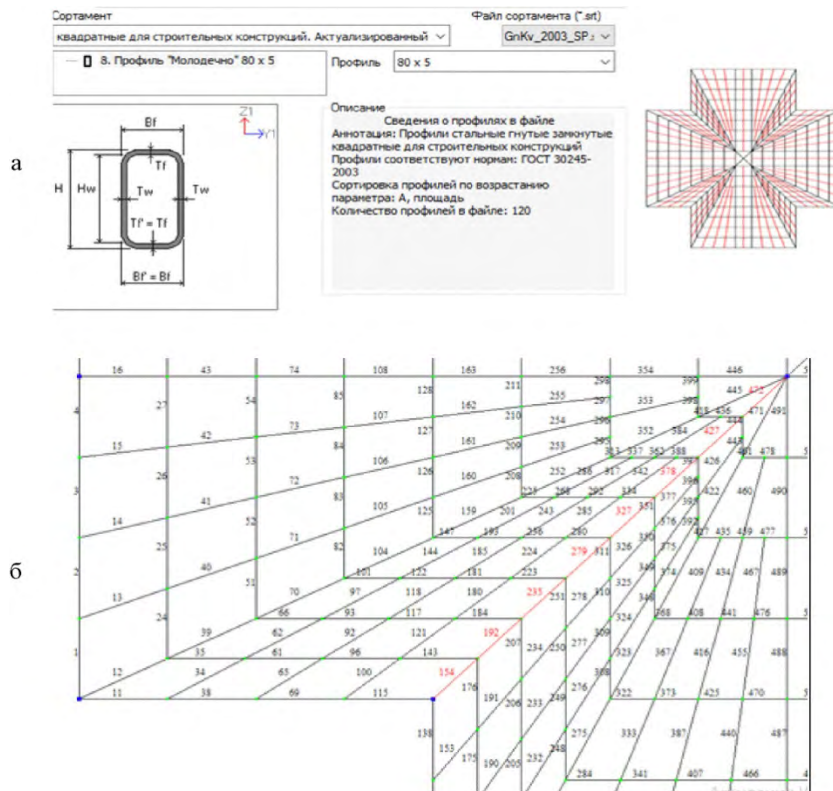


Рисунок 6 – К расчету радиального ребра:  
а – фрагмент расчета сечения ребра; б – красным цветом выделен элемент № 154

Выполним поверочный аналитический расчет сжатого элемента № 154 (рисунок 6, б) при следующих данных:  $N = 174,344$  кН,  $l = 2020$  мм; прямоугольная труба  $80 \times 5$  имеет следующие характеристики: площадь сечения  $A = 12,25$  см<sup>2</sup>; радиус инерции  $i = 2,76$  см; в запас принимаем  $\varphi = 0,5$ .

Найдем гибкость стержня,  $\lambda = l / i = 2020 / 2,76 = 73,2$ .

Согласно таблице 4 приложения “Д” [5] при гибкости  $\lambda = 73,2$  коэффициент  $\varphi = 0,732$ . Тогда имеем:

$\sigma = N / \varphi A = 174344 / (0,732 \cdot 12,25 \cdot 100) = 194,43$  МПа  $< R_y \gamma_c = 240$  МПа.

Условие устойчивости выполняется.

Таким образом, в результате анализа существующих решений пространственных пирамидальных облеженных металлических сооружений были выявлены новые возможности и уникальные особенности пространственных металлических конструкций.

Разработано эффективное конструктивное решение пространственного покрытия пирамидального типа, имеющего высокую архитектурную выразительность; выполнен расчет нового конструктивного решения пространственного пирамидального покрытия крестообразной в плане формы, который выявил высокую его несущую способность.

Предложенное конструктивное решение может быть применено в качестве мансард высотных сооружений, а также в качестве отдельных самонесущих зданий многогранной формы различного назначения. Необычная пирамидальная форма сооружения привлекает взгляды людей, впечатляет красотой и оригинальностью.

#### Литература

1. Информационный портал: [http://pix.com.ua/ru/cities/europe/picturesque\\_paris/223060-upsee.html](http://pix.com.ua/ru/cities/europe/picturesque_paris/223060-upsee.html) (дата обращения 03.04.2017).
2. Информационный портал: <http://www.arhinovosti.ru/2011/11/10/kompleks-zdaniij-dlya-bangkokskogo-universiteta-ot-architects-49-rangsitailand/> (дата обращения: 08.04.2017).
3. Информационный портал: [http://www.admagazine.ru/arch/74719\\_treugolnaya-bashnya-v-tsentre-parizha.php](http://www.admagazine.ru/arch/74719_treugolnaya-bashnya-v-tsentre-parizha.php) (дата обращения: 08.04.2017).
4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*. М.: Изд-во НИЦ Строительство, 2017.
5. *Городецкий А.* Примеры расчета и проектирования / А.С. Городецкий. Киев: Факт, 2002. 99 с.
6. Информационный портал: <http://www.stroymetall.ru/metal-roll/> (дата обращения: 08.04.17).