

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110
УДК 69.04(07)(624)

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Напряженно-деформированное состояние цилиндро-плитно-вантового покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура

Э.Р. Кужахметова

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Российская Федерация, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14
elja_09@bk.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 11 января 2020 г.
Доработана: 05 марта 2020 г.
Принята к публикации: 12 марта 2020 г.

Аннотация

Актуальность. Представлена новая волнообразная комбинированная (комплексная) конструкция покрытия для большепролетных зданий – цилиндрично-плитно-вантовое покрытие (ЦПВ), объединяющее в себе три вида конструкций: цилиндрическую оболочку нулевой гауссовой кривизны, плоского и вантового (висячего) покрытий. Данное сочетание конструкций и материалов для покрытия больших площадей выбрано не случайно. Вант (гибкая нить) работает только на растяжение всем своим сечением, а цилиндрическая оболочка и плита работают в двух (продольной и поперечной) плоскостях. В комплексе при действии внешних воздействий они создают необходимую проектную прочность, учитывая при этом рациональный выбор материалов (стали и железобетона). Предложены новые архитектурно-конструктивные решения большепролетного здания с цилиндрично-плитно-вантовым покрытием, учитывающие разные геометрические формы наружного (внешнего) безанкерного опорного контура (наружная опора) в виде полуокружности, полуэллипса и др. **Цель исследования** – проанализировать влияние наружного (внешнего) безанкерного опорного контура (полуокружности, полуэллипса и других форм) на пространственную работу внутренних сил в комбинированном ЦПВ-покрытии большепролетного здания (сооружения). **Методы.** Статический численный анализ пространственных моделей большепролетных зданий с разными видами наружного опорного контура в ЦПВ-покрытии выполнен в программном комплексе FEMAP with NX NASTRAN. Данный комплекс относится к классу CAE, реализующему метод конечных элементов и позволяющему учитывать физическую и геометрическую нелинейность деформирования конструкций. **Результаты.** В расчетном исследовании выполнен сравнительно-численный анализ напряженно-деформированного состояния комплексного ЦПВ-покрытия с разными очертаниями опорных контуров на действие вертикальных нагрузок, определяющий рациональный их выбор с учетом общих затрат и полезной площади здания. Результаты расчета большепролетных зданий с ЦПВ-покрытием на горизонтальную (ветровую) нагрузку с учетом определения аэродинамических коэффициентов предполагается опубликовать в следующей статье.

Ключевые слова: гибкая нить, вант, вантовое (висячее) покрытие, висячая система, комбинированное (комплексное) покрытие большепролетного здания (сооружения), цилиндрично-плитно-вантовое покрытие здания (сооружения), наружная опора, наружный опорный контур вантового покрытия, безанкерная опора, внутренняя металлическая опора

Для цитирования

Кужахметова Э.Р. Напряженно-деформированное состояние цилиндрично-плитно-вантового покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 95–110. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110>

Введение

Проектирование и строительство большепролетных зданий и сооружений зрелищного, спортив-

ного и торгового назначения является важным и ответственным делом для любого архитектора и инженера. Уникальные здания и сооружения с неповторимыми архитектурными образами – это своего рода визитные карточки любого города, поскольку они отражают его неповторимую культуру, обычаи и традиции. По сей день особое внимание архитекторов и инженеров привлекают такие покрытия, как купольные, цилиндрические и вантовые. Имен-

Кужахметова Эльвира Рафаэлевна, аспирант, инженер ПГС, старший преподаватель Инженерно-технического института; eLIBRARY SPIN-код: 1949-1140, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0907-786X>.

© Кужахметова Э.Р., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

но эти покрытия позволяют рационально перекрывать большие площади зданий и сооружений, создавая при этом привлекательные архитектурные образы и украшая внешний облик города.

В пространственных (купольных и цилиндрических) тонкостенных покрытиях, благодаря работе конструкции в плане в обоих направлениях, достигается лучшее использование материалов, их существенная экономия и значительное уменьшение массы в сравнении с плоскими покрытиями [1–5]. Недостатком же является ограничение в перекрываемых площадях.

Особое внимание заслуживают здания и сооружения с вантовым (висячим) покрытием [1; 6–14], поскольку они, в отличие от купольных и цилиндрических покрытий, позволяют перекрывать площади зданий (сооружений) значительно больших размеров без экономических потерь, при этом просты в изготовлении, монтаже и эксплуатации. Однако с увеличением площади вантового покрытия, соответственно, увеличиваются и опорные усилия в вантах (гибких нитях), которые передаются наружной опоре, в таком случае необходимо увеличивать жесткостные параметры наружного опорного контура.

Проанализировав достоинства и недостатки вышперечисленных покрытий большепролетных зданий и зная особенности их пространственной работы, можно создавать новые виды конструкций покрытия путем их сочетания. Речь, в частности, идет о новом цилиндро-плитно-вантовом (ЦПВ) покрытии для большепролетного здания. Оно представляет собой сложную комбинированную конструкцию в виде «волны», форму которой можно изменять, обеспечивая при этом изменение эстетичного вида самого здания [14]. ЦПВ-покрытие представляет собой единый комплекс, состоящий из трех разных видов покрытий: цилиндрического, плитного и вантового. При этом эффективность и внешний вид конструкции ЦПВ-покрытия во многом определяются также и формой наружной опоры вантового покрытия (рис. 1). Одним концом ванты крепятся к наружной опоре, которая представляет собой контурную конструкцию, работающую преимущественно на сжатие, поэтому ее рационально проектировать из бетона и железобетона. А другим концом – к внутренней опоре, концы которой жестко заделаны в плиту плоского покрытия. Внутренняя опора вантового покрытия работает только на растяжение. Материалом для нее может служить исключительно сталь. Крепление вант к наружной и внутренней опорам выполняется, как правило, в виде шарнира [15; 16].

Схема расположения вант в вантовом покрытии может быть разной, например, радиальной, веерной,

параллельной (продольной и поперечной), перекрестной и др. [17]. Следует отметить, что изменение архитектурных форм наружной опоры и схемы расположения вант оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) всей комплексной конструкции ЦПВ-покрытия.

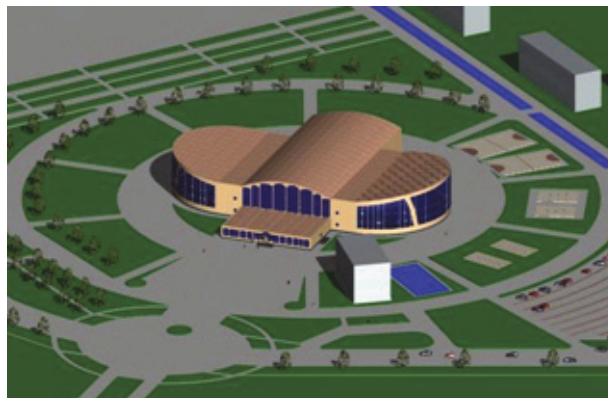


Рис. 1. Большепролетное здание с цилиндро-плитно-вантовым покрытием
[Figure 1. Large-span building with a cylinder-plate-cable-stayed roof]

1. Описание большепролетного здания с цилиндро-плитно-вантовым покрытием

ЦПВ-покрытие состоит из крайних блоков – помещений с вантовым покрытием и срединной (центральной) частью, выполненной в виде цилиндрической оболочки нулевой гауссовой кривизны. Объединяющим участком двух частей служит плита плоского покрытия (рис. 1).

По конструктивному решению плита плоского покрытия, работая совместно с диафрагмами жесткости (лестничными клетками и лифтовыми шахтами), воспринимает внутренние усилия от цилиндрического и вантового покрытий [17]. Рассмотрим четыре варианта общественного здания с ЦПВ-покрытием, в котором наружные опорные контуры имеют разные геометрические формы с соответствующим продольным радиусом R (по оси x): а) $R_1 = 15$ м (модель 1); б) $R_2 = 30$ м (модель 2); в) $R_3 = 45$ м (модель 3); г) $R_4 = 60$ м (модель 4).

Правильный выбор параметров наружной опоры вантового покрытия позволяет рационально использовать полезную площадь здания, а также минимизировать издержки при строительстве и эксплуатации. Ванты наружного опорного контура ориентированы радиально, с основным шагом $s_1 = 2$ м. На ванты уложены железобетонные плиты покрытий, имеющие форму трапеций разного типоразмера с толщиной 0,05 м [17]. К вантам плиты крепятся с помощью фиксаторов – зажимов, представляющих собой выпуски арматурных стержней перио-

дического профиля. Зазоры, образующиеся между плитами покрытий, заполняются бетоном на расширяющемся цементе [14–17]. Провисание вант (или стрела провеса) принимается $f = 1/25L$ [6; 14–17], где L – пролет ванта, м.

Разомкнутый наружный безанкерный опорный контур представляет собой многопролетную опорную балку прямоугольного сечения высотой $h = 0,8$ м и шириной $b = 1,5$ м. Ее геометрические формы в плане представлены на рис. 2, где $R_1 = 15$ м,

$R_2 = 30$ м, $R_3 = 45$ м, $R_4 = 60$ м, $B = 6$ м, $l_2 = 40$ м, $l_1 = 108$ м, $L = 60$ м. Опорная балка (наружный опорный контур) вантового покрытия установлена на колонны высотой H , изменяющейся в пределах от 12 до 16 м, с шагом, равным 6 м. Концы наружного опорного контура жестко соединены с арматурными выпусками плитой плоского покрытия и торцевой диафрагмой (монолитной железобетонной стеной) двухэтажного помещения (рис. 1, 2).

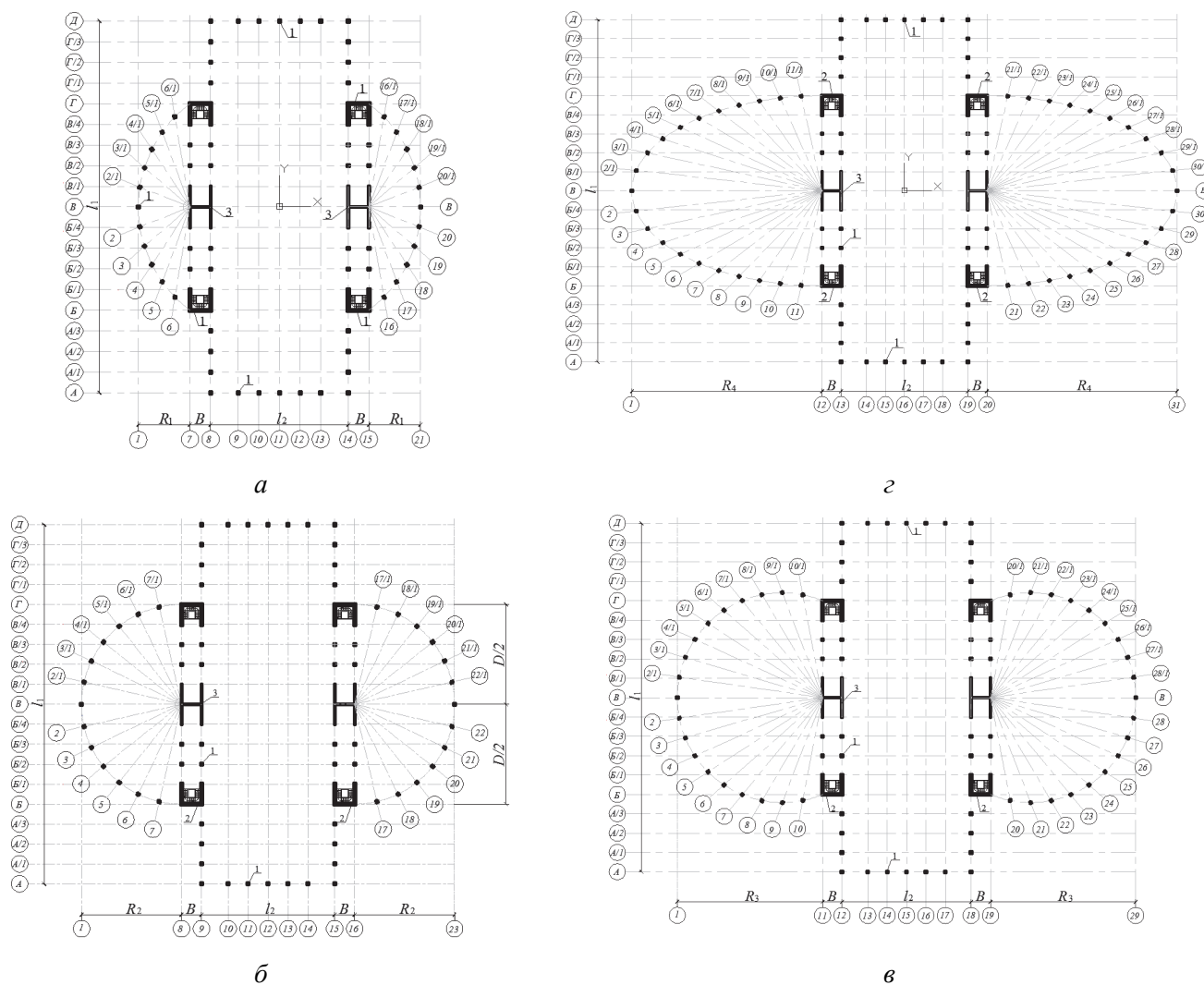


Рис. 2. Планы зданий ЦПВ-покрытий с наружными опорными контурами:
 а – $R_1 = 15$ м (модель 1); б – $R_2 = 30$ м (модель 2); в – $R_3 = 45$ м (модель 3); г – $R_4 = 60$ м (модель 4);
 1 – колонны; 2 – торцевые диафрагмы; 3 – срединные диафрагмы (продольные и поперечные)
[Figure 2. Building plans for cylinder-plate-cable-stayed roofs with external support contours:
 а – $R_1 = 15$ m (model 1); б – $R_2 = 30$ m (model 2); в – $R_3 = 45$ m (model 3); г – $R_4 = 60$ m (model 4);
 1 – columns; 2 – end diaphragms; 3 – middle diaphragms (longitudinal and transverse)]

Двухэтажное помещение объединяет области вантового покрытия и цилиндрической оболочки. Цилиндрическая оболочка является средней частью ЦПВ-покрытия. Двухэтажное помещение имеет длину $L = 60$ м, ширину $B = 6$ м и образует безригельный каркас с плитами плоского покрытия и пере-

крытия, толщина которых составляет $t = 0,2$ м. Размеры сетки железобетонных колонн 6×6 м. Колонны имеют квадратное сечение с размерами $0,5 \times 0,5$ м. Высота колонн $H_1 = 12$ м. Ширина продольных диафрагм равна 12 м, ширина поперечных и торцевых диафрагм – 6 м, толщина 0,5 м. В расчете

приняты следующие геометрические размеры: пролет $l_2 = 40$ м, длина $l_1 = 18 \times 6$ м = 108 м, высота $h = 4$ м, толщина монолитной цилиндрической оболочки $\delta = (1/200 \dots 1/300)l_2$, примем $\delta = 0,15$ м, радиус кривизны оболочки $R = 52$ м. Оболочка опирается на две железобетонные балки и торцевые арки с размерами прямоугольного сечения $b = 0,5$ м и $h = 0,8$ м [17].

2. Материалы исследования

Вант (гибкая нить): стальной канат двойной свивки типа ЛК-РО конструкции $6 \times 36 (1 + 7 + 7/7 + 14) + 1$.о.с, с модулем упругости $E = 1,47 \times 10^5$ МПа и коэффициентом поперечной деформации $\nu = 0,3$ (табл. Г.10 [18]). Вант представляет собой изогну-

тый элемент, сечение которого определяется по расчету согласно нормативной документации [15; 19].

Железобетонный каркас: армированный тяжелый бетон класса В25 с модулем упругости $E_b = 30 \times 10^3$ МПа (табл. 6.11 в [20]), модулем сдвига $G_b = 0,4$, $E_b = 0,4 \times 30 \times 10^3 = 12 \times 10^3$ МПа (п. 6.1.15 в [20]) и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,2$ (п. 6.1.17 в [20]). Расчетное сопротивление бетона для предельного состояния первой группы (сжатие осевое) $R_b = 14,5$ МПа (табл. 6.8 в [20]).

Внутренняя металлическая опора (полукольцо): сталь марки С245 по ГОСТ 27772 [21] с расчетным сопротивлением $R = 350$ МПа (табл. В.5 в [18]), модулем продольной упругости (модуль Юнга) $E = 2,1 \times 10^5$ МПа (табл. Г.10 в [18]) и коэффициентом поперечной деформации $\nu = 0,3$ (табл. Г.10 в [18]).

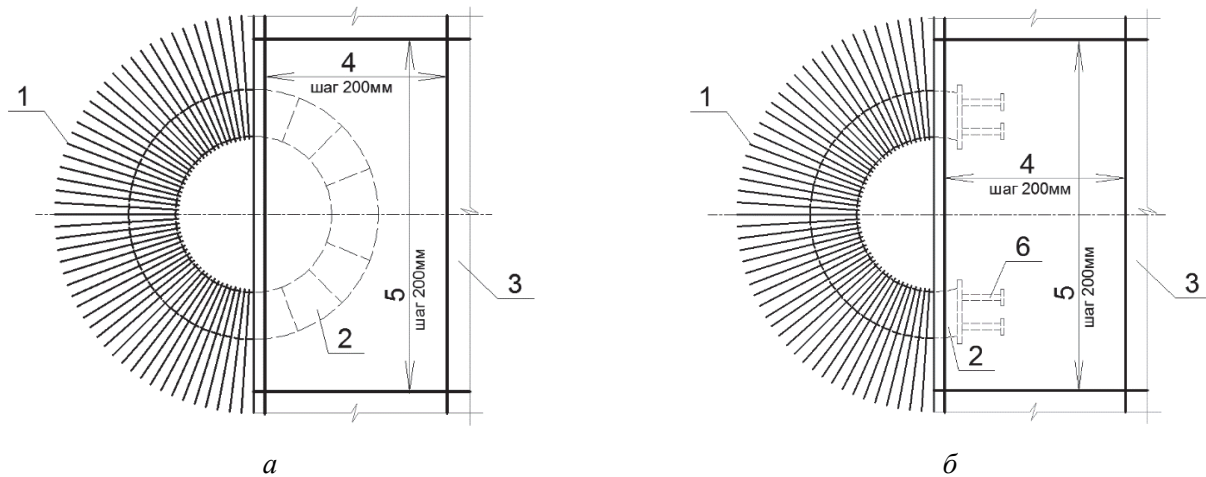


Рис. 3. Внутренняя металлическая опора в форме кольца (а) и полукольца (б):

- 1 – ванты; 2 – внутренняя опора в форме кольца или полукольца; 3 – плита плоского покрытия;
4 – арматура в продольном направлении; 5 – арматура в поперечном направлении; 6 – закладная деталь
- [Figure 3.** Internal metal support in the form of ring (a) and half ring (b):
1 – cables; 2 – an internal support in the form of a ring or half ring; 3 – a plate of a flat roof;
4 – reinforcement in the longitudinal direction; 5 – reinforcement in the transverse direction; 6 – embedded part]

Внутренняя металлическая опора может представлять собой несколько видов конструкций: кольцо (рис. 3, а), полукольцо (рис. 3, б) и новый вид конструкции металлической опоры для крепления неразрезного ванта, оригинальность и новизна которой подтверждена патентной экспертизой [22]. Опорные концы соединены с армированием плиты плоского покрытия и забетонированы. Длина заделки концов опорного полукольца определяется расчетом согласно нормативным документам.

3. Методы исследования

Инженерный анализ конструкции здания выполнен с помощью программного САЕ-комплекса FEMAP with NX NASTRAN, реализующего метод

конечных элементов (МКЭ) [23; 24]. В расчете учтена физическая и геометрическая нелинейности деформирования вантовой системы покрытия здания [19]. Как известно, особенность подобных расчетов заключается в том, что при их выполнении нельзя использовать ряд известных теорий и законов строительной механики, таких как принцип возможных перемещений и взаимности работ, закон независимости действия сил и др. [19]. В расчетах подобного типа применяются численные итерационные методы, основанные на пошаговом способе нагружения ванта [15; 19; 23–30]. В программном комплексе FEMAP with NX NASTRAN нелинейный статический анализ (Nonlinear Static Analysis) выполняется на основе итерационного решения методом Ньютона – Рафсона [23; 24].

4. Нагрузки, действующие на ЦПВ-покрытие

На ЦПВ-покрытие действуют вертикальные статические нагрузки: постоянная от собственного веса конструктивных элементов, состава кровли [31] и временная (снеговая) нагрузка. При расчете прочности здания с ЦПВ-покрытием выбраны максимальные усилия от неблагоприятных сочетаний нагрузок в соответствии с СП 20.13330.2012 [32]. Сочетание нагрузок [17; 33–35] на ЦПВ-покрытие:

1) равномерно распределенная постоянная и временная (снеговая) нагрузки (рис. 4, а);

2) равномерно распределенная постоянная и неравномерно распределенная временная нагрузки (рис. 4, б).

При радиальной схеме расположения вант вертикальная нагрузка на отдельные ванты (стальные канаты) приложена в форме трапеции [35; 36]. Ее величина уменьшается по длине ванты (гибкой нити) пропорционально от наружного опорного контура разного радиуса $R_i = 15, 30, 45$ и 60 м к внутренней опоре с радиусом $r = 0,5$ м. На рис. 4 представлены схемы приложения снеговой нагрузки на цилиндрическое покрытие.

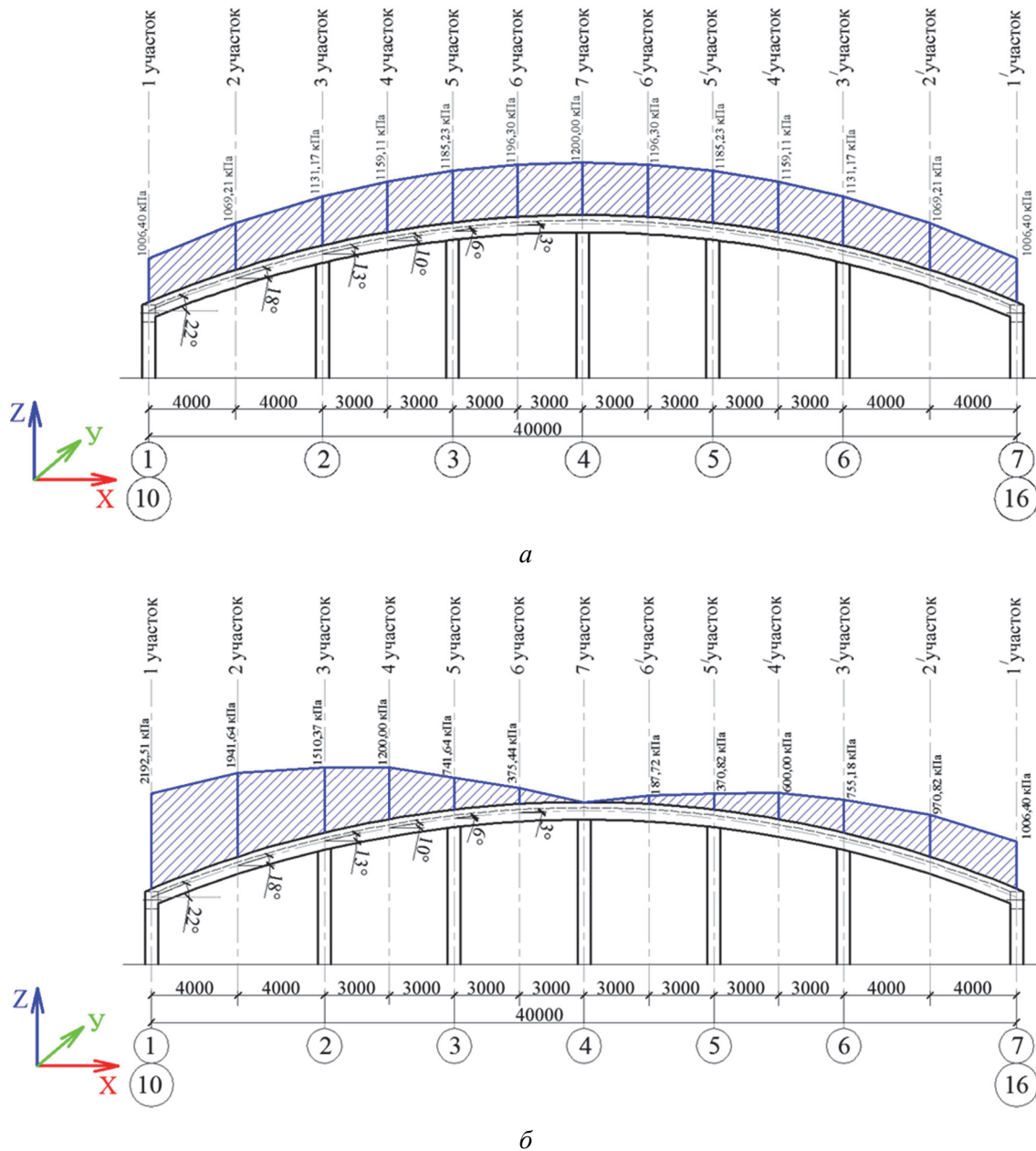


Рис. 4. Снеговая нагрузка (район – II) на цилиндрическое покрытие высотой 4 м, рассчитанная по СП [32]:

а – вариант 1; б – вариант 2

[Figure 4. Snow load (district – II) on a cylindrical roof 4 m high, calculated by SP [32]:

a – variant 1; b – variant 2]

5. Результаты

Рассмотрим следующие варианты расчетно-пространственных моделей большепролетных зданий с наружными опорами в ЦПВ-покрытии, имеющими следующие продольные радиусы: 1) $R_1 = 15$ м (модель 1); 2) $R_2 = 30$ м (модель 2); 3) $R_3 = 45$ м (модель 3); 4) $R_4 = 60$ м (модель 4).

5.1. Расчетная модель 1 с продольным радиусом $R_1 = 15$ м

Численный анализ показал, что деформации вантового покрытия зависят от длины вант и схемы их расположения вдоль наружного безанкерного опорного контура (наружная опора). При радиальной схеме расположения вант на концах наружной опоры ванты (гибкие нити) длиннее, чем в центральной части. Поэтому их наибольший прогиб возникает по краям висячего покрытия (рис. 5, а). На-

ружный железобетонный опорный контур с продольным радиусом $R_1 = 15$ м имеет форму «полумесяца». В деформированном состоянии в плане (в осях $x - y$) он представляет «коромысло» (рис. 5, б), что является следствием особенностей нагружения вант (гибких нитей) и пошагового расположения вант разной длины (рис. 5, в). Максимальные перемещения по оси x составили $\Delta_{x1} = 0,0156$ м, а по оси $y - \Delta_{y1} = 0,0250$ м. Максимальный прогиб для расчетных моделей 1 и 2 с цилиндро-плитным покрытием равен 0,025 м, как при снеговой нагрузке по вариантам 1 и 2, а для моделей 3 и 4 согласно полученным результатам расчета. В данном анализе интерес представляет влияние вантовой системы на деформирование цилиндро-плитного покрытия, а именно зона прогиба цилиндрической оболочки. Для каждой расчетной модели она будет изменяться.

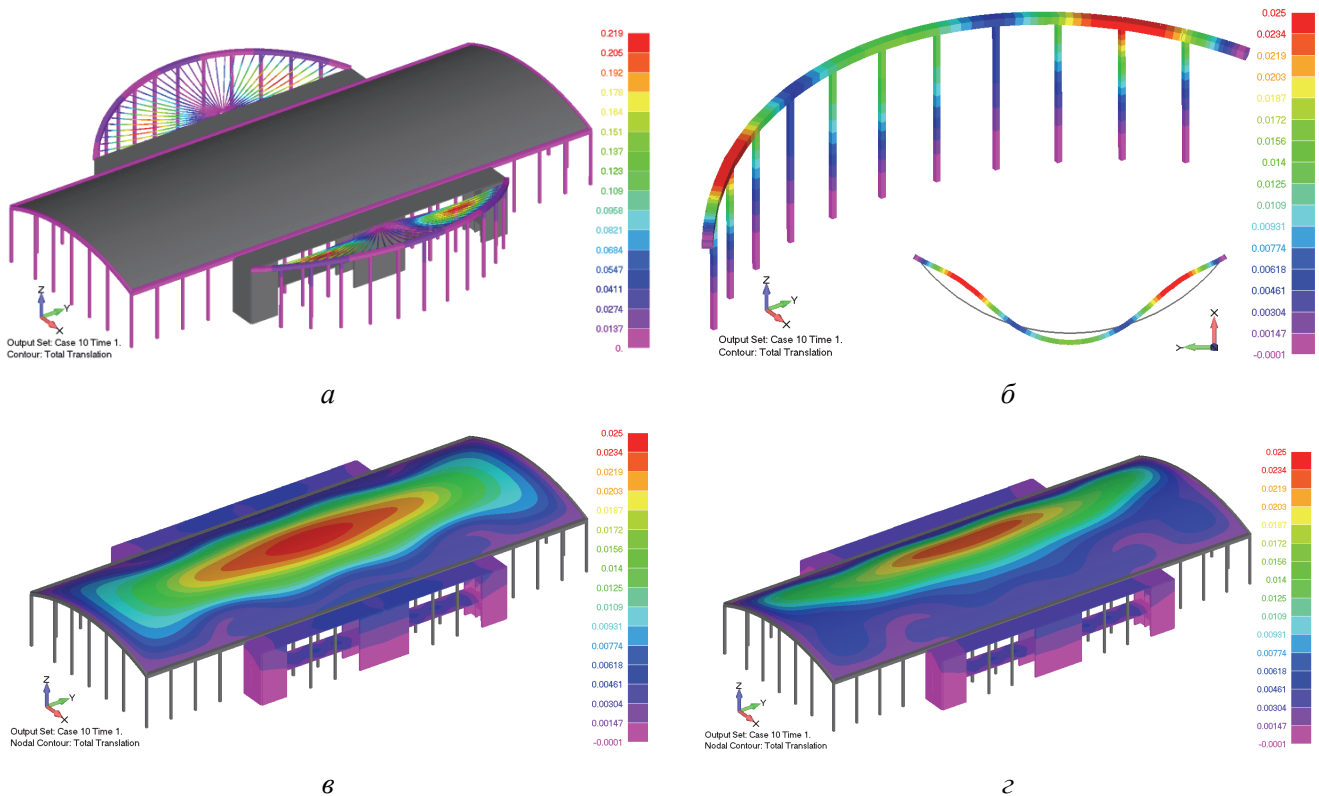


Рис. 5. Расчетная модель 1 ($R_1 = 15$ м) – максимальные перемещения конструктивных элементов ЦПВ-покрытия:

а – общий вид здания; б – фрагмент модели (наружный опорный контур с радиусом $R_1 = 15$ м); в – центральная часть здания с цилиндро-плитным покрытием (снег – вариант 1); г – центральная часть здания с цилиндро-плитным покрытием (снег – вариант 2)

[Figure 5. Calculation model 1 ($R_1 = 15$ m) – maximum displacement of the structural elements of the cylinder-plate-cable-stayed roof: а – general view of the building; б – a fragment of the model (an external support contour with a radius of $R_1 = 15$ m); в – the central part of the building with a cylinder-plate roof (snow – variant 1); г – the central part of the building with a cylinder-plate roof (snow – variant 2)]

5.2. Расчетная модель 2 с продольным радиусом $R_2 = 30$ м

Деформации вант в центральной части вантового покрытия имеют форму полуокружности (рис. 6, а). Это объясняется тем, что концы наружного

железобетонного безанкерного опорного контура (наружной опоры) жестко закреплены в углах продольно-торцевой диафрагмы (ядра жесткости) плоского участка покрытия. На рис. 6, б в плане, то есть в осях $x - y$ представлена деформирован-

ная модель наружного железобетонного опорного контура с колоннами. Максимальное перемещение по осям x и y составило $\Delta_{x2} = \Delta_{y2} = 0,0061$ м. Деформация наружного опорного контура (наружной опоры) с продольным радиусом $R_2 = 30$ м

в плане повторяет первоначальную форму полуокружности, что является следствием пошагового расположения вант равной длины и равномерно распределенной нагрузки на каждый вант (гибкую нить).

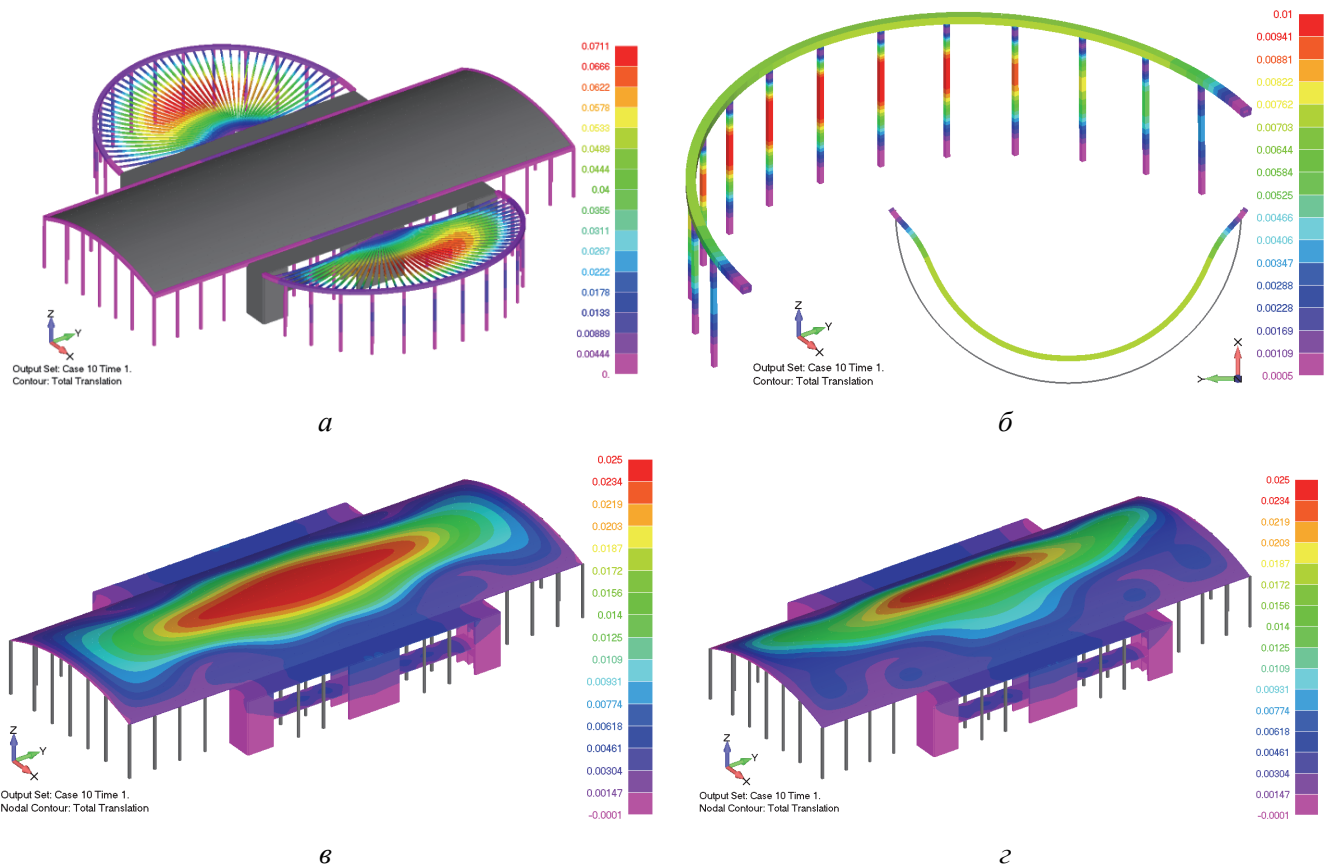


Рис. 6. Расчетная модель 2 ($R_2 = 30$ м) – максимальные перемещения конструктивных элементов ЦПВ-покрытия:

a – общий вид здания; b – фрагмент модели (наружный опорный контур с радиусом $R_2 = 30$ м); c – центральная часть здания с цилиндро-плитным покрытием (снег – вариант 1); d – центральная часть здания с цилиндро-плитным покрытием (снег – вариант 2)

[Figure 6. Calculation model 2 ($R_2 = 30$ m) – maximum displacement of the structural elements of the cylinder-plate-cable-stayed roof: a – general view of the building; b – a fragment of the model: an external support contour with a radius of $R_2 = 30$ m; c – the central part of the building with a cylinder – plate roof (snow – variant 1); d – the central part of the building with a cylinder-plate roof (snow – variant 2)]

5.3. Расчетная модель 3 с продольным радиусом $R_3 = 45$ м

В расчетной модели 3 ванты (гибкие нити) максимально прогибаются от внешней нагрузки в центральной части вантового покрытия, как и в модели 2 с продольным радиусом $R_2 = 30$ м, поскольку длина вант в центральной части висячего покрытия больше, чем у наружной опоры (рис. 7, a). На рис. 7, b представлена деформированная схема наружного опорного контура с колоннами, максимальные перемещения которого составили по оси x – $\Delta_{x3} = 0,0250$ м, а по оси y – $\Delta_{y3} = 0,0156$ м. От внешнего воздействия длинные ванты в срединной части максимально растягиваются, из-за чего срединная часть наружного опорного контура смещается к плите плоского покрытия. Исключение со-

ставляют ванты с относительно малым прогибом, расположенные ближе к краям опоры. Отметим, что переход полукольца с продольным радиусом $R_3 = 45$ м со смещенным центром в деформированную С-форму не связан с потерей устойчивости. Наблюдается сложное перераспределение опорных реакций, связанное с дополнительной нагрузкой вант, ориентированных преимущественно вдоль его наибольшей осевой линии и, наоборот, с разгрузкой вант, направленных преимущественно вдоль меньшей осевой линии.

Максимальный прогиб цилиндрической оболочки составил 0,029 м. Зона ее прогиба существенно отличается от двух предыдущих из-за изменения формы вантовой системы и, соответственно, длины вант в центральной части.

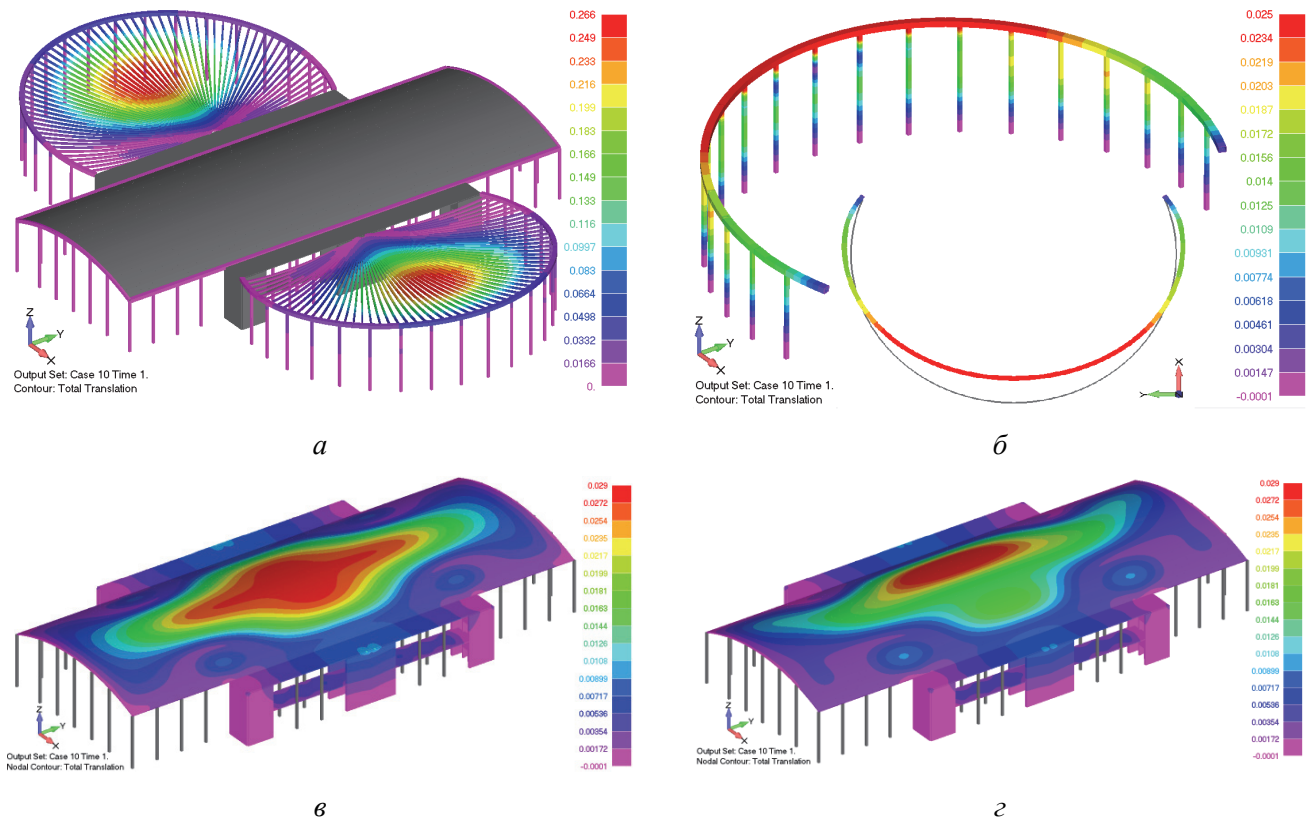


Рис. 7. Расчетная модель 3 ($R_3 = 45$ м) – максимальные перемещения конструктивных элементов ЦПВ-покрытия:

a – общий вид здания; *б* – фрагмент модели (наружный опорный контур с радиусом $R_3 = 45$ м); *в* – центральная часть здания с цилиндро-плитным покрытием (снег – вариант 1); *г* – центральная часть здания с цилиндро-плитным покрытием (снег – вариант 2)

[**Figure 7.** Calculation model 3 ($R_3 = 45$ m) – maximum displacement of the structural elements of the cylinder-plate-cable-stayed roof: *a* – general view of the building; *б* – a fragment of the model (an external support contour with a radius of $R_3 = 45$ m); *в* – the central part of the building with a cylinder-plate roof (snow – variant 1); *г* – the central part of the building with a cylinder-plate roof (snow – variant 2)]

5.4. Расчетная модель 4 с продольным радиусом $R_4 = 60$ м

Наружный опорный контур, изначально имеющий форму полуэллипса с радиально расположенными вантами, приобретает особенную форму деформации. При поперечной нагрузке вантового покрытия возникает форма стесненного полуэллипса (рис. 8, *б*). Относительно большая плотность расположения вант, ориентированных преимущественно вдоль наибольшей оси полуэллипса опорного контура (рис. 8, *а*), приводит к незначительному поджатию внутрь. Максимальные перемещения в горизонтальной плоскости составили: по оси x – $\Delta_{x4} = 0,0187$ м, а по оси y – $\Delta_{y4} = 0,0250$ м. Согласно результатам численного анализа, максимальный прогиб цилиндрической оболочки здания для расчетной модели 4 (рис. 8, *в*) равен 0,035 м.

Полученные численные результаты расчетов максимальных прогибов (перемещений) конструктивных элементов зданий с разными архитектурными очертаниями наружного опорного контура в ЦПВ-покрытии приведены в табл. 1.

На рис. 9–12 представлены фрагменты ЦПВ-покрытий, а именно вантовых (висячих покрытий) разной архитектурной формы (*а*), и расчетные продольные усилия N (H) для каждого конструктивного элемента: наружного безанкерного опорного контура (наружной опоры) (*б*) и вант (гибких нитей) (*в*) от поперечной (вертикальной) внешней нагрузки. Численные результаты статических расчетов приведены в табл. 2.

Таким образом, изменение формы наружного безанкерного опорного контура (наружной опоры) приводит к существенному изменению НДС всего большепролетного здания (сооружения) с ЦПВ-покрытием. НДС наружной опоры вантового покрытия существенно зависит не только от внешней нагрузки, но и от схемы расположения вант в висячем покрытии (см. табл. 1, 2).

Согласно полученным численным результатам расчетов, в местах сопряжения внутреннего металлического полукольца (рис. 3) с плитой плоского покрытия возникают большие напряжения, которые вызваны внутренними усилиями в вантах (рис. 5–8), зависящие от длины и формы вантового покрытия. Напряжения в плите плоского участ-

ка покрытия можно уменьшить с помощью следующих конструктивных решений:

- увеличением толщины плиты покрытия;
- усилением плиты покрытия ребрами жесткости;

– увеличением сечения внутреннего полукольца;

- увеличением стрелы провеса с учетом архитектурного и технологического решения.

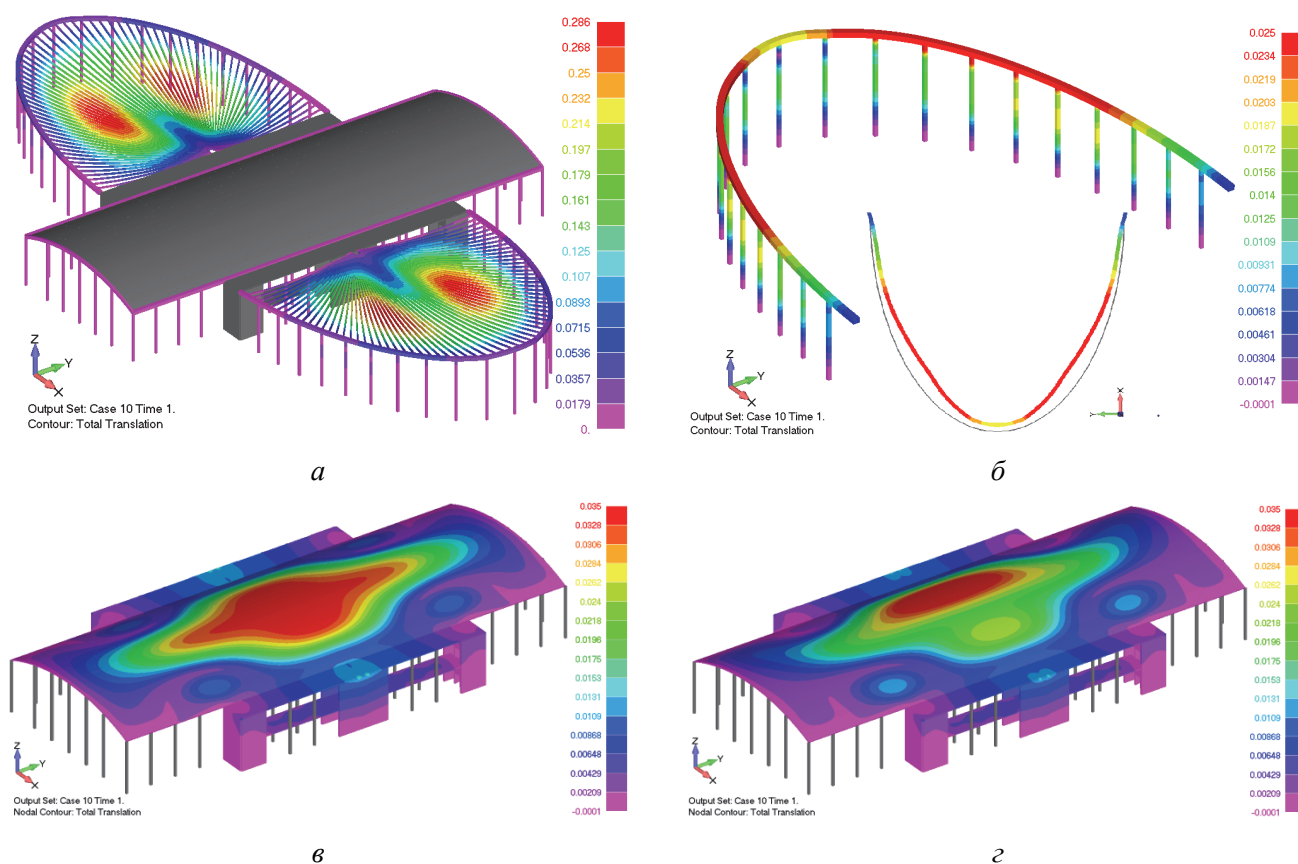


Рис. 8. Расчетная модель 4 ($R_4 = 60$ м) – максимальные перемещения конструктивных элементов ЦПВ-покрытия: *a* – общий вид здания; *б* – фрагмент модели (наружный опорный контур с радиусом $R_4 = 60$ м); *в* – центральная часть здания с цилиндро-плитным покрытием (снег – вариант 1); *г* – центральная часть здания с цилиндро-плитным покрытием (снег – вариант 2)
[Figure 8. Calculation model 4 ($R_4 = 60$ m) – maximum displacement of the structural elements of the cylinder-plate-cable-stayed roof: *a* – general view of the building; *б* – a fragment of the model (an external support contour with a radius of $R_4 = 60$ m); *в* – the central part of the building with a cylinder-plate roof (snow – variant 1); *г* – the central part of the building with a cylinder-plate roof (snow – variant 2)]

Таблица 1

Результаты численных расчетов перемещений конструктивных элементов ЦПВ-покрытия с радиальной схемой вантового покрытия

[Table 1. The results of numerical calculations of the displacements of the structural elements of the cylinder-plate-cable-stayed roof with the radial cable-stayed roof]

Расчетная модель [Calculation model]	Продольный радиус R_i , м [Longitudinal radius R_i , m]	Максимальные прогибы (перемещения) Δf , м, конструктивных элементов [Maximum displacements Δf , m, of structural elements]					
		Покрытие [Roof]		Наружная опора [External support]		Внутренняя опора [Internal support]	
		Вантовое [Cable-stayed]	Цилиндрическое [Cylinder]	Центральная часть [Central part]	Крайняя часть [Extreme part]	Центральная часть [Central part]	Крайняя часть [Extreme part]
Модель 1	15,00	0,2190	0,0250	0,0156	0,0250	-0,000405	-0,000625
Модель 2	30,00	0,0711	0,0250	0,0060	0,0060	-0,004480	-0,001130
Модель 3	45,00	0,2660	0,0290	0,0250	0,0156	-0,012500	-0,002000
Модель 4	60,00	0,2860	0,0350	0,0187	0,0250	-0,026000	-0,000653

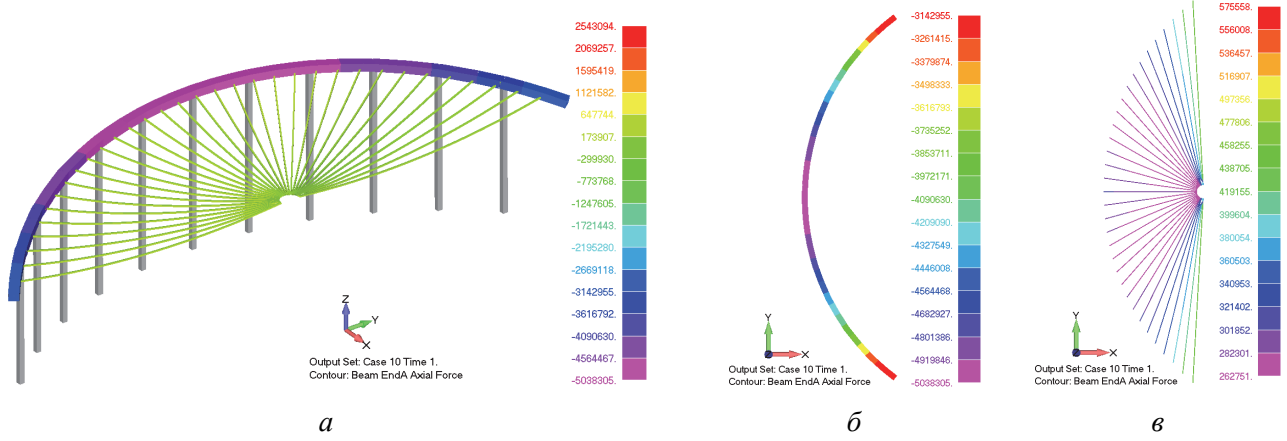


Рис. 9. Расчетная модель 1 ($R_1 = 15$ м) – продольная сила N , H :
a – модель вантового покрытия; *б* – наружный опорный контур; *в* – ванты
 [Figure 9. Calculation model 1 ($R_1 = 15$ m) – axial force N , H :
a – cable-stayed roof model; *б* – the external support contour; *в* – cables]

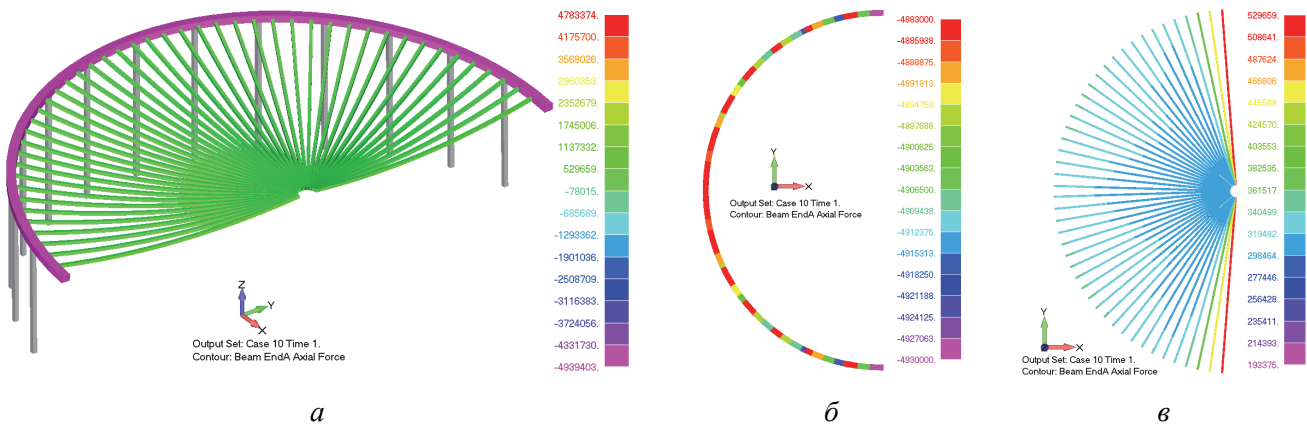


Рис. 10. Расчетная модель 2 ($R_2 = 30$ м) – продольная сила N , H :
a – модель вантового покрытия; *б* – наружный опорный контур; *в* – ванты
 [Figure 10. Calculation model 2 ($R_2 = 30$ m) – axial force N , H :
a – cable-stayed roof model; *б* – the external support contour; *в* – cables]

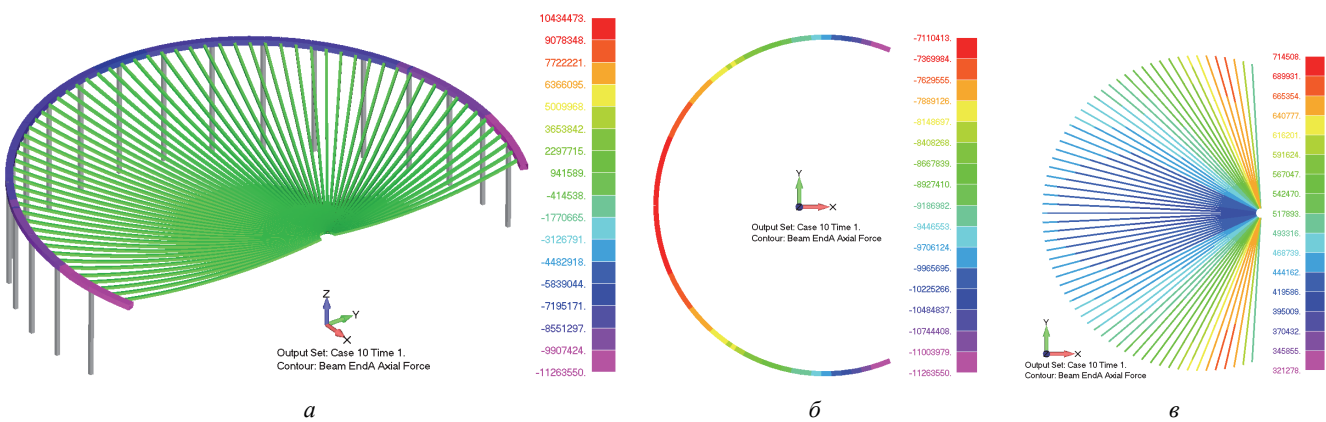


Рис. 11. Расчетная модель 3 ($R_3 = 45$ м) – продольная сила N , H :
a – модель вантового покрытия; *б* – наружный опорный контур; *в* – ванты
 [Figure 11. Calculation model 3 ($R_3 = 45$ m) – axial force N , H :
a – cable-stayed roof model; *б* – the external support contour; *в* – cables]

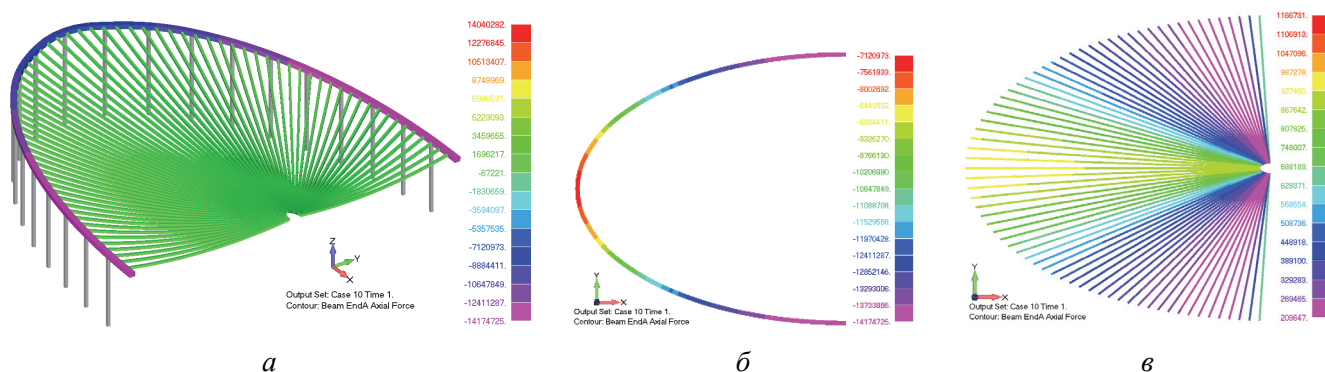


Рис. 12. Расчетная модель 4 ($R_4 = 60$ м) – продольная сила N, H :
 а – модель вантового покрытия; б – наружный опорный контур; в – ванты
 [Figure 12. Calculation model 4 ($R_4 = 60$ m) – axial force N, H :
 а – cable-stayed roof model; б – the external support contour; в – cables]

Таблица 2

Результаты расчета внутренних сил конструктивных элементов ЦПВ-покрытия с радиальной схемой вантового покрытия
 [Table 2. The calculation results of the internal forces of the structural elements of the cylinder-plate-cable-stayed roof with a radial cable-stayed roof]

Расчетная модель [Calculation model]	Продольный радиус R_i , м [Longitudinal radius R_i , m]	Максимальные продольные усилия N, H [Maximum axial force N, H]					
		Ванты [Cables]		Наружная опора [External support]		Внутренняя опора [Internal support]	
		Центральная часть [Central part]	Крайняя часть [Extreme part]	Центральная часть [Central part]	Крайняя часть [Extreme part]	Центральная часть [Central part]	Крайняя часть [Extreme part]
Модель 1	15,00	262 751	477 806	-5 038 305	-3 142 955	2 500 363	2 315 194
Модель 2	30,00	277 446	529 659	-4 883 000	-4 930 000	4 487 207	4 783 374
Модель 3	45,00	419 586	714 508	-7 110 413	-11 263 550	9 078 340	9 078 340
Модель 4	60,00	927 460	209647	-7 120 973	-14 174 725	6 986 531	14 040 282

Таблица 3

Результаты численного анализа полезных площадей здания
 [Table 3. The results of a numerical analysis of the useful area of the building]

Расчетная модель [Calculation model]	Параметры ЦПВ-покрытия с наружными опорными контурами [Parameters of cylinder-plate-cable-stayed roof with external support contours]		
	Продольный радиус R_i , м [Longitudinal radius R_i , m]	Поперечный радиус r , м [Transverse radius r , m]	Площадь помещения вантового покрытия S , м ² [The area of the cable-stayed premises S , m ²]
Модель 1	15,00 (в осях 1–7)	30,00	629,00
Модель 2	30,00 (в осях 1–8)	30,00	1413,00
Модель 3	45,00 (в осях 1–11)	30,00	2452,00
Модель 4	60,00 (в осях 1–12)	30,00	2826,00

Полученные результаты сравнительного анализа конструкций ЦПВ-покрытия показали, что расчетная модель 2 с продольным радиусом $R_2 = 30$ м (рис. 2, б) и вантовым покрытием в форме полуокружности (рис. 6) подвержена при одинаковых внешних нагрузках меньшим деформациям и напряжениям в сравнении с моделями 1, 3 и 4 (табл. 1, 2).

Несмотря на относительно небольшую площадь вантового покрытия расчетной модели 2, полуокружность является оптимальной формой для вант с радиальным расположением. Под действием внешних сил форма полуокружности сохраняет свою первоначальную форму (рис. 6, б), что приводит к наиболее благоприятному перераспределению внут-

ренных усилий (табл. 1, 2). Расчетные модели с другими очертаниями опорных контуров подвержены большим деформациям (перемещениям) (табл. 3), усилиям (табл. 1, 2) и напряжениям.

Отличительным архитектурно-конструктивным признаком расчетных моделей большепролетных зданий с ЦПВ-покрытием является влияние архитектурно-геометрических параметров наружного опорного контура (наружной опоры) вантового покрытия на величину полезной площади под ним. Проведем сравнительный анализ величины полезной площади помещений большепролетного здания с вантовыми покрытиями разного архитектурного очертания. За основной размер (ширину) вантового покрытия будем считать длину L двухэтажного помещения с плоским покрытием, которая равна 60 м (рис. 2). Результаты расчета, полученные аналитическим методом, приведены в табл. 3.

Проанализировав полученные расчеты можно сделать вывод, что предложенная геометрия вантового покрытия оказывает существенное влияние на полезную площадь покрытия, что является немаловажным фактором в архитектурно-планировочном решении для зданий (сооружений) рассматриваемого типа.

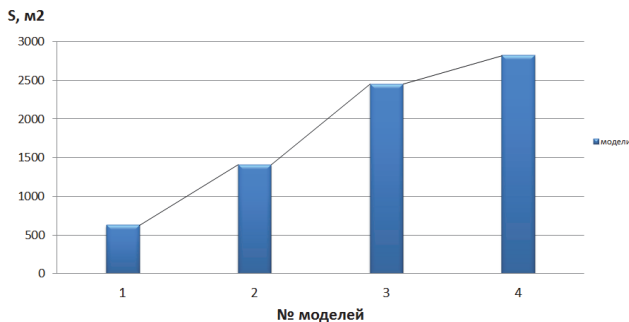


Рис. 13. Гистограмма площадей зданий с разными вантовыми покрытиями
[Figure 13. The histogram of the area of buildings with different cable-stayed roofs]

Таблица 4

Сравнение результатов численного анализа полезных площадей здания
[Table 4. The results of a numerical analysis of the useful area of the building]

Показатели [Indicators]	Соотношение площадей моделей вантового покрытия в процентах [The ratio of the areas of cable-stayed models in percent]					
	1–2	1–3	1–4	2–3	2–4	3–4
Увеличение на:	55,48	74,35	77,74	42,37	50,00	13,24

На рис. 13 представлена гистограмма площадей (S , м²) расчетных моделей с вантовым покрытием разного архитектурного очертания. Посколь-

ку наибольший интерес представляют висячие покрытия с большими площадями, то проанализируем соотношение площадей всех моделей между собой. Детальное сравнение полученных результатов расчета представлено в табл. 4.

6. Обсуждение

Применение облегченных конструкций в строительстве современных зданий и сооружений обеспечивает архитекторам и инженерам большие возможности по созданию неповторимых архитектурных образов путем сочетания конструкций разных видов. Цилиндро-плитно-вантовое покрытие, сочетающее в себе цилиндрическую оболочку нулевой гауссовой кривизны, плоское и вантовое покрытия, позволяет перекрывать значительные площади, в отличие от отдельно взятых пространственных вантовых и цилиндрических покрытий. А предложенные новые архитектурно-конструктивные решения в виде разнообразных архитектурных форм наружного опорного контура в форме полуокружности и полуэллипса дополнительно увеличивают полезную площадь здания без существенных экономических затрат.

В ходе полученных результатов расчета наблюдается интересная особенность работы цилиндрично-вантового покрытия с разными очертаниями наружных опорных контуров при сравнении расчетных моделей:

1) по деформированной схеме вантового покрытия. Для расчетных моделей 1 (с продольным радиусом $R_1 = 15$ м) и 4 (с продольным радиусом $R_4 = 60$ м), несмотря на разные формы («полумесяц», полуэллипс), деформированные схемы вантовой системы практически совпадают, а зоны прогибов цилиндрической оболочки отличаются. Аналогично и для расчетных моделей 2 (с продольным радиусом $R_2 = 30$ м) и 3 (с продольным радиусом $R_3 = 45$ м);

2) по деформированной схеме цилиндрично-плитного покрытия. Расчетные модели 1 (с продольным радиусом $R_1 = 15$ м) и 2 (с продольным радиусом $R_2 = 30$ м) по зонам прогиба цилиндрической оболочки совпадают, а по деформации вантовой системы различаются. То же наблюдается у расчетных моделей 3 и 4.

Заключение

Признанными достоинствами вант и вантовых конструкций являются простота, надежность и экономичность. Вантовые покрытия привлекают архитекторов и инженеров возможностью создания неповторимых архитектурных образов общественных зданий и сооружений, таких как зрелищные (му-

зеи, театры, кинотеатры) и спортивные комплексы (крытые и открытые стадионы), торговые центры и др. При их строительстве предпочтительными оказываются висячие вантовые покрытия различных форм, способные перекрывать большие площади и при этом эффективно противостоять весовым, ветровым и сейсмическим нагрузкам.

В висячих покрытиях рассмотренного типа усилия от вант передаются на внутренние и внешние опорные конструкции. Внутренняя металлическая опора, изготовленная, как правило, в виде кольца, является ответственным конструктивным элементом, поскольку она концентрирует опорные реакции от ряда вант. Данная опора должна жестко соединяться с плитой плоского покрытия здания, которая опирается на продольно-поперечные диафрагмы (рис. 2, б). Наружный опорный контур подвержен наибольшим усилиям и деформациям, что приводит к удорожанию указанного конструктивного элемента в вантовом покрытии. При проектировании и строительстве здания (сооружения) рассмотренного типа выбор геометрической формы наружного опорного контура является важным решением. Он во многом определяет прочность и надежность всего здания. Именно поэтому необходимо принимать простые, надежные и вместе с тем экономичные решения для конструктивного оформления наружной опоры вантового покрытия. Полученные расчеты показали, что наиболее предпочтительной оказывается наружная опорная конструкция вантовой системы, выполненная в форме полукруглости (табл. 3).

Одновременно при выборе конструкции наружного безанкерного опорного контура (наружной опоры) необходимо учитывать существенное влияние его архитектурно-геометрической формы на величину полезной площади помещения с вантовым покрытием (табл. 3, 4). В инженерном анализе зданий (сооружений) рассматриваемого типа эффективным приемом оказывается представление вантового (висячего) покрытия в качестве внешнего суперэлемента (Super Elements) [37; 38]. Подобный прием позволяет существенно сократить порядок решаемой задачи, локализовать область с физическим и геометрическим нелинейным деформированием материала, требующую расчета с применением пошаговых либо итерационных методов, и обеспечить возможность расчетного конструирования без пересчета конструкции в целом.

Список литературы

1. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции: общий курс: учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1991. 767 с.
2. Зимин С.С., Кокоткова О.Д., Беспалов В.В. Сводчатые конструкции исторических зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 2(29). С. 57–72.
3. Липницкий М.Е. Купола. Расчет и проектирование. Л.: Стройиздат, 1973. 129 с.
4. Гохарь-Хармандарян И.Г. Большепролетные купольные здания. М.: Стройиздат. 1978. 150 с.
5. Виноградов Г.Г. Расчет строительных пространственных конструкций. Л.: Стройиздат, 1990. 262 с.
6. Труцев А.Г. Пространственные металлические конструкции: учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1982. 215 с.
7. Кирсанов Н.М. Висячие и вантовые конструкции: учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1981. 158 с.
8. Дмитриев Л.Г., Касилов А.В. Вантовые покрытия. Расчет и конструирование. 2-е изд., перераб. и дополн. Киев: Будівельник, 1974. 272 с.
9. Кривошапко С.Н. Висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 7 (34). С. 51–70.
10. Сапожников А.И. Жизнь зданий в земной стихии. Германия: LAP Lamber Academic Publishing, 2014. 60 с.
11. Кривошапко С.Н. Вантовые структуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 1. С. 9–22.
12. Park K., Park M., Shin S. Design of large space cable roofs with retractable systems to open and close // International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Issue 4–1. Pp. 197–203. <http://dx.doi.org/10.21172/1.841.34>
13. Grunwalda G., Hermekingb T., Prangc T. Kinetic Roof Structure: Msheireb Heart of Doha // Procedia Engineering. 2016. No. 155. Pp. 89–296.
14. Кужахметова Э.Р., Сапожников А.И. Архитектурная выразительность и физиологическая целесообразность зданий с криволинейными поверхностями // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 11 (166). С. 42–45.
15. Кужахметова Э.Р. Методы расчета вант и вантовых конструкций // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. № 2. С. 39–48. DOI: 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360.
16. Кужахметова Э.Р. Сравнительный анализ работы вант с разной геометрической характеристикой при вертикальном нагружении // Известия Калининградского государственного технического университета. 2017. № 45. С. 235–244.
17. Кужахметова Э.Р. Конструктивные решения расположения вант в цилиндро-плитно-вантовом (ЦПВ) покрытии здания (сооружения) // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 77–89. DOI: 10.34031/article_5ce292ca24bc23.91006970.
18. СП 16.13330.2011. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП П-23-81*. М., 2011.
19. Кужахметова Э.Р. Расчет вант с учетом физической и геометрической нелинейности // Известия Калининградского государственного технического университета. 2019. № 55. С. 252–266.

20. СП 63.13330.2011. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. СНиП 52-01-2003 с изм. № 1. М., 2011.
21. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016.
22. Патент РФ № 2705689. Металлическая опора для крепления неразрезного ванта в висячих покрытиях зданий (сооружений) / Кузяхметова Э.Р., Сутырин В.И. 2019. Бюл. № 32. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
23. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде FEMAP with NX NASTRAN. М.: ДМК Пресс. 2013. 784 с.
24. Шумкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/ NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2003. 448 с. (Серия «Проектирование»).
25. Qing Mac, Makoto Ohsakid, Zhihua Chena, Xiangyu Yanc. Step-by-step unbalanced force iteration method for cable-strut structure with irregular shape // *Engineering Structures*. 2018. No. 177. Pp. 331–334.
26. Thai H.-T., Kim S.-E. Nonlinear static and dynamic analysis of cable structures // *Nonlinear static and dynamic analysis of cable structures*. 2011. Vol. 47. Issue 3. Pp. 237–246.
27. Kmet S., Mojdis M. Time-dependent analysis of cable domes using a modified dynamic relaxation method and creep theory // *Computer and Structures*. 2013. No. 125. Pp. 11–22.
28. Zhou B., Accorsi M., Leonard J.W. Finite element formulation for modeling sliding cable elements // *Computer and Structures*. 2004. No. 82 (2–3). Pp. 271–280.
29. Guo J., Jiang J. An algorithm for calculating the feasible pre-stress of cable-struts structure // *Engineering Structures*. 2016. No. 118. Pp. 228–239.
30. Salehi Ahmad Abad M., Shoostari A., Esmaili V., Naghavi Riabi A. Nonlinear analysis of cable structures under general loadings // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2013. No. 73. Pp. 11–19.
31. СП 17.13330.2017. Кровли. Актуализированная редакция СНиП II-26-76. М., 2017.
32. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М., 2016.
33. Polák M., Plachý T. Determination of Forces in Roof Cables at Administrative Center Amazon Court // *Procedia Engineering*. 2012. No. 48. Pp. 578–582.
34. Kmet S., Tomko M., Soltys R., Rovnak M., Demjan I. Complex failure analysis of a cable-roofed stadium structure based on diagnostics and tests // *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 103. Pp. 443–461.
35. Кузяхметова Э.Р. Деформация вант при различных условиях нагружения // *Известия Калининградского государственного технического университета*. 2019. № 52. С. 154–168.
36. Кузяхметова Э.Р. Деформация вант при различных условиях нагружения // *Балтийский морской форум: материалы VI Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Т. 6*. 2018. С. 129–139.
37. Сутырин В.И. Экономичные методы решения конечно-элементных систем, моделирующих сложные конструкции // *Известия вузов. Машиностроение*. 2000. № 5–6. С. 47–51.
38. Сутырин В.И. Возможности повышения эффективности метода конечных элементов при проектировании корпусных конструкций // *Судостроение*. 2003. № 6. С. 9–13.

RESEARCH PAPER

Stress-strain state cylinder-plate-cable-stayed roof buildings (structures) with various forms of external support contour

Elvira R. Kuzhakhmetova

Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 Aleksandra Nevskogo St, Kaliningrad, 236016, Russian Federation
elja_09@bk.ru

Article history:

Received: January 11, 2020

Revised: March 05, 2020

Accepted: March 12, 2020

Abstract

Relevance. A new wave-like combined (complex) coating design for large-span buildings – a cylinder-plate-cable-stayed roof, combining three types of structures: a cylindrical shell of zero Gaussian curvature, plate and cable-stayed (hanging) roofs are presented. This combination of structures and materials for roof large areas was not chosen by chance. The cable works in tension with its entire cross section only, and the cylindrical shell and plate work in two (longitudinal and transverse) planes. In combination with external influence, they create the necessary design strength, taking into account, at the same time, a rational choice of materials (steel and reinforced concrete). New architectural and constructive solutions of a large-span building with a cylinder-plate-cable-stayed roof are proposed taking into account the different geometric shapes of the external support contour in a form of a semicircle, semiellipse, etc. **The aim of the work** is to analyze the influence of the external support contour (semicircle, semiellipse, and other forms) on the spatial work of internal

Elvira R. Kuzhakhmetova, postgraduate student, engineer, senior lecturer of Institute of Engineering and Technology; eLIBRARY SPIN-code: 1949-1140, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0907-786X>.

For citation

Kuzhakhmetova E.R. Stress-strain state cylinder-plate-cable-stayed roof buildings (structures) with various forms of external support contour. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(2):95–110. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110>. (In Russ.)

forces in the combined cylinder-plate-cable-stayed roof of a large-span building. **Methods.** Results of static numerical analysis of spatial models of large-span buildings with different types of external supporting contour in the centralized roofs were made in the FEMAP with NX NAS-TRAN software package. This complex belongs to the CAE – class which implements the finite element method (FEM) and allows on the basis of the physical and geometric nonlinearity of the deformation of structures. **Results.** Calculation study carried out comparative numerical analysis of the stress-strain state of a complex cylinder-plate-cable-stayed roof with different outlines of the support contours on the effect of vertical loads. This determines their rational choice given due consideration to the total cost and useful area of the building. The results of calculating large-span buildings with cylinder-plate-cable-stayed roofs for horizontal (wind) load, on the basis of determination of aerodynamic coefficients, are supposed to be published in the next article.

Keywords: cables, cable-stayed (hanging) roof, hanging system, combined (complex) roof of a large-span building (structure), cylinder-plate-cable-stayed roof of a building (structure), external support, external support contour of cable-stayed roof, anchorless support, internal metal support

References

1. Baikov V.N., Sigalov E.E. *Zhelezobetonnyye konstruksii [Reinforced concrete structures]*. Moscow: Stroizdat Publ.; 1991. (In Russ.)
2. Zimin S.S., Bespalov V.V., Kokotkova O.D. Vault structures of historical buildings. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;2(29):57–72. (In Russ.)
3. Lipnizkiy M.E. *Kupola. Raschet i proektirovanie [Domes. Calculation and Design]*. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1973. (In Russ.)
4. Gokhar'-Harmadaryan I.G. *Bol'sheproletnyye kupol'nyye zdaniya [Wide-Span Dome Buildings]*. Moscow, Stroyizdat Publ.; 1978. (In Russ.)
5. Vinogradov G.G. *Raschet stroitel'nykh prostranstvennykh konstruksiy [Calculation of building spatial structures]*. Leningrad, Stroizdat Publ.; 1990. (In Russ.)
6. Trushchev A.G. *Prostranstvennyye metallicheskiye konstruksii [Spatial metal structures]: textbook for universities*. Moscow, Stroizdat Publ.; 1982. (In Russ.)
7. Kirsanov N.M. *Visyachiye i vantovyye konstruksii [Hanging and cable structures]: textbook for universities*. Moscow, Stroizdat Publ.; 1981. (In Russ.)
8. Dmitriev L.G., Kasilov A.V. *Vantovyye pokrytiya. Raschet i konstruirovaniye [Cable-stayed coverings. Calculation and design]*. 2nd ed., revised and enlarged. Kiev, Budivelnik Publ.; 1974. (In Russ.)
9. Krivoshapko S.N. Suspension cable structures and roof of erections. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;7(34):51–70. (In Russ.)
10. Sapozhnikov A.I. *Zhizn' zdaniy v zemnoy stikhii [The life of buildings in the earth element]*. Germany, LAP Lamber Academic Publishing; 2014. (In Russ.)
11. Krivoshapko S.N. Cable-stayed structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016; (1):9–22. (In Russ.)
12. Park K., Park M., Shin S. Design of large space cable roofs with retractable systems to open and close. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 2017;8(4–1):197–203. <http://dx.doi.org/10.21172/1.841.34>
13. Grunwalda G., Hermekingb T., Prange T. Kinetic Roof Structure: Msheireb Heart of Doha. *Procedia Engineering*. 2016;(155):289–296. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.031.
14. Kuzhakhmetova E.R., Sapozhnikov A.I. Architectural expressiveness and physiological expediency of buildings with curvilinear surfaces. *Building materials, equipment, technologies of the 21st century*. 2012;11(166):42–45. (In Russ.)
15. Kuzhakhmetova E.R. Methods of calculating cables and cable structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019;(2):39–48. DOI: 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360. (In Russ.)
16. Kuzhakhmetova E.R. Comparative analysis of the work of the guys with different geometric characteristics under vertical loading. *News of Kaliningrad State Technical University*. 2017;(45):235–244. (In Russ.)
17. Kuzhakhmetova E.R. Constructive solutions of guys location in cylindrical-slab-guy covering of building (construction). *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019;(5):77–89. DOI: 10.34031/article_5ce292ca24bc23.91006970. (In Russ.)
18. SP 16.13330.2011. *Stal'nyye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II-23-81** [Steel construction. Updated edition of SNIp II-23-81*]. Moscow; 2011. (In Russ.)
19. Kuzhakhmetova E.R. Calculation of the cables with regard to the geometric and physical nonlinearity. *News of Kaliningrad State Technical University*. 2019;(55):252–266. (In Russ.)
20. SP 63.13330.2011. *Svod pravil. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii [Set of rules. Concrete and reinforced concrete structures]*. SNIp 52-01-2003 rev., no. 1. Moscow; 2011. (In Russ.)
21. GOST 27772-2015. *Prokat dlya stroitel'nykh stal'nykh konstruksiy. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Rolled products for structural steel constructions. General specifications]*. Moscow, Standartinform Publ.; 2016. (In Russ.)
22. Kuzhakhmetova E.R., Sutyurin V.I. *Metallicheskaya opora dlya krepeleniya nerazreznogo vanta v visyachikh pokrytiyakh zdaniy (sooruzheniy) [Metal support for fixation of non-continuous guy in pendant coating of buildings (structures)]*. Patent RUS No. 2705689. Bul. No. 32. 2019. https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. (In Russ.)
23. Rychkov S.P. *Modelirovaniye konstruksiy v srede FEMAP with NX NASTRAN [Structural modeling in FEMAP with NX NASTRAN]*. Moscow: DMK Press; 2013. (In Russ.)

24. Shimkovich D.G. *Raschet konstruksiy v MSC/NASTRAN for Windows* [Structural Analysis in MSC/NASTRAN for Windows]. Moscow, DMK Press; 2003. (Series “Design”). (In Russ.)
25. Qing Ma, Makoto Ohsaki, Zhihua Chen, Xiangyu Yan. Step-by-step unbalanced force iteration method for cable-strut structure with irregular shape. *Engineering Structures*. 2018;(177):331–334. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.081>
26. Thai H.-T., Kim S.-E. Nonlinear static and dynamic analysis of cable structures. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2011;(47):237–246. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2010.10.005>
27. Kmet S., Mojdis M. Time-dependent analysis of cable domes using a modified dynamic relaxation method and creep theory. *Computer and Structures*. 2013;(125):11–22. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.04.019>
28. Zhou B., Accorsi M.L., Leonard J.W. Finite element formulation for modeling sliding cable elements. *Computer and Structures*. 2004;82(2–3):271–280. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2003.08.006>
29. Guo J., Jiang J. An algorithm for calculating the feasible pre-stress of cable-struts structure. *Engineering Structures*. 2016;(118):228–239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.058>
30. Mostafa Salehi Ahmad Abad, Ahmad Shooshtari, Vahab Esmaeili, Alireza Naghavi Riabi Nonlinear analysis of cable structures under general loadings. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2013;(73):11–19. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2013.05.002>
31. SP 17.13330.2017. *Krovli. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIiP II-26-76* [The roofs. SNIiP II-26-76]. Moscow; 2017. (In Russ.)
32. SP 20.13330.2016. *Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIiP 2.01.07-85** [Loads and impacts. SNIiP 2.01.07-85*]. Moscow; 2016. (In Russ.)
33. Polák M., Plachý T. Determination of Forces in Roof Cables at Administrative Center Amazon Court. *Procedia Engineering*. 2012;(48):578–582. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.556>
34. Kmet S., Tomko M., Soltys R., Rovnak M., Demjan I. Complex failure analysis of a cable-roofed stadium structure based on diagnostics and tests. *Engineering Failure Analysis*. 2019;(103):443–461. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.051>
35. Kuzhakhmetova E.R. Deformation of guys under different loading conditions. *News of Kaliningrad State Technical University*. 2019;(52):154–168. (In Russ.)
36. Kuzhakhmetova E.R. Deformation of guys under different loading conditions. *Advanced technologies, machines and mechanisms in mechanical engineering and construction: Materials of the VI International Baltic Sea Forum 2018* (Kaliningrad, September 3–6, 2018). 2018;6: 129–140. (In Russ.)
37. Sutyurin V.I. Economical methods for solving finite element systems modeling complex structures. *News of universities. Engineering*. 2000;(5–6):47–51. (In Russ.)
38. Sutyurin V.I. Opportunities for increasing the efficiency of the finite element method in the design of structures. *Sudostroyeniye*. 2003;(6):9–13. (In Russ.)