

УДК 624.074

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Регулирование усилий в большепролетных конструкциях при разработке рациональной конструктивной формы здания дельфинария в Волгограде

И.Р. Ситников, А.В. Голиков*

Волгоградский государственный технический университет
пр-т Ленина, 28, Волгоград, Российская Федерация, 400131

*Автор, ответственный за переписку

(поступила в редакцию: 10 апреля 2018 г.; принята к публикации: 13 июля 2018 г.)

В ряде случаев архитектурно-компоновочные, технологические или иные специальные требования диктуют разработку зданий и сооружений с крупными пролетами покрытий. Выбор схемы несущих конструкций зависит от размера пролета, архитектурно-планировочного решения, формы здания в плане, высоты сооружения, наличия и типа подвесного транспорта, требований, предъявляемых к жесткости покрытия, характера освещения и аэрации, типа кровли, размера и распределения нагрузок, необходимости размещения больших масс людей и других факторов. Различия в назначении большепролетных зданий и сооружений, особенностях технологических процессов, архитектурных и эстетических требованиях определяют применение разнообразных решений конструкций таких покрытий.

В статье представлены конструкторские мероприятия по реализации архитектурно-художественного решения здания дельфинария в г. Волгограде. Выполнено аналитическое описание сложных архитектурных и конструктивных форм. Приведен анализ существующих конструктивных форм большепролетных конструкций. При проектировании была реализована концепция комбинированной арочно-вантовой системы, в которой вантовая система выполняет роль разгружающей и поддерживающей системы. Проведено исследование работы под нагрузкой различных схем вантовой системы. Также было исследовано влияние предварительного натяжения оттяжек на деформации поддерживаемых ими конструкций, из чего были определены оптимальные значения усилий натяжения вант.

Ключевые слова: проектирование, металлические конструкции, большепролетные конструкции, арочные конструкции, вантовые конструкции, предварительное натяжение

Введение

В городе Волгограде предложено строительство дельфинария в составе реабилитационного центра. Здание имеет сложную каплевидную форму. Образ дельфинария создан плавными, волнообразными линиями на фасадах, подчеркивающими основное назначение здания.

Цели и задачи

Цель работы – разработка конструктивной формы здания дельфинария в г. Волгограде, способствующей воплощению предложенной архитектурной идеи с минимизацией металлоемкости конструкций.

Задачи, решаемые в работе:

- анализ конструктивных форм, позволяющих реализовать архитектурную идею;
- определение математических зависимостей, позволяющих описать архитектурные формы;
- проработка конструктивного решения, позволяющего воспринять распор (при применении пространственных арочных систем) с целью получения фундаментов с минимальными размерами в плане;
- разработка конструктивных мероприятий по уменьшению высоты сечения несущих конструкций;
- определение рациональных значений предварительного натяжения вантовых элементов;
- разработка рекомендаций по созданию конструктивной формы большепролетных зрелищных сооружений, наиболее полно реализующей архи-

тектурную форму по критерию минимизации материалоемкости.

Объектом исследования является конструктивная форма здания дельфинария размерами в плане 54×84 м (близкими к эллипсу с полуосями 27 и 42 м) и высотой 20,5 м.

Материалы и методы исследования

Краткий анализ конструктивных форм, позволяющих реализовать архитектурно-художественное решение дельфинария

Для создания единого свободного пространства под покрытием и увеличения полезной площади здания принято решение о разработке проекта дельфинария в виде большепролетной про-

странственной системы. В качестве материалов несущих конструкций применена сталь, так как покрытия больших пролетов наиболее целесообразно перекрывать металлическими конструкциями как наиболее легкими. Конструктивные формы большепролетных конструкций покрытий очень разнообразны. Исследованию различных типов большепролетных конструкций посвящено большое количество работ как российских [1–10], так и зарубежных ученых [11–18]. На данный момент в качестве большепролетных конструкций покрытий применяются следующие конструктивные системы: балочные (рис. 1), рамные (рис. 2), арочные (рис. 3), пространственные стержневые (рис. 4) и висячие – вантовые (рис. 5), вантовые с подвешенными конструкциями (рис. 6).

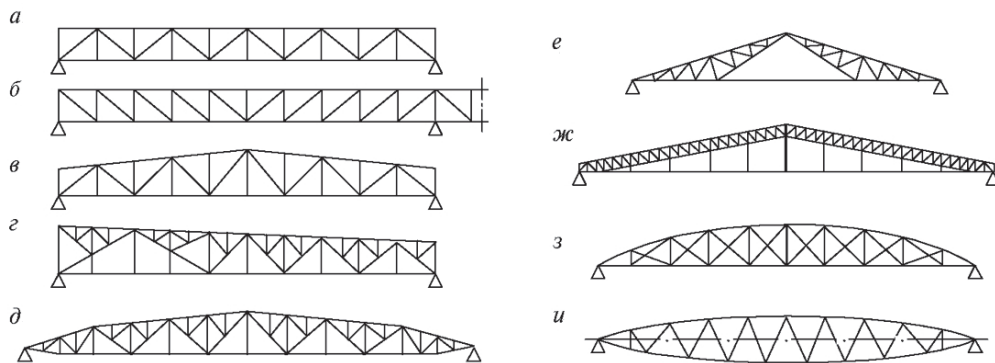


Рис. 1. Балочные системы большепролетных покрытий:

a, б – ферма с параллельными поясами; *в* – двускатная ферма; *г* – односкатная трапециевидная ферма; *д* – полигональная ферма; *е* – треугольная ферма; *ж* – двускатная ферма с параллельными поясами с затяжкой; *з* – сегментная ферма; *и* – ферма с параболическим очертанием поясов

[Figure 1. Beam systems of large-span shells:

a, б – parallel girder; *в* – gable trapezoidal truss; *г* – saddle-pitch trapezoidal truss; *д* – polygonal truss; *е* – triangular truss; *ж* – gable truss with parallel chords with tightening; *з* – segment truss; *и* – truss with parabolic outline zones]

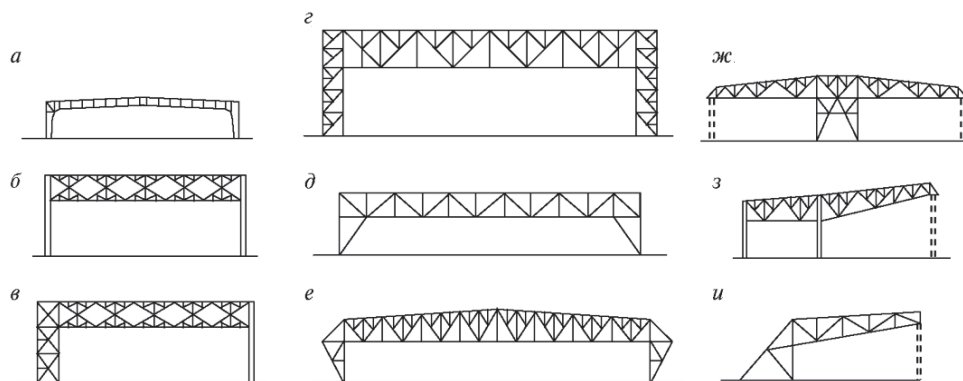


Рис. 2. Рамы большепролетных покрытий:

a – сплошная; *б* – сквозная с гибкими стойками; *в* – с одной гибкой стойкой; *г* – с жесткими стойками; *д* – двухшарнирная; *е* – с подкосами снаружи; *ж* – двухконсольная; *з* – одноконсольная; *и* – консольная

[Figure 2. Frames of large-span shells:

a – solid; *б* – through with flexible stands; *в* – with one flexible stand; *г* – with rigid stands; *д* – double-hinged; *е* – with struts on the outside; *ж* – double-console; *з* – single-console; *и* – console]



Рис. 3. Конструктивные системы арок большепролетных покрытий:

a – двухшарнирная; *б* – трехшарнирная; *в* – бесшарнирная

[Figure 3. Constructive systems of arches of large-span shells:

a – double-hinged; *б* – three-hinged; *в* – hingeless]

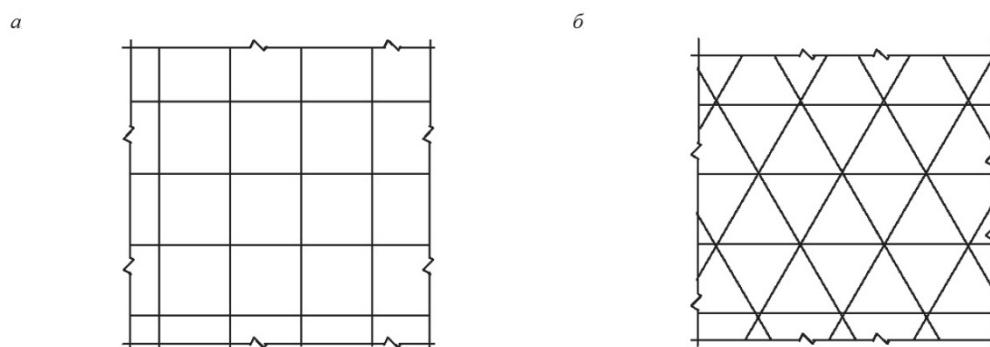


Рис. 4. Примеры схем пространственных стержневых систем:

a – со структурой на основе четырехугольной сетки; *б* – со структурой на основе треугольной сетки

[Figure 4. Examples of schemes of spatial truss structures:

a – with a structure based on a quadrangular grid; *б* – with a triangular grid structure]

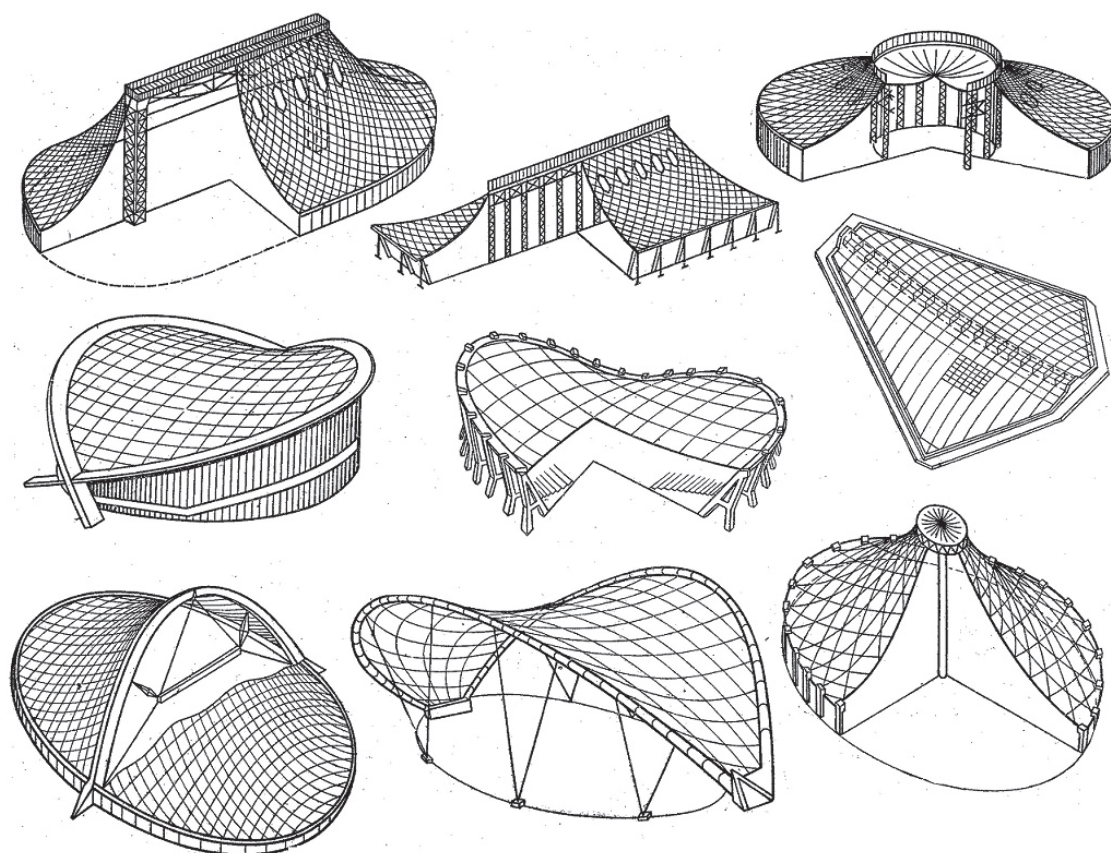


Рис. 5. Висячие покрытия

[Figure 5. Hanging coatings]

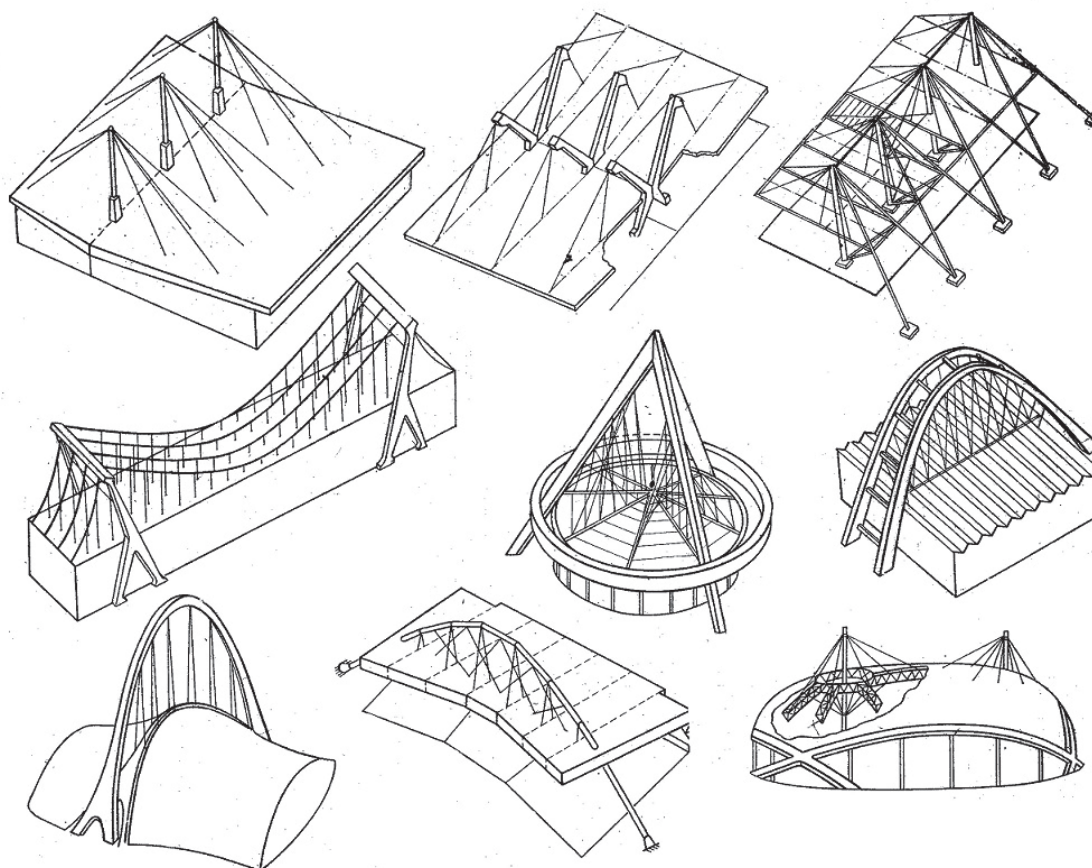


Рис. 6. Вантовые системы с подвешенными конструкциями
[Figure 6. Cable-stayed systems with suspended structures]

Покрытие дельфинария в плане имеет форму неправильного эллипсоида, который в большей степени можно реализовать в форме вытянутой пространственной каплевидной системы. Для обеспечения пространственной жесткости и устойчивости несущая система выполняется ребристой. Система ребер представляет собой систему поперечных арок, опирающихся на единую несущую продольную арку. Арки позволяют наиболее точно описать поверхность покрытия. Применение арочных конструкций также способствует снижению высоты сечения несущих элементов покрытия по сравнению с большепролетными балками и рамами [1–4].

Аналитическое описание архитектурных и конструктивных форм

При разработке конструктивной формы в качестве задания была предоставлена архитектурная форма, представленная на рис. 7. Архитектурная форма была предложена архитектором Р.Х. Ишмаметовым и доработана при участии инженера к.т.н. А.В. Голикова в качестве консультанта по

конструкторской части дипломного проекта архитектора Е.М. Галицкой.

По результатам анализа архитектурных форм, опираясь на обобщенный опыт проектирования большепролетных конструкций, принято решение реализовать форму пространственной арочной системой. Для конструктивной проработки форм здания выполнено описание аналитическими зависимостями разбивочных и центральных осей конструкций.

Описание кольцевой разбивочной оси выполнено участками по исходным осевым габаритам здания и шагам колонн. Расстояния между колоннами в плане приняты в кольцевом направлении кратно строительному модулю в 300 мм и составили в кольцевой части здания 9300 и 10 500 мм, а в части здания, описанной в плане параболой – 9000 мм. Для определения формы кольцевой оси найдены точки расположения колонн. Линии, соединяющие точки расположения колонн, аппроксимированы, полученные математические зависимости для кольцевой оси сведены в табл. 1. Радиальные оси перпендикулярны кольцевой оси и проходят через точки расположения колонн. Схема разбивочной сети приведена на рис. 8.

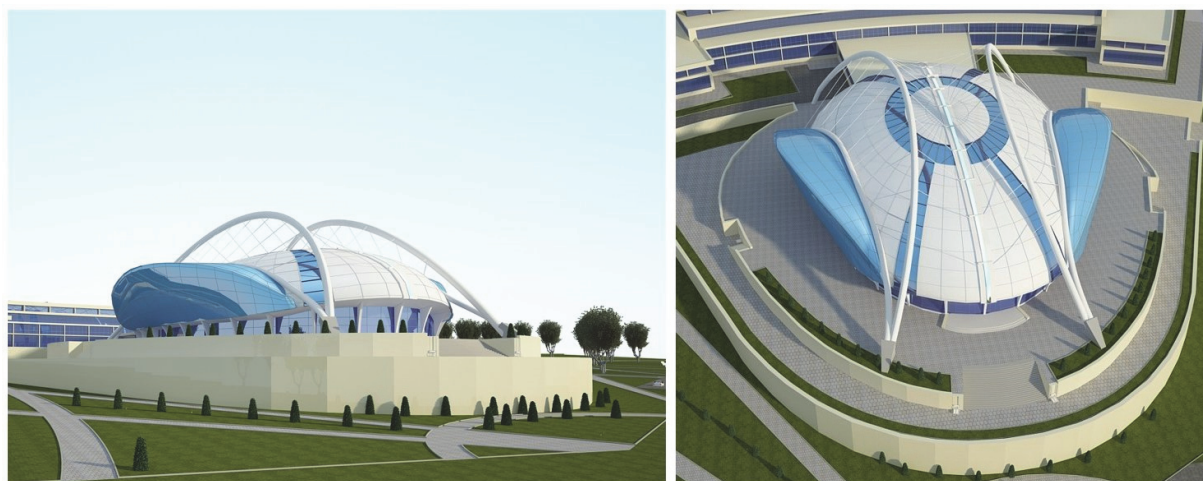


Рис. 7. Архитектурно-художественное решение здания дельфинария
[Figure 7. Architectural and artistic concept of the building of a Dolphinarium]

Таблица 1

Уравнения кольцевой разбивочной оси (Ось № 24)
[Table 1. Equations ring staking grid line (Axis № 24)]

Участок оси [Axis section]	Параметрическая зависимость кривой, тип кривой [Parametric dependence of the curve, curve type]	Начало координат [Origin]
От оси № 2 до оси № 23 [From the axis No. 2 to the axis No. 23]	Окружность радиусом 17,5 м [Circle with a radius of 17.5 m]	
От оси № 2 до оси № 4 [From axis No. 2 to axis No. 4]	Парабола [Parabola] $y = 5,5415 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 4,5070 \cdot 10^{-1} \cdot x + 2,0422 \cdot 10^3$	Точка пересечения оси № 24 на участке от оси № 2 до оси № 23 с осью № 1 [Point of intersection of the axis No. 24 on the section from axis No. 2 to axis No. 23 with axis No. 1]
От оси № 4 до оси № 6 [From axis No. 4 to axis No. 6]	Парабола [Parabola] $y = 2,9419 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 1,0071 \cdot 10 \cdot x + 9,8938 \cdot 10^4$	
От оси № 4 до оси № 8 [From axis No. 4 to axis No. 8]	Парабола [Parabola] $y = 5,5497 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 2,7936 \cdot 10^2 \cdot x + 3,5483 \cdot 10^6$	
От оси № 8 до оси № 10 [From axis No. 8 to axis No. 10]	Парабола [Parabola] $y = 6,1614 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 3,0676 \cdot 10^2 \cdot x + 3,8235 \cdot 10^6$	Точка пересечения оси № 24 на участке от оси № 2 до оси № 23 с осью № 1 [Point of intersection of the axis No. 24 on the section from axis No. 2 to axis No. 23 with axis No. 1]
От оси № 10 до оси № 15 [From axis No. 10 to axis No. 15]	Окружность радиусом 26,5 м [Circle with a radius of 26.5 m]	

Верхняя отметка оболочки составляет 20,5 м, нижняя – 4,5 м. От разбивочной оси № 5 в сторону оси № 4 нижняя грань оболочки покрытия ограничена цилиндрической поверхностью радиусом 132 м.

Для определения математических зависимостей, позволяющих описать конструктивную форму

покрытия, выполнен переход от архитектурной формы оболочки покрытия к поверхности, повторяющей эту оболочку, но проходящей через центральные оси несущих конструкций покрытия.

На полученной поверхности по радиальным разбивочным осям проведены сечения (рис. 9).

Сечения оболочки покрытия представляют собой эллипсы, математические уравнения для которых сведены в табл. 2. Этими зависимостями описываются центральные оси арок покрытия.

По аркам запроектирован распределительный контур. Элементы контура лежат в плоскости, отклоненной от горизонтальной оси в плане на 10° и от вертикали на 20° , и проходят по линии

пересечения этой плоскости с плоскостью оболочки (рис. 10).

С боковых сторон по осям № 5–9 и 16–20 здание имеет пространственные выступы. Максимальная отметка выступов +16,5 м. Покрытие и боковая часть выступов образованы изогнутыми цилиндрическими поверхностями радиусом 34 и 11 м соответственно (рис. 11).

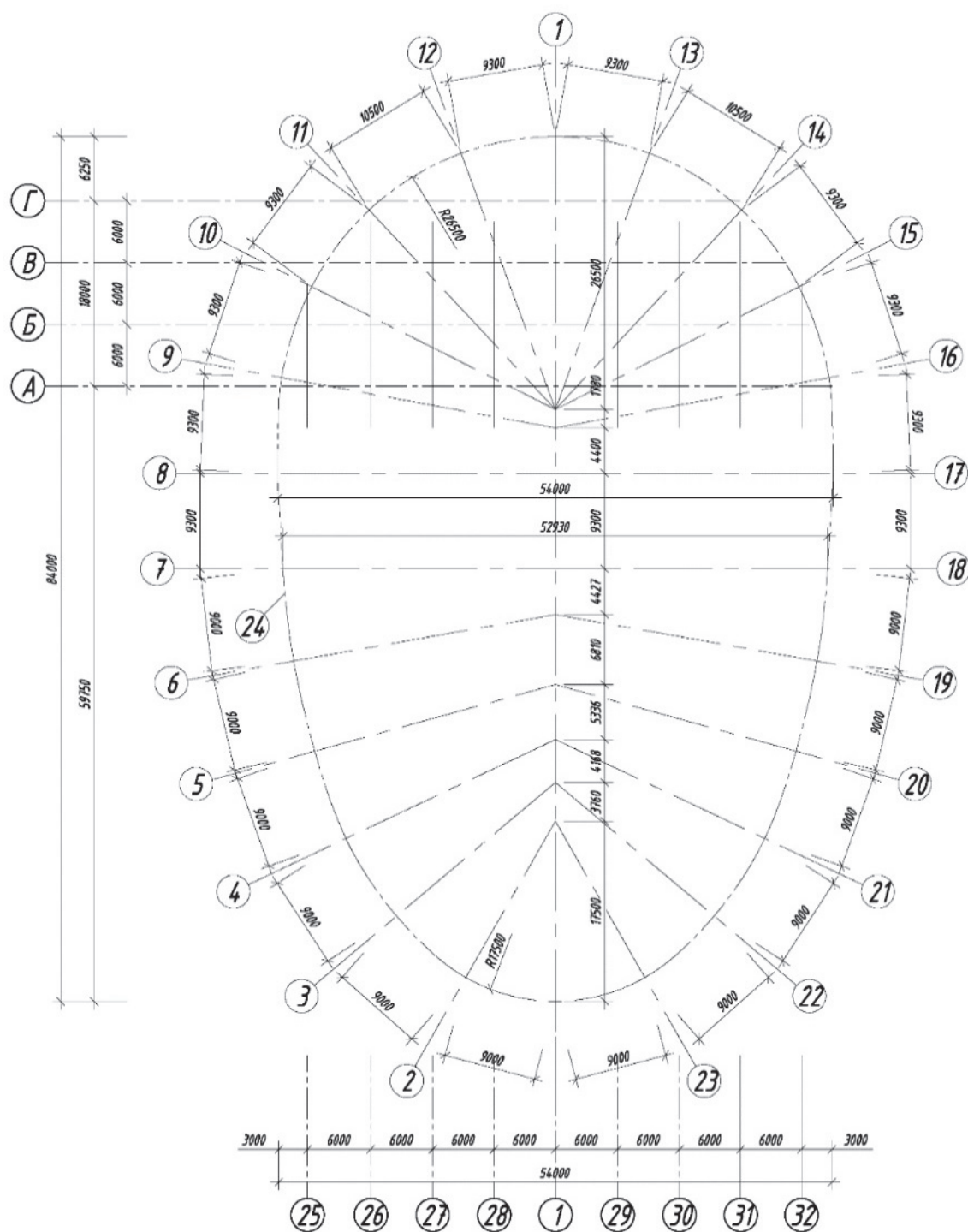


Рис. 8. Схема разбивочной сети
[Figure 8. The layout of the mark out network]

Таблица 2

Уравнения центральных осей арок
 [Table 2. Equations of the central axes of arches]

№ арки (совпадает с номером разбивочной оси, на которой расположена арка) [Arch number (coincides with the number of the centering axis on which the arch is located)]	Уравнение эллипса [The ellipse equation]: $\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$, где a, b – полуоси эллипса, мм [where a, b – semi-axes of the ellipse, mm]
1 (от оси № 7 в сторону оси № 6) [1 (from the axis No. 7 towards the axis No. 6)]	$\frac{x}{42840} + \frac{y}{11668} = 1$
1 (от оси № 7 в сторону оси № 8) [1 (from the axis No. 7 towards the axis No. 8)]	$\frac{x}{42840} + \frac{y}{14040} = 1$
2	$\frac{x}{30000} + \frac{y}{10869} = 1$
3	$\frac{x}{25000} + \frac{y}{11718} = 1$
4	$\frac{x}{23344} + \frac{y}{12850} = 1$
5	$\frac{x}{25101} + \frac{y}{13631} = 1$
6	$\frac{x}{26664} + \frac{y}{13978} = 1$
7	$\frac{x}{27306} + \frac{y}{14040} = 1$
8	$\frac{x}{27840} + \frac{y}{13705} = 1$
9	$\frac{x}{35000} + \frac{y}{13586} = 1$
10, 11, 12	$\frac{x}{42840} + \frac{y}{14040} = 1$

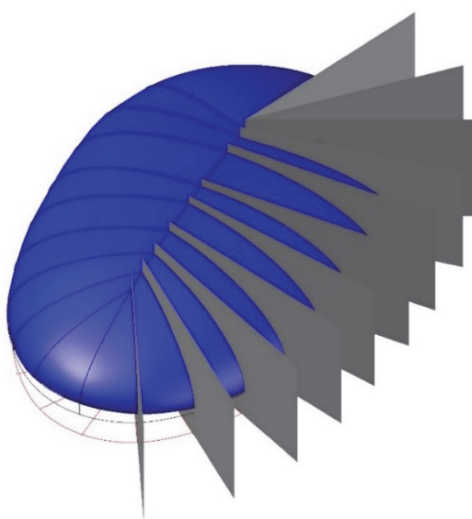


Рис. 9. Построение осей арок покрытия
 [Figure 9. Construction of axes of shell arches]

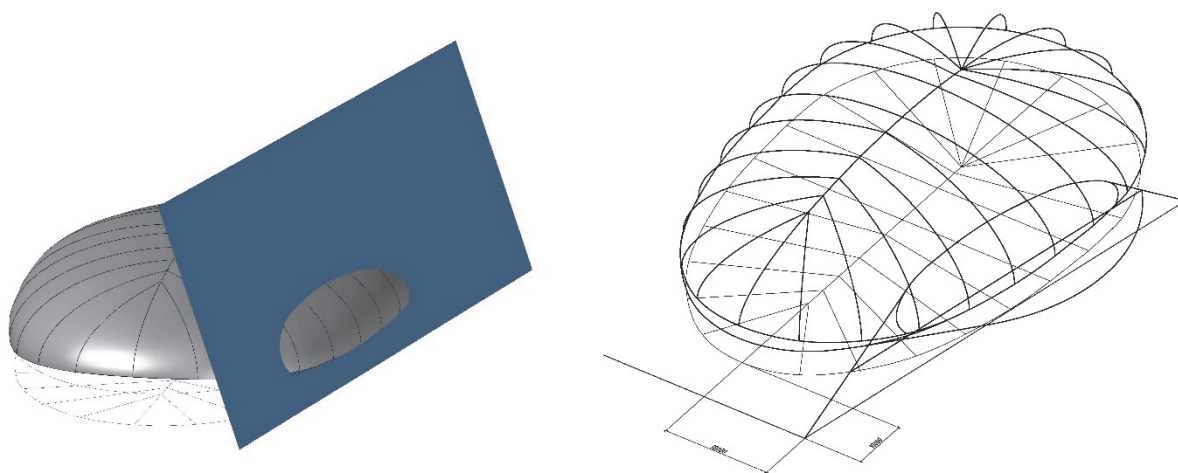


Рис. 10. Построение распределительного контура
[Figure 10. Construction of the distribution contour]

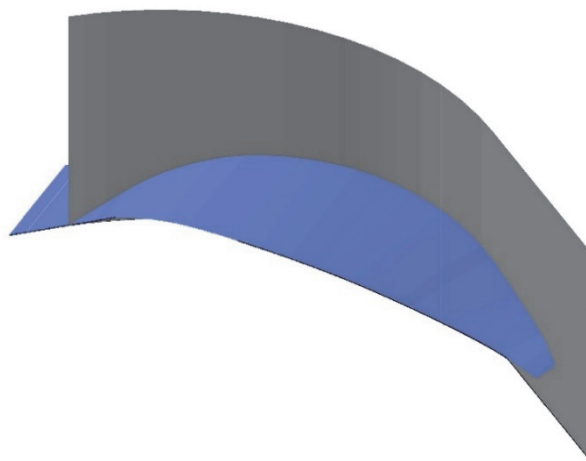


Рис. 11. Построение боковых выступов
[Figure 11. Construction of side ledges]

Точки примыкания боковых выступов к несущим элементам оболочки связаны распределительным элементом. Для обеспечения пространственной жесткости выступов по их крайним точкам предусмотрен окаймляющий элемент.

В плане боковые выступы ограничены: от разбивочной оси № 5 до точки примыкания окаймляющего выступ элемента к распределительному элементу – окружностью радиусом 30 921 мм, от разбивочной оси № 5 до оси № 3 – прямой, описываемой уравнением:

$$y = -1,1894 \cdot x - 1,1378 \cdot 10^4.$$

Данная прямая является касательной к нижнему кольцу оболочки покрытия в точке его пересечения с разбивочной осью № 5, а также каса-

тельной к окружности, ограничивающей выступ в плане. За начало координат принята точка пересечения разбивочной оси № 24 на участке от оси № 2 до № 23 с осью № 1.

Восприятие распора от полуарок

Система поперечных и продольных несущих арок, подобно купольной системе, является распорной. В купольных системах полуарки опираются на нижнее кольцо, которое воспринимает распорные усилия полуарок [1–5]. При проектировании дельфинария принято опирание полуарок на компрессионное кольцо. Компрессионное кольцо, аналогично нижнему кольцу купольных систем, связывает полуарки и колонны, воспринимает распор

от полуарок и распределяет усилия по колоннам. При этом на фундамент передаются преимущественно вертикальные нагрузки, что значительно снижает его размеры в плане.

Расположение центральных осей элементов каркаса дельфинария представлено на рис. 12. Маркировка несущих элементов каркаса дельфинария отражена на рис. 13.

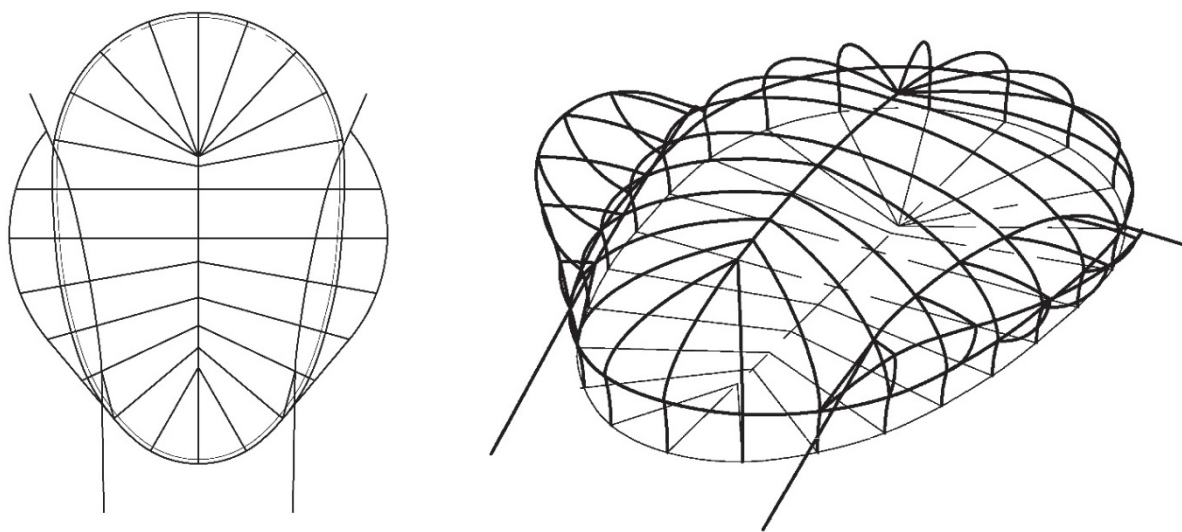


Рис. 12. Центральные оси элементов каркаса
[Figure 12. The central axes of the frame elements]

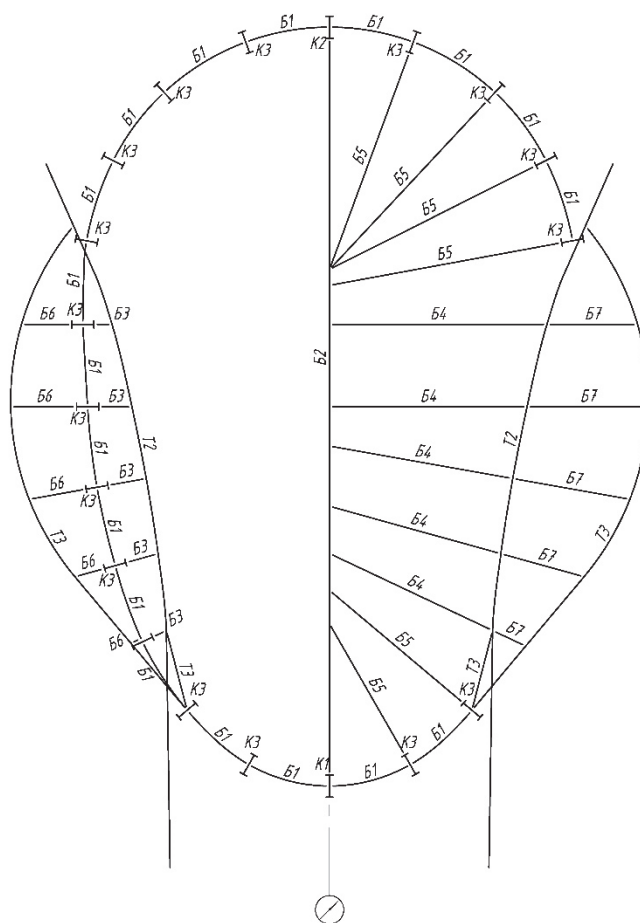


Рис. 13. Маркировка несущих элементов каркаса
[Figure 13. Marking of load-bearing frame elements]

Мероприятия по уменьшению высоты сечения несущих конструкций

Снижение высоты сечения несущих конструкций достигается следующими мероприятиями:

- установкой внешних поддерживающих арок;
- устройством распорной системы в виде распределительного контура по аркам;
- устройством жесткой связевой решетчатой системы в виде распределительного контура в верхнем участке поверхности арок;
- устройством разгружающей вантовой системы от внешних арок к центральной арке здания и распределительному контуру по аркам, окаймляющим контур выступов.

Устройство поддерживающей вантовой системы позволило не только уменьшить высоту сечений несущих конструкций, но и увеличить пространственную жесткость сооружения [6; 10; 19; 20]. Таким образом, при проектировании реализуется комбинированная вантово-арочная система [19; 20].

Применение комбинированной вантово-арочной системы также способствовало реализации единого внутреннего пространства дельфинария без установки промежуточных поддерживающих колонн.

Определение оптимальных значений предварительного натяжения вантовых элементов

Перед определением оптимальных значений предварительного натяжения оттяжек выполнено определение наиболее рационального расположения вант в системе с целью предотвращения выключения их из работы и обеспечения эффективности их работы.

Рассмотренные схемы вантовой системы представлены на рис. 14.

Принятая схема вантовой системы по центральной арке, распределительному контуру по полуар-

кам и по окаймляющему контуру выступов, а также твердотельная пространственная модель расчетной схемы здания отображены на рис. 15.

Для определения необходимых усилий предварительного натяжения оттяжек произведено исследование влияния этих усилий на прогибы (вертикальные и горизонтальные) конструкций.

Требования к величине прогибов установлены в приложении Е СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

В качестве исходных данных приняты усилия, возникающие в оттяжках без предварительного натяжения. Для анализа и определения оптимальных усилий предварительного натяжения рассмотрено 5 вариантов, где они принимались в процентах от усилия в них без предварительного натяжения: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%.

Для создания линейки моделей для численных экспериментов применялся метод математического планирования экспериментов.

Моделирование здания выполнено в программно-вычислительном комплексе «ЛИРА-САПР». Комплекс реализует метод конечных элементов в перемещениях и позволяет определить внутренние усилия в элементах конструкций от статических и динамических нагрузок, а также от наиболее невыгодных комбинаций внешних воздействий.

Расчет выполнен на невыгодное сочетание нагрузок. Определение характера и сбор ветровой нагрузки выполнены с учетом требований действующих норм и аэродинамики подобных сооружений [21–23].

Определены вертикальные и горизонтальные прогибы элементов, поддерживаемых вантами (центральная арка и окаймляющий контур выступов). Значения этих перемещений сведены в табл. 3.

По данным табл. 3 построены графики зависимостей перемещений от предварительного натяжения в вантах, которые представлены на рис. 16 и 17.

Таблица 3

Вертикальные и горизонтальные прогибы
[Table 3. Vertical and horizontal deflections]

Предварительное натяжение, доли от действующего усилия [Pre-tension, the proportion of the acting force]	Вертикальное перемещение центральной арки, мм [Vertical displacement of the central arch, mm]	Вертикальное перемещение окаймляющего контура выступа, мм [Vertical displacement of the fringing contour of the protrusion, mm]	Горизонтальное перемещение центральной арки, мм [Horizontal displacement of the central arch, mm]	Горизонтальное перемещение окаймляющего контура выступа, мм [Horizontal displacement of the fringing contour of the protrusion, mm]
0,05	57,15	58,05	50,38	73,05
0,10	47,03	34,55	31,83	45,07
0,15	54,89	57,17	50,58	72,26
0,20	45,35	33,76	31,75	44,24
0,25	57,18	53,47	50,82	72,25

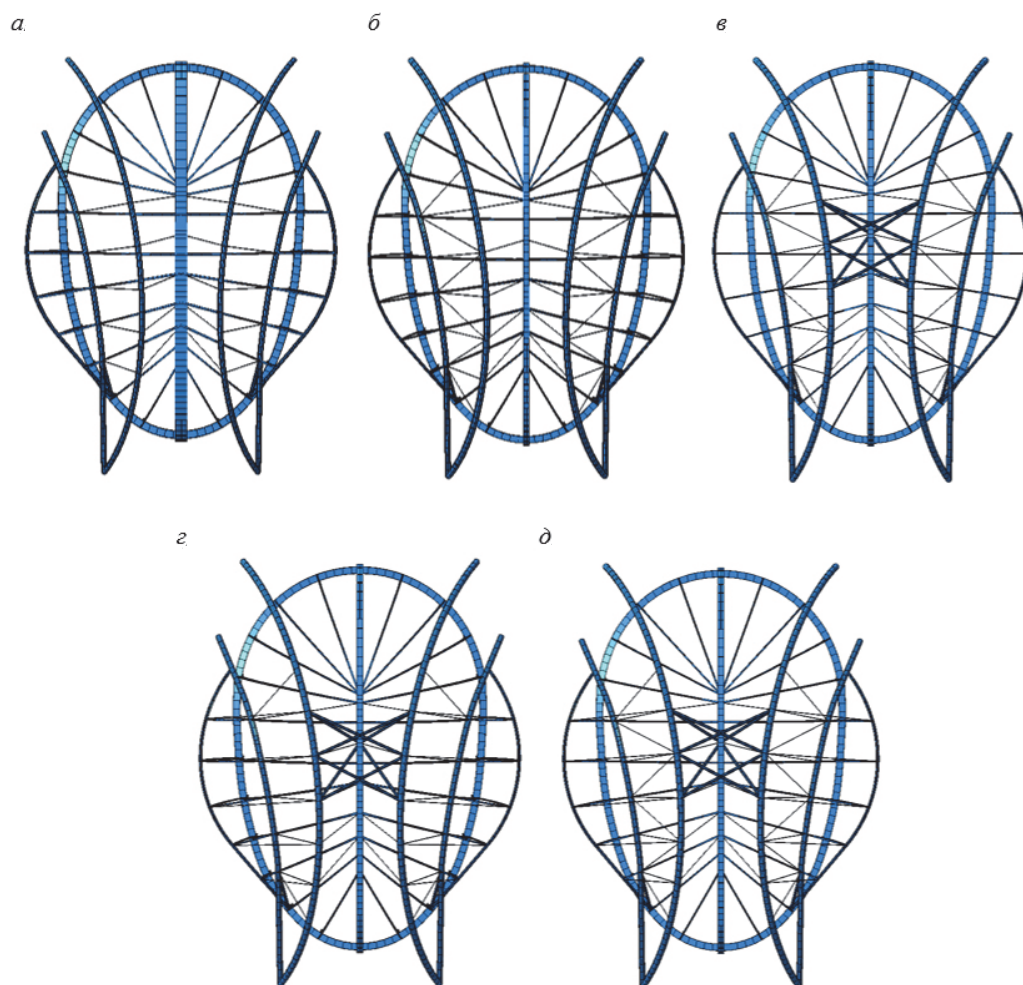


Рис. 14. Схемы вантовой системы:

a – радиальное расположение вант по центральной арке и распределительному контуру; *б* – радиальное расположение вант по центральной арке и перекрестное расположение вант по распределительному контуру; *в* – то же со связевой системой по несущим аркам вантовой системы; *г* – радиальное расположение вант по центральной арке, распределительному и окаймляющему контурам; *д* – радиальное расположение вант по центральной арке и окаймляющему контуру и перекрестное расположение вант по распределительному контуру

[Figure 14. Model of cable-stayed system:

a – radial arrangement of cables on the central arch and distribution edge; *б* – radial arrangement of cables on the central arch and cross-location of cables on the distribution edge; *в* – the same with the link system on the bearing arches of the cable system; *г* – radial arrangement of cables on the central arch, distributing and fringing contours; *д* – radial arrangement of cables on the central arch and bordering the contour and cross-location of cables on the distribution loop]

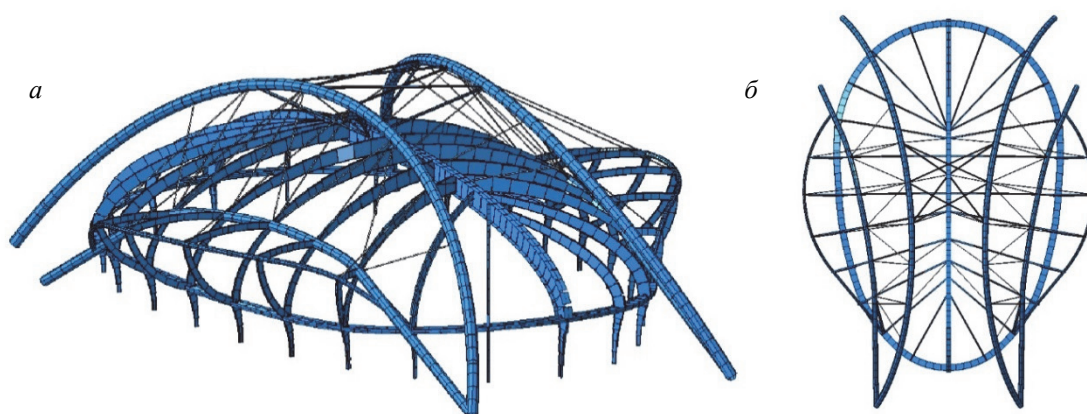


Рис. 15. Твёрдотельная модель расчетной схемы конструкции здания (а) и схема вантовой системы (б)

[Figure 15. Solid-state model of the design scheme of the building structure(a) and the scheme of the cable-stayed system (б)]

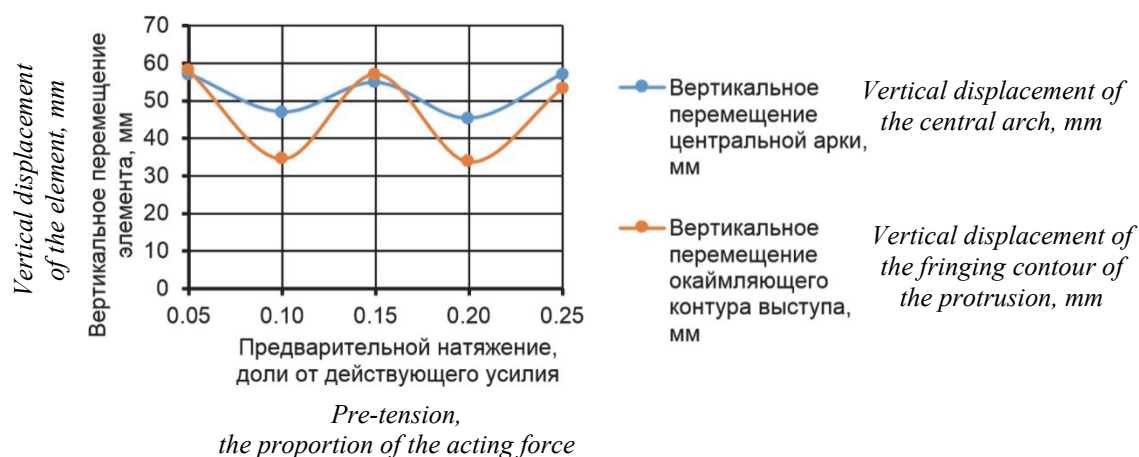


Рис. 16. Влияние предварительного натяжения вант на вертикальные перемещения элементов
[Figure 16. Effect of pre-tensioning the cables to the vertical displacement of the elements]

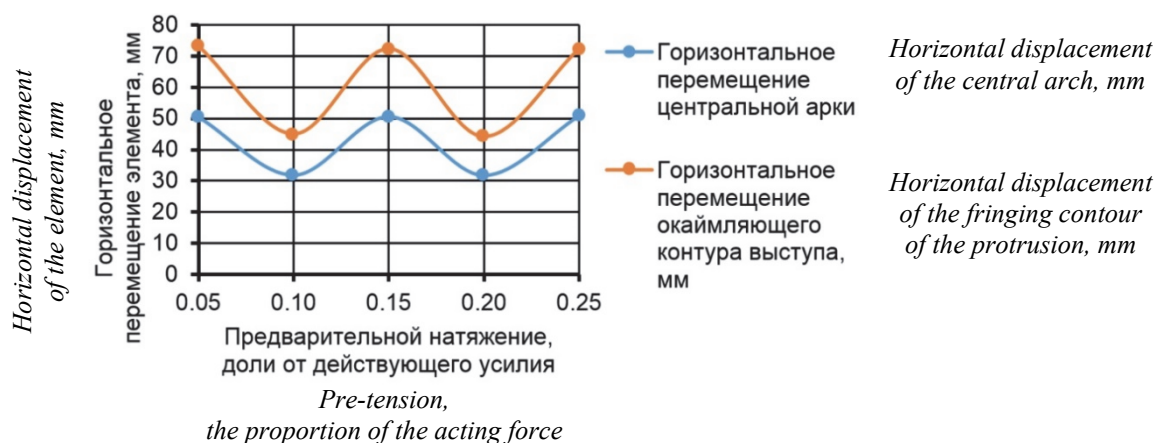


Рис. 17. Влияние предварительного натяжения вант на горизонтальные перемещения элементов
[Figure 17. Effect of the pre-tensioning the cables on the horizontal displacement of the elements]

Из графиков следует, что зависимость величины перемещений от предварительного натяжения в оттяжках носит нелинейный синусоидальный характер. Это объясняется конструктивной системой здания, принятым расположением вантовых элементов, совместной работой конструкций здания под нагрузкой. Анализируя графики на рис. 15 и 16, получаем, что наиболее рациональным по критериям минимальных затрат на устройство предварительного натяжения и повышения жесткости конструкции является предварительное натяжения в вантовом элементе, равное 10% от предварительного усилия в нем. При данных значениях прогибы в конструкциях минимальны и удовлетворяют требованиям действующих норм.

Влияние величины предварительного напряжения в вантах на вертикальные перемещения элементов может быть аппроксимировано зависимостями вида:

– для центральной арки:

$$y = 494333,00x^4 - 294340,00x^3 + 61002,00x^2 - 5128,70x + 194,78;$$

– для окаймляющего контура выступа:

$$y = 1208666,67x^4 - 727200,00x^3 + 151842,33x^2 - 12786,60x + 401,12.$$

Влияние величины преднапряжения в вантах на горизонтальные перемещения элементов может быть аппроксимировано зависимостями вида:

– для центральной арки:

$$y = 1002400,00x^4 - 601040,00x^3 + 125122,00x^2 - 10500,60x + 331,47;$$

- для окаймляющего контура выступа:

$$y = 1477466,67x^4 - 885906,67x^3 + 184464,33x^2 - 15496,13x + 488,20.$$

Результаты исследования влияния предварительного натяжения на деформации конструкций:

- выявлено, что перемещения окаймляющего контура выступа более восприимчивы к изменению величины предварительного натяжения в оттяжках;
- получены качественные и количественные характеристики зависимостей, представленных на графиках;
- отражены зависимости влияния предварительного напряжения оттяжек на прогибы элементов;
- определены оптимальные значения предварительного натяжения вант при соблюдении требований второй группы предельных состояний для поддерживаемых оттяжками конструкций.

Выводы

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

- Достигнута поставленная цель: разработана конструктивная форма, способная воплотить архитектурную идею.
- Представлены количественные и качественные характеристики, позволяющие описать архитектурную и конструктивную формы здания. Любая архитектурная форма должна быть описана аналитическими зависимостями, только тогда она может быть конструктивно проработана.
- Формализованы методики реализации архитектурной формы несущими большепролетными конструкциями.
- Для разработки здания с конструкциями минимальной материалоемкости выполнено регулирование усилий в элементах здания путем применения соответствующих несущих конструкций и эффективных конструктивных мероприятий.
- Определено оптимальное расположение вантовых элементов, способствующее уменьшению деформаций и сечений элементов, а также увеличивающее пространственную жесткость и устойчивость конструкции.
- Исследовано влияние величины предварительного натяжения в вантовых элементах на деформации конструкций. По результатам этого исследования определено, что минимальными необходимыми значениями предварительного натяжения являются усилия, равные 10% от предварительного усилия в вантах.

• Разработанная конструкция здания дельфинария в г. Волгограде является многократно статически неопределимой системой. В случае, если выключится один элемент, произойдет перераспределение усилий и конструкция продолжит нести нагрузку, что способствует выполнению требований об обеспечении механической и конструкционной безопасности [Федеральный закон № 384-ФЗ].

© Ситников И.Р., Голиков А.В., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Список литературы

1. Кузнецов В.В. Справочник проектировщика: металлические конструкции. Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 1998. 512 с.
2. Горев В.В. Металлические конструкции. Т. 2: Конструкции зданий. М.: Высшая школа, 2002. 528 с.
3. Беленя Е.И. Металлические конструкции: общий курс. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.
4. Мельников Н.П. Справочник проектировщика: металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1980. 776 с.
5. Канчели В.Н. Строительные пространственные конструкции: учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 2003. 112 с.
6. Еремеев П.Г. Металлические пространственные конструкции уникальных большепролетных сооружений в России // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 9–14.
7. Еремеев П.Г. Разработка, исследование, проектирование и возведение большепролетных металлических конструкций уникальных зданий и сооружений // Вестник НИЦ «Строительство». 2009. № 1. С. 107–122.
8. Душкевич К.Н., Суслова О.Ю. Современные большепролетные конструкции // Наука, образование и экспериментальное проектирование: тезисы докладов Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. 7–14 апреля 2014 г. М.: МАРХИ, 2014. С. 385–386.
9. Сысоева Е.В. Научные подходы к расчету и проектированию большепролетных конструкций // Вестник МГСУ. 2017. № 2 (101). С. 131–141.
10. Гришанович А.И. Варианты применения уникальных конструкций покрытия для большепролетных спортивных сооружений // Градостроительство, инфраструктура, коммуникации. 2016. № 2 (3). С. 45–51.
11. Cai J., Feng J., Jiang Ch. Development and analysis of a long-span retractable roof structure // Journal of Constructional Steel Research. 2014. No. 92. Pp. 175–182.
12. Buhanan P. Renzo Piano Building Workshop. Vol. 3. Phaidon, 2000. 240 p.
13. Makowski Z.S. Analysis, Design and Construction of Braced Domes. Granada, University of Surrey, UK, 1984.
14. Ballio G., Mazzolani F.M. Theory and Design of Steel Structures. Taylor & Francis, 2008. 576 p.
15. McCormac J.C., Csernak S.F. Structural steel design. Fifth edition. Pearson Education Limited, 2012. 723 p.

16. Barnes M., Dickson M. Widespan roof structures. London: Thomas Telford Publishing Ltd., 2000. 328 p.
17. John F. Abel. The future of spatial structures // Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures. Brentwood, UK: Multi Science Publishing Co Ltd., 2011. Pp. 485–490.
18. Chilton J. Space Grid Structures. Architectural Press, 2000. 191 p.
19. Еремеев П.Г., Киселев Д.Б. Современные арочно-вантовые комбинированные конструкции // Монтажные и специальные работы в строительстве. № 9. 2005. С. 11–16.
20. Демченко А.И. Вантовые конструкции // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова 2014 г. Белгород: Изд-во БГТУ им. Шухова, 2014. С. 199–202.
21. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
22. Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhães F., Cunha A. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response // Engineering Structures. 2014. No. 59. Pp. 80–94.
23. Ding Zh., Tamura Y. Contributions of wind-induced overall and local behaviors for internal forces in cladding support components of large-span roof structure // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2013. No. 115. Pp. 162–172.

Об авторах

Ситников Иван Романович – магистрант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет. *Область научных интересов:* строительные конструкции, металлические конструкции, проектирование большепролетных и преднапряженных конструкций. *Контактная информация:* e-mail – sitnikovir11@gmail.com.

Голиков Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет. *Область научных интересов:* строительные конструкции, металлические конструкции, проектирование большепролетных, башенных, листовых и предварительно напряженных конструкций, надежность строительных конструкций. *Контактная информация:* e-mail – alexandr_golikov@mail.ru.

Для цитирования

Ситников И.Р., Голиков А.В. Регулирование усилий в большепролетных конструкциях при разработке рациональной конструктивной формы здания дельфинария в Волгограде // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 278–292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292.

SCIENTIFIC ARTICLE

Adjustment of forces in large-span structures in the design of a rational constructive form of a Dolphinarium in Volgograd

Ivan R. Sitnikov, Alexander V. Golikov*

Volgograd State Technical University
28 Lenin Avenue, Volgograd, 400131, Russian Federation

*Corresponding author

(received: April 10, 2018; accepted: July 13, 2018)

Abstract. In some cases, architectural, technological or other special requirements dictate the development of buildings and structures with large spans of shells. The choice of the scheme of bearing structures depends on the size of the span, architectural and planning solutions, the shape of the building in plan, the height of the structure, the presence and type of suspended transport, the requirements for the rigidity of the shell, the nature of lighting and aeration, type of roof, size and distribution of loads, the need to accommodate large masses of people and other factors. Differences in the purpose of large-span buildings and structures, features of technological processes, architectural and aesthetic requirements determine the use of a variety of solutions of such coatings.

The article presents design measures for the implementation of architectural and artistic solutions of the building of the Dolphinarium in Volgograd. Analytical description of complex architectural and structural forms is performed. The analysis of existing structural forms of large-span structures is given. In the design, the concept of a combined arch-cable system was implemented, in which the cable system acts as an unloading and supporting system. The study of the work under load of various schemes of the cable system. It was also investigated the influence of pre-tensioning braces on strain supported their designs, and from what was determined optimal value of the efforts of the cables tension.

Keywords: design, metal structures, large span structures, arched structures, cable-stayed structures, pre-tensioning

References

1. Kuznecov V.V. (1998). *Spravochnik proektirovshhika. Metallicheskie konstrukcii*. Tom 2. Stal'nye konstrukcii zdaniy i sooruzhenij [Directory of the designer. Metal construction. Volume 2. Steel structures of buildings and structures]. Moscow, ASV Publ., 512. (In Russ.)
2. Gorev V.V. (2002). *Metallicheskie konstrukcii*. Tom 2. Konstrukcii zdaniy [Metal construction. Volume 2. Building structure]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 528. (In Russ.)
3. Belenja E.I. (1986). *Metallicheskie konstrukcii. Obshhij kurs [Metal construction. General course]*. Moscow, Strojizdat Publ., 560. (In Russ.)
4. Mel'nikov N.P. (1980). *Spravochnik proektirovshhika. Metallicheskie konstrukcii [Directory of the designer. Metal construction]*. Moscow, Strojizdat Publ., 776. (In Russ.)
5. Kancheli V.N. (2003). *Stroitel'nye prostranstvennye konstrukcii*. Uchebnoe posobie [Building spatial constructions. A tutorial]. Moscow, ASV Publ., 112. (In Russ.)
6. Eremeev P.G. (2013). Metal spatial constructions of unique large-span structures in Russia. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]*, (10), 9–14. (In Russ.)
7. Eremeev P.G. (2009). Razrabotka, issledovanie, proektirovanie i vozvedenie bol'sheproletnykh metallicheskih konstrukcij unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij [Development, research, design and construction of large-span metal structures of unique buildings and structures]. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*, (1), 107–122. (In Russ.)
8. Dushkevich K.N., Suslova O.Ju. (2014). Sovremennye bol'sheproletnye konstrukcii [Modern large-span structures]. Nauka, obrazovanie i jeksperimental'noe proektirovanie. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, molodykh uchenykh i studentov, 7–14 aprelya*. [Science, education and experimental design. Theses of the International scientific research conference of professorial teaching staff, young researchers and students, 7–14 April]. Moscow, MARHI Publ., 385–386. (In Russ.)
9. Sysoeva E.V. (2017). Scientific approaches to the calculation and design of large-span structures. *Vestnik MGSU*, (2), 131–141. (In Russ.)
10. Grishanovich A.I. (2016). Varianty primeneniya unikal'nykh konstrukcij pokrytiya dlya bol'sheproletnykh sportivnykh sooruzhenij [Options for the use of unique coating designs for large-span sports facilities]. *Gradostroitel'stvo, infrastruktura, kommunikacii*, (2), 45–51. (In Russ.)
11. Cai J., Feng J., Jiang Ch. (2014). Development and analysis of a long-span retractable roof structure. *Journal of Constructional Steel Research*, (92), 175–182.
12. Buchanan P. (2000). *Renzo Piano Building Workshop*. Volume 3. Phaidon, 240.
13. Makowski Z.S. (1984). *Analysis, Design and Construction of Braced Domes*. Granada, University of Surrey, UK.
14. Ballio G., Mazzolani F.M. (2008). *Theory and Design of Steel Structures*. Taylor & Francis, 576.
15. McCormac J.C., Csernak S.F. (2012). *Structural steel design. Fifth edition*. Pearson Education Limited, 723.
16. Barnes M., Dickson M. (2000). *Widespan roof structures*. London, Thomas Telford Publishing Ltd., 328.
17. John F. Abel. (2011). The future of spatial structures. *Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures*. Brentwood, UK, Multi Science Publishing Co Ltd., 485–490.
18. Chilton J. (2000). *Space Grid Structures*. Architectural Press, 191.
19. Eremeev P.G., Kiselev D.B. (2005). Sovremennye arochno-vantovye kombinirovannye konstrukcii [Modern arch-cable-stayed combined constructions]. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve [Assembly and special works in construction]*, (9), 11–16. (In Russ.)
20. Demchenko A.I. (2014). Vantovye konstrukcii [Cable-stayed structures]. *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova [International scientific conference of Shukhov BSTU young scientists]*. Belgorod, Shukhov BSTU Publ., 199–202. (In Russ.)
21. Simiu Je., Skanlan R. (1984). *Vozdejstvie vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind impact on buildings and structures]*. Moscow, Strojizdat Publ., 360. (In Russ.)
22. Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhães F., Cunha Á. (2014). Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response. *Engineering Structures*, (59), 80–94.
23. Ding Zh., Tamura Y. (2013). Contributions of wind-induced overall and local behaviors for internal forces in cladding support components of large-span roof structure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (115), 162–172.

About the authors

Ivan R. Sitnikov – Master's Degree Student of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures, Volgograd State Technical University. *Research interests*: building structures, metal structures, design of large-span and prestressed structures. *Contact*: e-mail – sitnikovir11@gmail.com.

Alexander V. Golikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures, Volgograd State Technical University. *Research interests*: building structures, metal structures, design of large-span, tower, sheet and prestressed structures, reliability of building structures. *Contact*: e-mail – alexandr_golikov@mail.ru.

For citation

Sitnikov I.R., Golikov A.V. (2018). Adjustment of forces in large-span structures in the design of a rational constructive form of a Dolphinarium in Volgograd. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*, 14(4), 278–292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292. (In Russ.)