

УДК539.3

Прочностной расчет большепролетного комбинированного вантового покрытия на упругоподатливом контуре

Ленда А.В., аспирант, **Лисицын Б.М.**, д.т.н., **Цыхановский В.К.**, д.т.н.

ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского», Украина

Анотація. Проведено дослідження напружено-деформованого стану комбінованого висячого покриття. Представлені результати і аналіз чисельних розрахунків.

Аннотация. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния комбинированного висячего покрытия. Представлены результаты и анализ численных расчетов.

Abstract. The research of the stress-and-strain state of the combined guy shell is provided. The results and analysis of numerical calculations are presented.

Ключевые слова: комбинированное покрытие, трубобетонный контур, ванты, напряженно-деформированное состояние, метод конечных разностей, метод конечных элементов.

Введение. На современном этапе при строительстве общественных и производственных зданий широко используются вантовые комбинированные покрытия [1, 2]. К таким покрытиям относят системы, в которых основные несущие конструкции, перекрывающие пролет, работают на растяжение. Основным несущим элементом висячих конструкций, воспринимающим нагрузки в пролете, может быть нить, которая сопротивляется только растяжению (гибкая нить) или растяжению и изгибу (жесткая нить). Основные положения расчета таких элементов конструкции изложены в работах [3 – 5]. Гибкие нити, называемые вантами, выполняются, как правило, из стальных спиральных канатов – тросов, пучков и прядей высокопрочной проволоки, арматурных стержней. В качестве жестких нитей обычно применяются прокатные профили и составные сечения (сквозные и сплошностенчатые). Если в покрытия одновременно включаются гибкие нити и жесткие элементы, способные воспринимать усилия сжатия или изгиба, то такие системы называются комбинированными.

В состав висячих покрытий входят также опорные конструкции, которые кроме вертикальных нагрузок должны воспринимать горизонтальные силы натяжения висячих пролетных конструкций – т.е. воспринимать распор. Эта особенность значительно усложняет и делает более тяжелой конструкцию опорной части. Опорные конструкции висячих покрытий выполняют стальными или железобетонными. Основным способом восприятия распора является передача его на основание через оттяжки и

анкерные фундаменты, устройство замкнутого в плане опорного контура в уровне покрытия и др. Проектирование вантовых покрытий требует усовершенствования конструктивных решений, методов расчета, учета нелинейности при больших деформациях и условиях работы.

Объект исследования. Однопоясные покрытия с параллельными вантами используются для создания монолитных предварительно-напряженных оболочек. В качестве примера покрытия с параллельными вантами одного направления можно рассмотреть здание общественного назначения пролетом 80 м, длиной 144 м и высотой 19 м (рис. 1).

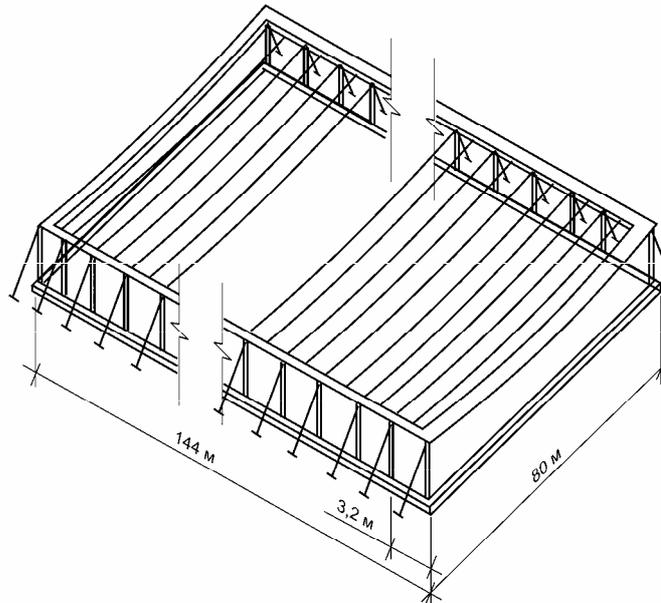


Рис. 1. Схема комбинированного вантового покрытия на упругоподатливом контуре

Ванты расположены с шагом 1,6 м. Покрытие выполнено из сборных железобетонных плит. Стабилизация покрытия достигается созданием монолитной железобетонной оболочки. Сборно-монолитные элементы тонкой железобетонной оболочки представлены в виде плит со спаренными трапециевидными ребрами. Ванты прикрепляются к опорному трубобетонному контуру, установленному на колонны, расположенные с шагом 3,2 м. Распор от пролетной части воспринимается контуром и оттяжками.

При расчетных воздействиях от собственного веса и снеговой нагрузки [6] выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемой конструкции. В качестве расчетных

значений нагрузки от собственного веса покрытия (мягкий ковёр, стяжка асфальтобетонная, утеплитель, пароизоляция, цементная стяжка, плита бетонная с ребрами, подвесное оборудование для электроосвещения) принято 379 кг/м^2 , а снеговой – 157 кг/м^2 .

Методы исследования. Расчет комбинированного вантового покрытия на упругоподатливом контуре представляет собой сложную, сильнонелинейную задачу. Для расчета таких конструкций в последнее время наряду с классическими аналитическими методами стали широко применяться численные методы, ориентированные на максимальное использование вычислительной техники [7]. К таким методам следует отнести метод конечных элементов (МКЭ) [8, 9], метод сеток (метод конечных разностей) [7, 10] и др. МКЭ отличается своей универсальностью, физической наглядностью и высокой алгоритмичностью. Основные соотношения МКЭ получены исходя из первого принципа виртуальной работы, который может быть представлен в общих криволинейных координатах с использованием соотношения нелинейной теории упругости и теории пластического течения. В качестве неизвестных дискретной конечно-элементной модели выступают обобщенные узловое перемещения КЭ в глобальной системе координат. Вводится местная нумерация узлов по каждому направлению, а также сквозная нумерация. В соответствии с процедурой МКЭ функции деформации и напряжений раскладываются в ряд Маклорена в центре конечного элемента. Для решения системы полученных нелинейных уравнений используется специальный алгоритм, который построен на комбинации методов продолжения по параметру возмущения и Ньютона-Конторовича.

Эффективным численным методом для определения напряженно-деформированного состояния вантовых конструкций является метод конечных разностей. Суть метода состоит в следующем. Область непрерывного изменения аргументов заменяется дискретным множеством точек (узлов), которое называется сеткой или решёткой. Вместо функции непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определённые в узлах сетки и называемые сеточными функциями. Производные, входящие в дифференциальное уравнение и граничные условия, заменяются разностными производными, при этом краевая задача для дифференциального уравнения заменяется системой линейных или нелинейных алгебраических уравнений (сеточных или разностных уравнений). Такие системы часто называют разностными схемами. Эти схемы решаются относительно неизвестной сеточной функции. Для рассматриваемого класса задач в работе [11] приведены уравнения равновесия для определения напряженно-деформированного состояния нитей при произвольном нагружении в пространстве с использованием метода конечных разностей.

В настоящей работе с помощью вышеописанных численных методов выполнен прочностной расчет большепролетного комбинированного вантового покрытия на упругоподатливом контуре. Определено напряженно-деформированное состояние конструкции (начальная и деформированная форма, напряжения и усилия в вантах, а также тангенциальные и поперечные изгибающие моменты в опорном контуре). Выполнено сравнение результатов НДС вантового покрытия, полученных с помощью МКЭ и метода конечных разностей. Сопоставление результатов, полученных с помощью обоих методов, свидетельствует о хорошем согласовании численных решений напряженно-деформированного состояния. Для некоторых частных случаев закрепления вант и условий их работы проведено сопоставление результатов с аналитическими решениями, полученными в работе [12].

Результаты расчета. Выполнен расчет большепролетного комбинированного покрытия пологой цилиндрической формы на упругоподатливом контуре. В качестве основных параметров напряженно-деформированного состояния рассматриваются перемещения узловых координат ванты в местах прикрепления к опорному контуру, закрепленного на колонне, форма нити в начальном и деформированном состоянии, напряжения и усилия в вантах, а также тангенциальные и поперечные изгибающие моменты в опорном контуре.

Для восприятия распора в опорном контуре в местах установки колонн предусмотрены раскосы в виде анкерных стержней. Для точек опорного контура, в которых размещается раскос, в качестве расчетной схемы конструкции выбирается нить, шарнирно прикрепленная к опоре. В промежуточных точках опорного контура, в которых возможны его деформации, в качестве расчетной схемы конструкции выбирается нить, упруго прикрепленная к контуру. Условия работы рамно-вантовой конструкции предусматривают в местах опирания на колонны упругоподатливые связи с единичной жесткостью, равной $5 \cdot 10^3$ кг/см.

На основании полученных данных проведен анализ изменения формы тяжелой нити в деформированном состоянии при двух различных расчетных схемах:

- при шарнирно-неподвижном закреплении контура;
- при упругоподатливом закреплении контура.

Некоторые из полученных численных результатов расчета задачи нелинейного деформирования комбинированного вантового покрытия при симметричном нагружении для описанных расчетных схем приведены в таблицах 1, 2.

Таблиця 1

Координаты начальной и деформированной формы нити и величины перемещений с учетом шарнирно-неподвижного закрепления

№ точек	Координаты точек начальной формы, см		Координаты точек деформированной формы, см		Перемещения, см	
	Z, см	X, см	Z, см	X, см	W, см	U, см
1	2	3	4	5	6	7
1	1600,00	0,00	1508,90	0,00	91,10	0,00
2	1603,10	395,10	1512,80	396,10	90,21	1,00
3	1612,00	790,10	1524,60	792,10	87,43	1,93
4	1627,10	1185,00	1544,30	1187,70	82,80	2,74
5	1648,10	1579,50	1571,30	1582,90	76,34	3,36
6	1675,10	1973,10	1607,00	1977,40	68,09	3,72
7	1708,10	2367,40	1650,10	2371,20	58,08	3,77
8	1747,10	2760,60	1700,80	2764,10	46,35	3,45
9	1792,10	3153,20	1759,20	3155,90	32,95	2,71
10	1843,10	3545,00	1825,20	3546,50	17,93	1,50
11	1900,00	3936,00	1899,10	3935,70	0,89	0,33
12	1900,00	3967,00	1900,00	3967,00	0,00	0,00
13	1900,00	4000,00	1900,00	4000,00	0,00	0,00
14	1900,00	4033,00	1900,00	4033,00	0,00	0,00

В силу симметричности рассматриваемой конструкции и нагружения в табл. 1 приведены координаты точек Z, X половины нити от середины (точка 1) до опорного контура (точка 11) и точки, расположенные на опорном контуре (точки 12 – 14) в начальном и деформированном состояниях (столбцы 2 – 5). Столбцы 6 и 7 табл. 1 характеризуют перемещения точек нити в вертикальном и горизонтальном направлениях. Следует заметить, что при шарнирном опирании на опорном контуре перемещения равны 0.

На рис. 2 показаны начальная и деформированные формы вант при шарнирном и упругом опирании. Заметим, что в случае шарнирно-неподвижного закрепления опор форма деформирования имеет меньшую стрелу провисания по сравнению с упругоподатливым закреплением.

Следует отметить, что все графики качественно не изменяют форму конструкции – она остается цилиндрической поверхностью и описывается уравнением окружности в системе декартовых координат, начало которой расположено в центрах, лежащих на перпендикуляре, проведенном в центре пролета нити.

В таблице 2 приведены результаты численных расчетов (координаты точек начальной и деформированной формы, перемещения по вертикали) при упругом закреплении нити. Полученные результаты свидетельствуют, что перемещения точек опорного контура (№ 11-14) характеризуют его незначительные деформации.

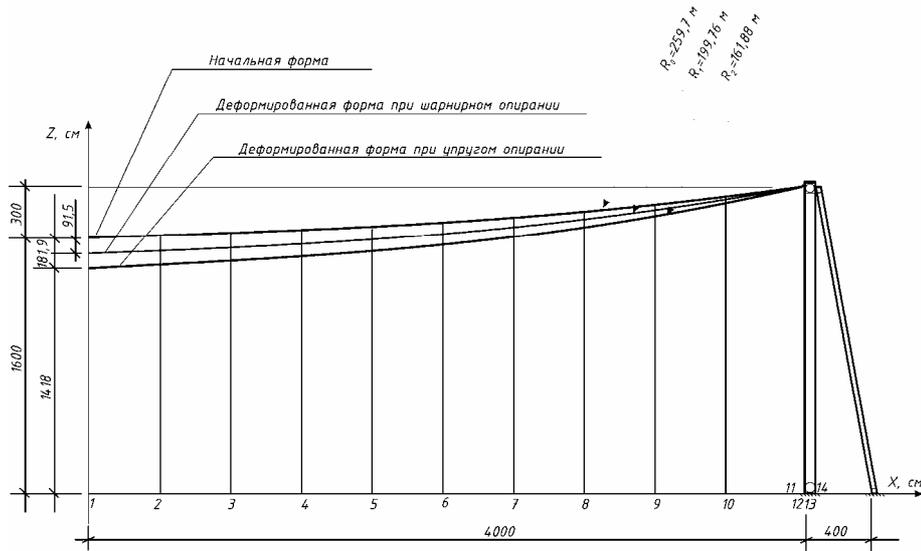


Рис. 2. Формы деформирования нити

Таблица 2

Координаты начальной и деформированной формы нити и величины перемещений с учетом упругости закрепления контура

№ точек	Координаты точек начальной формы, см	Координаты точек деформированной формы, см	Перемещения W , см
1	1600,00	1418,00	181,99
2	1603,10	1422,90	180,11
3	1612,00	1437,60	174,45
4	1627,10	1462,00	165,06
5	1648,10	1496,10	151,96
6	1675,10	1539,90	135,22
7	1708,10	1593,20	114,91
8	1747,10	1656,00	91,11
9	1792,10	1728,20	63,92
10	1843,10	1809,60	33,46
11	1900,00	1899,00	1,05
12	1900,00	1900,00	0,051
13	1900,00	1900,00	0,025
14	1900,00	1900,00	0,0005

В качестве тестовой рассмотрена задача о деформировании нити (рис. 3), расположенной на шарнирно-неподвижных опорах, результаты которой приведены в работе [12]. В ней показано, что при расчете гибких однородных нитей в поле тяжести при малых стрелах провисания, когда

натяжение троса достаточно велико, необходимо учитывать растяжение тяжелой нити. Деформированная форма полой нити практически совпадает с формой параболы или окружности.

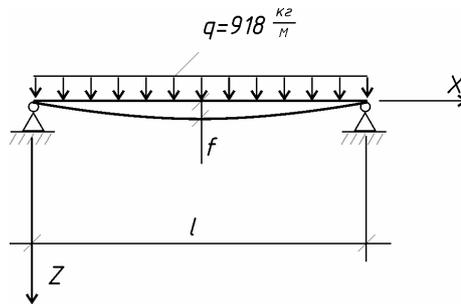


Рис. 3. Расчетная схема положения нити в деформированном состоянии

Для определения удлинения нити ΔL и горизонтальной составляющей максимального натяжения H_{\max} используются формулы, приведенные в [12]. При принятых геометрических параметрах $l = 78,72$ м и $f = 3,0$ м имеем значение длины недеформированной нити $L_0 = 79,025$ м.

В первом приближении определен максимальный распор $H_{\max} = 139500$ кг, длина нити после деформирования $79,175$ м, а затем уточнена стрела провисания

$$f^* = 3,66 \text{ м} \quad (f^* = \sqrt{\frac{3 \cdot l \cdot (L - L_0)}{8}}), \text{ распор } H_{\max}^* = 183000 \text{ кг}$$

и длина нити $L^* = 79,215$ м. В результате сравнения получено, что разница по деформациям составляет 0,05 %, а по распору – 3,3 %.

Хорошее совпадение численных и аналитических результатов объясняется тем, что конструкция ванты соответствует полой тяжелой нити и изгибающие напряжения при шарнирно-неподвижном закреплении контура составляют 1,6 % от мембранных, а при упругоподатливом 4,6 %, т.е. в пределах точности задания исходных данных.

Для определения максимальных напряжений в опорном контуре от косоугольного изгиба используем формулу

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{F_0} \pm \frac{M_{\max}^{(ig)}}{W_y} \pm \frac{M_{\max}^{(p)}}{W_x},$$

где W_x, W_y – моменты сопротивления рассматриваемого сечения.

При заданних значеннях параметрів $W_x = 1,6 \cdot 10^4 \text{ см}^3$, $W_y = 1,64 \cdot 10^4 \text{ см}^3$ и $F_0 = 1585,4 \text{ см}^2$ имеем максимальное напряжение в контуре $\sigma_{\max} = 167,5 \text{ кг/см}^2$, которое значительно меньше допускаемого 286 кг/см^2 (для бетона марки В35). Отметим, что напряжения растяжения в сечении конструкции трубобетона воспринимаются металлическими элементами.

С использованием полученных численных результатов выполнен расчет колонн рассматриваемого сооружения в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 4.

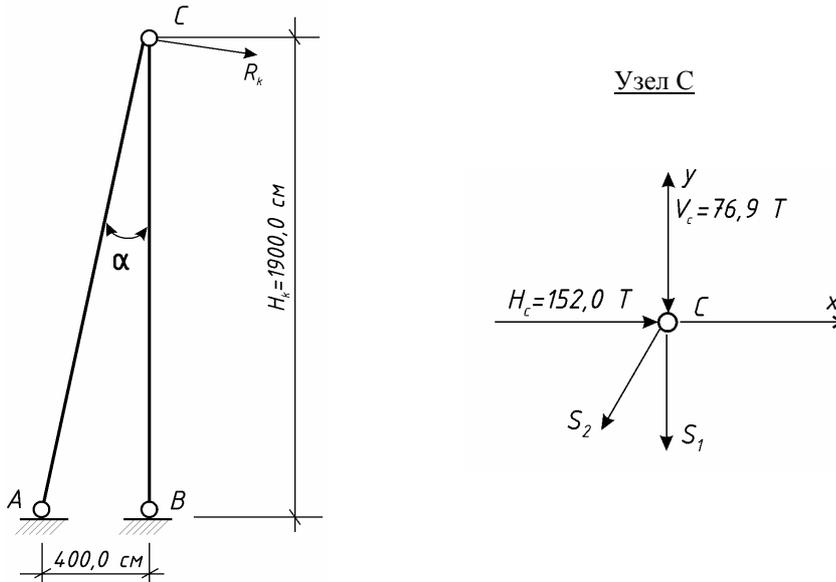


Рис. 4. Расчетная схема опорной рамы конструкции покрытия

Рассмотрев равновесие узла C ($\alpha = 0,207 \text{ рад} \approx 11,9^\circ$), получены искомые значения расчетных усилий в анкерном стержне $S_2 = 765,0 \text{ т}$ и колонне $S_1 = 826,6 \text{ т}$. Выполнен расчет колонны на центральное сжатие под действием соответствующего расчетного усилия. В качестве геометрических параметров сечения колонны и ее физико-механических характеристик принято: длина (высота) колонны $l_0 = 19,0 \text{ м}$; сечение колонны $800 \times 800 \text{ мм}$; материал – железобетон; сталь класса А300 (А-II); бетон класса В40; $F_a = 147,8 \text{ см}^2$. Армирование колонны принято конструктивно $24\varnothing 28 \text{ А300 (А-II)}$ (рис. 5).

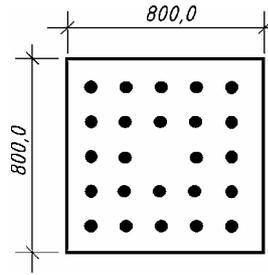


Рис. 5. Армирование сечения ж/б колонны

Расчет центрально-сжатой колонны выполняется с определением предельной продольной силы, которая может быть воспринята сечением центрально-сжатого элемента с поперечной арматурой в виде хомутов: $N_n \leq [N]$. Для определения приведенной расчетной продольной силы

имеем формулу $N_n = \frac{N_{ол}}{m_{ол}}$, где $N_{ол} \approx S_1$; $m_{ол}$ – коэффициент, учитывающий влияние длительного действия нагрузки (табл. 4.4 в [13]) – $m_{ол} = 0,74$.

С учетом полученных значений имеем $N_n = \frac{826,6}{0,74} = 1117,0$ т.

В соответствии с [13] $[N] = \phi \cdot (R_{np} \cdot F + R_{a.c.} \cdot F_a)$, где ϕ – коэффициент предельного изгиба, принимаемый по табл. 4.4, ($\phi = 0,73$), R_{np} – призматическая прочность бетона соответствующего класса ($R_{np} = R_b = 173,0$ кг/см² для бетона класса В30; $F = 6400,0$ см²; $R_{a.c.} = 3000,0$ кг/см² для класса стали А300 (А-II)), имеем $F_a = 141,0$ см². Принимаем 24Ø28 А400С (А-III) $F_a = 147,8$ см². При расчете анкерного стержня на растяжение при действии усилия $765,0 \times 10^3$ кг принят прокат С46/33, для которого требуемая площадь сечения определяется по формуле $F_{np} = \frac{R^a}{m_c \cdot \sigma_y}$, где

$\sigma_y = 2900,0$ кг/см²; m_c – коэффициент условий работы, равный 0,9. Тогда при $F_{np} = 293,0$ см² принимаем широкополочный профиль двутавра № 40Т7 с площадью сечения $F_1 = 298,0$ см².

Выводы

Разработанная методика позволила определить параметры НДС (перемещения, напряжения и деформации) сооружения, а также выполнить расчет основных несущих элементов (колонны, анкерного стержня), удовлетворя-

ющих условиям прочности. Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния рассматриваемой комбинированной конструкции показал высокую сходимость результатов численных исследований. Следует заметить, что использование методик, основанных на двух различных методах строительной механики (метод конечных элементов и метод конечных разностей), позволило провести качественное и количественное сравнение результатов решения поставленной задачи и продемонстрировать эффективность их применения для расчета рассматриваемого класса задач.

Литература

- [1] Кирсанов Н.М. Висячие покрытия производственных зданий. – М.: Стройиздат, 1990. – 127 с.
- [2] Шимановский А.В., Цыхановский В.К. Теория и расчет сильнолинейных конструкций. – К.: Сталь, 2005. – 432 с.
- [3] Качурин В.К. Теория висячих систем. – Л.-М.: Госстройиздат, 1962. – 234с.
- [4] Шимановский В.Н., Соколов А.А. Расчет висячих конструкций за пределом упругости. – К.: Будівельник, 1975. – 104 с.
- [5] Теоретические и экспериментальные исследования новейших систем висячих покрытий//Сборник трудов под ред. Н.С. Москалева. – М.: Стройиздат, 1981. – 136 с.
- [6] ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 75 с.
- [7] Шимановский А.В., Лисицын Б.М. Моделирование строительных конструкций. – К.: Сталь, 2006. – 724 с.
- [8] Баженов В.А., Сахаров А.С., Цыхановский В.К. Моментная схема метода конечных элементов в задачах нелинейной механики сплошной среды // Прикладная механика. – К: Ин-т механики НАН Украины, 2002, – Т.38(48), № 6, июль. – С. 24–63.
- [9] Баженов В.А., Цыхановський В.К., Кислоокій В.М. Метод скінчених елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок. – К.: КНУБА, 2000. – 386 с.
- [10] Варвак П.М., Варвак Л.П. Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1977. – 160 с.
- [11] Ленда Г.В., Лисицин Б.М. Новий підхід до побудови теорії розрахунку висячих систем скінченної жорсткості//Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2008. – № 2. – С. 18-23.
- [12] Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
- [13] СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Госстрой СССР, 1989. – 771 с.

Надійшла до редколегії 02.03.2009 р.