

## Деформативность мягкой оболочки тентовых конструкций шедового типа

*А.В. Чесноков, В.В. Михайлов*

*Липецкий государственный технический университет, Липецк*

**Аннотация:** В статье рассмотрены каркасно-тентовые конструкции покрытия шедового типа на прямоугольном плане, состоящие из ряда секторов, ограниченных опорными рёбрами арочной формы. Секторы заполнены преднапряженной мягкой оболочкой. Выполнен статический анализ оболочки с учетом геометрической нелинейности, на действие снеговых и ветровых нагрузок, при вариации основных размеров оболочки и величины её предварительного напряжения. Количественная оценка деформаций оболочки осуществлена при помощи т.н. показателя деформативности, являющегося обратной величиной относительно прогибу. Предложена функциональная зависимость для аппроксимации показателя деформативности мягкой оболочки, которая может быть использована в инженерных расчетах на стадии разработки проектных решений тентовых конструкций. Коэффициенты функциональной зависимости найдены методом наименьших квадратов. Предложены рекомендации по назначению основных параметров тентовых конструкций шедового типа.

**Ключевые слова:** тентовая конструкция, конструкция покрытия, мягкая оболочка, шедовое покрытие, геометрические параметры, преднапряжение, деформативность, аппроксимация.

Конструкции строительные тентовые являются эффективным решением для применения в зданиях общественного назначения, включая временные сооружения сезонного характера [1-3]. Мягкая оболочка тентовой конструкции ограждает перекрываемый объем здания от воздействия Солнечной радиации и атмосферных осадков. Выполняя функции гибких связей по покрытию, оболочка способствует предотвращению потери устойчивости сжатых элементов несущего каркаса [4].

Мягкая оболочка, работающая только на растяжение, предварительно напрягается для обеспечения восприятия знакопеременных внешних воздействий [5-7]. Создание растягивающих напряжений производится элементами, поддерживающими оболочку в проектном положении. Особенности проектирования, изготовления и предварительного напряжения

мягких оболочек, проанализированы в работах [8-10]. Вопросы, касающиеся надежности эксплуатации тентовых конструкций освещены в [11].

Исследование работы под нагрузкой мягких оболочек и снижение их деформативности является важной задачей, способствующей расширению области эффективного применения тентовых конструкций.

Рассмотрена каркасно-тентовая конструкция шедового типа, состоящая из секторов мягкой оболочки. Конструкция предназначена для покрытия прямоугольных в плане зданий и сооружений. Секторы расположены между основными ребрами арочной формы, лежащими в вертикальных параллельных плоскостях. Нити основы оболочки ориентированы перпендикулярно несущим аркам. Нити утка, в свою очередь, расположены параллельно аркам, поперек перекрываемого пролета.

Статический анализ исследуемой конструкции выполнен при помощи специализированного программного комплекса EASY.2020, позволяющего производить расчет мягких оболочек с учетом геометрической нелинейности [12]. Расчетная схема оболочки принята в виде конечно-элементной сети, опирающейся на неподвижные ребра и напрягаемой при помощи тросов-подборов и стабилизирующего троса (рис. 1).

Для исследования приняты оболочки шириной  $B_s$  равной 3.0, 4.5, 6.0, 7.5, 9.0 и 12.0 м, пролётом  $L_a^s$ , равным 12.0, 24.0, 36.0 и 60.0 м (рис. 2). Пролёт стабилизирующего троса принят в зависимости от пролета основных арочных ребер:

$$L_f = L_a^s + \Delta_L, \quad (1)$$

где  $\Delta_L$  - размер, определяющий вынос тентового покрытия за габариты опорных конструкций:  $\Delta_L = k_{\Delta L} \cdot B_s$ , где  $k_{\Delta L}$  - коэффициент, равный 0.5.

Приняты следующие варианты предварительного напряжения оболочки:  $P_{r,1} = 1.0$ ,  $P_{r,2} = 5.5$  и  $P_{r,3} = 10.0$  кН/м.

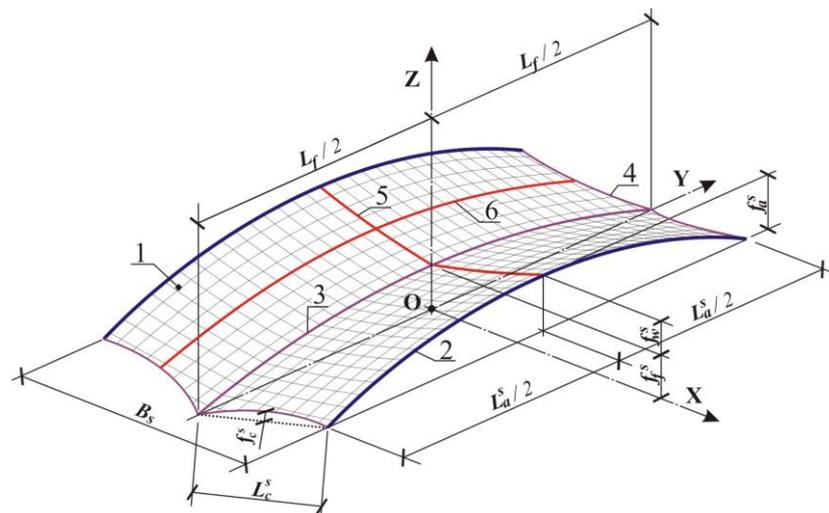


Рис. 1. - Сектор тентовой конструкции покрытия шедового типа:  
1 – мягкая оболочка; 2 – основное арочное ребро; 3 – стабилизирующий трос;  
4 – трос-подбор; 5, 6 - направления «основы» и «утка» мягкой оболочки

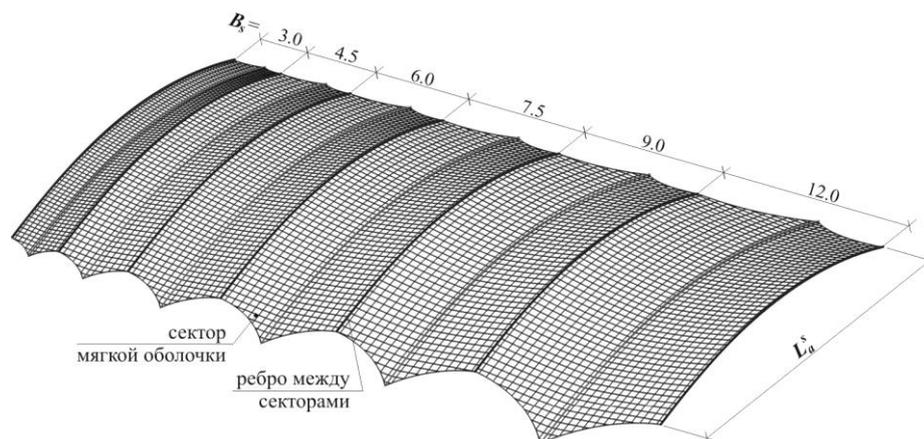


Рис. 2. - Общий вид секторов шедового типа на прямоугольном плане, подлежащих исследованию

Относительные стрелы арочных ребер  $k_a^s = f_a^s / L_a^s$ , стабилизирующих тросов  $k_f^s = f_f^s / L_f$  и тросов-подборов  $k_c^s = f_c^s / L_c^s$ , а также, относительная стрела нитей основы оболочки  $k_w^s = f_w^s / B_s$ , приняты равными 1/12. Обозначение геометрических размеров приведено на рис. 1. Мягкая оболочка покрытия принята из тентового материала, имеющего следующие жёсткости в направлении основы и утка:  $E_w = 1200$  и  $E_f = 800$  кН/м, соответственно.

Учтены следующие внешние нагрузки на оболочку (рис. 3):

- ветровая нагрузка  $W$  интенсивностью  $0.5 \text{ кН/м}^2$ ;
- равномерное снеговое воздействие  $Sn_1$  интенсивностью  $1.8 \text{ кН/м}^2$  по всей площади горизонтальной проекции сектора мягкой оболочки;
- снеговая нагрузка  $Sn_2$  интенсивностью  $1.8 \text{ кН/м}^2$  на половине ширины сектора оболочки;
- снеговая нагрузка  $Sn_3$  интенсивностью  $1.8 \text{ кН/м}^2$  на половине пролета.

Ветровая нагрузка приложена по нормали в каждой точке поверхности.

Снеговые нагрузки действуют вертикально в направлении сверху-вниз.

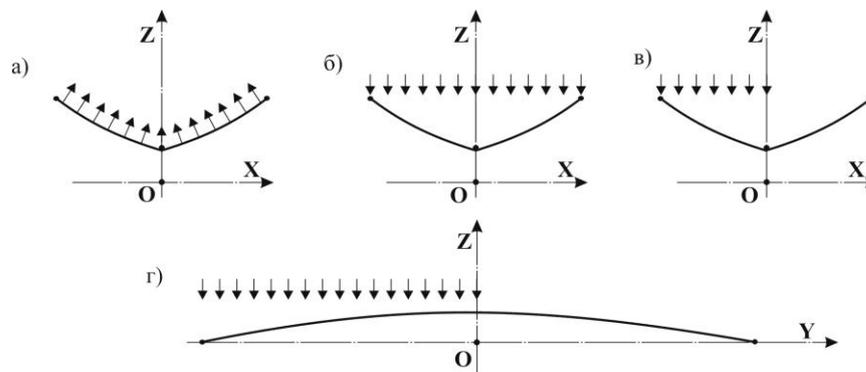


Рис. 3. - Внешние нагрузки на сектор мягкой оболочки покрытия: а) ветровая нагрузка  $W$ , б) снеговая нагрузка  $Sn_1$ , в) снеговая нагрузка  $Sn_2$ , г) снеговая нагрузка  $Sn_3$

Количественную оценку оболочки, находящейся под действием внешних нагрузок, предлагается осуществлять при помощи т.н. показателя деформативности  $\delta$ :

$$\delta = B_s / \Delta_{\max}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{\max}$  - максимальное по модулю значение вертикальных перемещений узлов конечно-элементной сети, моделирующей оболочку.

Предлагается следующая функциональная зависимость для аппроксимации показателя деформативности мягких оболочек исследуемых тентовых конструкций:

$$\delta(B_s, P_r, L_a^s) = k_{1,2} \cdot \frac{P_r}{B_s} + k_1 \cdot \frac{1}{B_s} + k_2 \cdot P_r + k_3 \cdot L_a^s + k_0, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициенты,  $L_a^s$  и  $B_s$  – пролёт и ширина сектора,  $P_r$  – предварительное напряжение оболочки.

Коэффициенты функции (3), полученные методом наименьших квадратов, сведены в таблицу 1. Для оценки точности аппроксимации используется функция усредненной относительной ошибки:

$$\lambda(G, \delta) = \frac{200}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|G_i - \delta_i|}{G_i + \delta_i} \%, \quad (4)$$

где  $N = 72$  – количество рассматриваемых комбинаций факторов  $\vec{X}_i = (B_s, P_r, L_a^s)^T$ .

Графики показателя деформативности оболочек приведены на рис. 4. Сплошными линиями обозначены показатели деформативности  $G_i$ , полученные в результате геометрически нелинейного статического анализа оболочек в программном комплексе EASY.2020, а пунктирными линиями – показатели деформативности  $\delta_i$ , полученные применением аппроксимирующей функции (3).

Таблица №1

Результаты аппроксимирования показателя деформативности мягких оболочек тентовой конструкции шедового типа при помощи функциональной зависимости

№ п.п.	Нагрузка	Коэффициенты функции (3)					Ошибка $\lambda$ , %, (4)
		$k_{1,2}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_0$	
1.	Ветровая, $W$	41.677	-3.2869	-0.6895	-0.7388	44.681	7.9
2.	Снеговая, $Sn_1$	9.9827	73.6384	0.2048	-0.1334	17.9087	4.8
3.	Снеговая, $Sn_2$	11.0601	47.4199	0.0944	-0.1161	22.3356	3.4
4.	Снеговая, $Sn_3$	8.339	76.4016	0.2734	-0.1197	17.9429	4.3

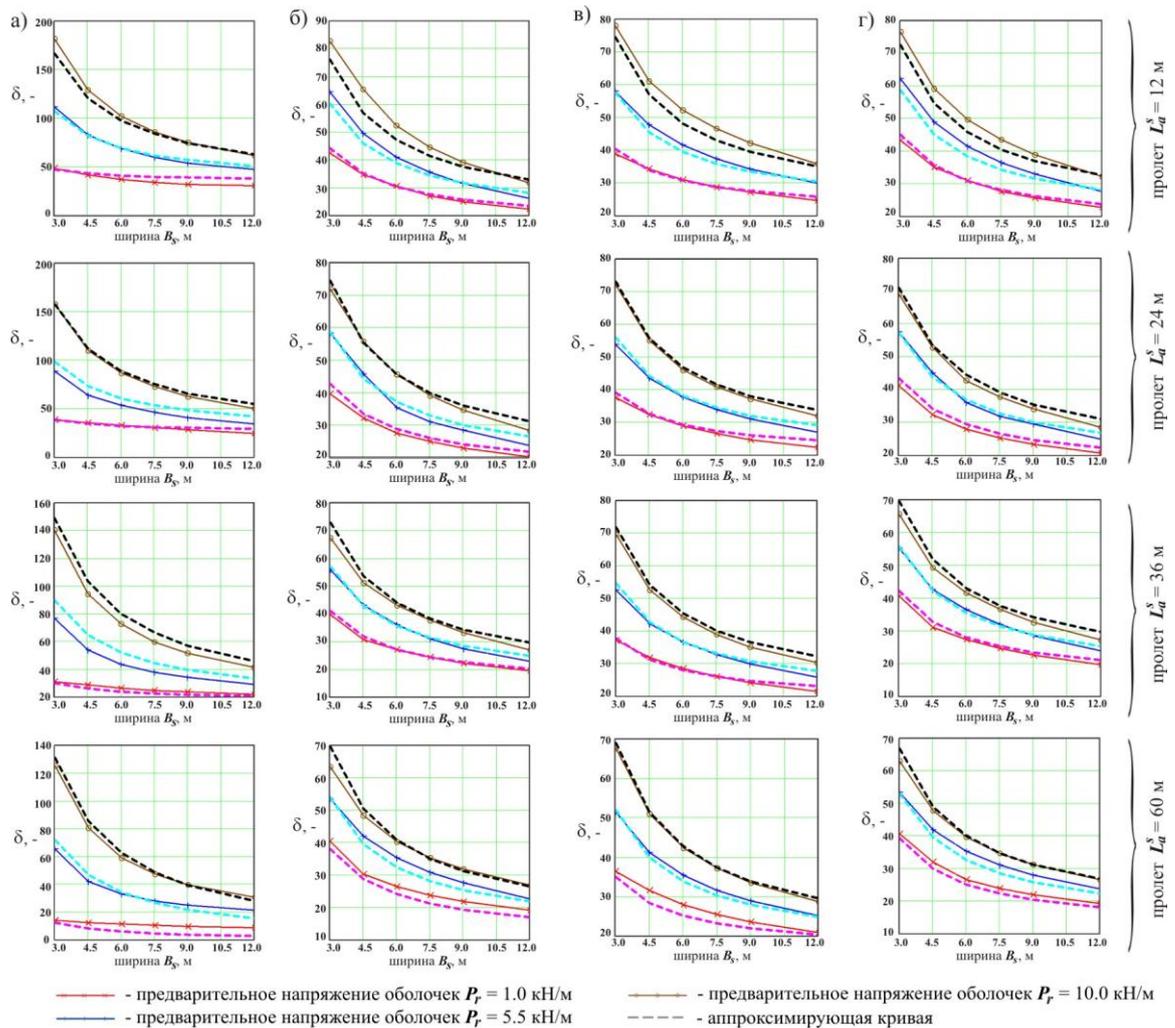


Рис. 4. - Показатели деформативности мягких оболочек: а) ветровая нагрузка  $W$ , б) снеговая нагрузка  $Sn_1$ , в) снеговая нагрузка  $Sn_2$ , г) снеговая нагрузка  $Sn_3$

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Влияние пролета оболочек  $L_a^s$  на деформативность меньше, по сравнению с влиянием преднапряжения  $P_r$  и ширины  $B_s$ , а оболочки работают по т.н. «короткому направлению».

2. Влияние неравномерных снеговых нагрузок  $Sn_2$  и  $Sn_3$  на оболочку более неблагоприятно с точки зрения роста деформаций, чем действие равномерной нагрузки от снега по всей площади покрытия  $Sn_1$ .

3. Областью преимущественного применения оболочек шедового типа на прямоугольном плане являются здания и сооружения сезонной эксплуатации. Для пролета  $L_a^s = 12$  м рекомендуется применение оболочек шириной  $B_s \in [3.0...12.0]$  м при предварительном напряжении,  $P_r$ , не ниже 5.5 кН/м. Для пролета  $L_a^s = 24$  м и предварительном напряжении  $5.5 \leq P_r < 10.0$  кН/м рекомендуется применение оболочек шириной  $B_s \in [3.0...6.0]$  м, а при предварительном напряжении  $P_r \geq 10.0$  кН/м - шириной  $B_s \in [3.0...12.0]$  м. Для пролета  $L_a^s = 36$  м ширину оболочек следует ограничить диапазонами  $B_s \in [3.0...4.5]$  м и  $B_s \in [3.0...9.0]$  м при предварительных напряжениях  $5.5 \leq P_r < 10.0$  кН/м и  $P_r \geq 10.0$  кН/м, соответственно. Для пролета  $L_a^s = 60$  м рекомендуется применение оболочек шириной  $B_s = 3.0$  м при  $5.5 \leq P_r < 10.0$  кН/м и шириной  $B_s \in [3.0...6.0]$  м при предварительном напряжении  $P_r \geq 10.0$  кН/м.

4. При наличии снеговой нагрузки рекомендуется применять оболочки шириной  $B_s \in [3.0...6.0]$  м для пролета  $L_a^s = 12$  м и  $B_s \in [3.0...4.5]$  м для пролета  $L_a^s = 24$  м, при предварительном напряжении  $P_r$  не ниже 10 кН/м.

5. Полученные аппроксимирующие зависимости для показателей деформативности мягкой оболочки близко соответствуют результатам геометрически нелинейного конечно-элементного анализа. Они могут быть использованы в инженерных расчетах на стадии разработки проекта.

### Литература

1. Llorens J., Zanelli A. Structural membranes for refurbishment of the architectural heritage // Procedia Engineering. 2016. № 155. pp. 18-27. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.003
2. Северин А.В., Петрова В.С., Коробкова А.А. Применение структурных мембран в реконструкции исторических зданий // Инженерный вестник Дона, 2019, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5789

3. Любин Н.С., Герасимова В.О., Северин А.В. Строительные мембраны, используемые в современных фасадах зданий // Инженерный вестник Дона, 2019, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5688](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5688)
  4. Hegyi D. Numerical stability analysis of arch-supported membrane roofs // Structures. 2021. № 29. pp. 785-795. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.11.025
  5. Wagner R. Bauen mit seilen und membranen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. 517 p.
  6. Forster B., Mollaert M. European design guide for tensile surface structures. Brussel: TensiNet, 2004. 354 p.
  7. Seidel M. Tensile surface structures: a practical guide to cable and membrane construction. Berlin: Ernst and Sohn, 2009. 229 p.
  8. Еремеев П.Г. Тентовые мембраны для ограждающих конструкций покрытий над трибунами стадионов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 4. С. 33-36.
  9. Llorens J.I. Appropriate design of structural membranes // X-th International Conference on textile composites and inflatable structures. «Structural membranes». Munich, Germany. 2021. 12 p. DOI: 10.23967/membranes.2021.008
  10. Xu J., Zhang Y., Yu Q., Zhang L. Analysis and design of fabric membrane structures: a systematic review on material and structural performance // Thin-Walled Structures. 2022. №170. Article 108619. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108619
  11. Hu J., Chen W., Qu Y., Yang D. Safety and serviceability of membrane buildings: a critical review on architectural, material and structural performance // Engineering Structures. 2020. Vol. 210. Article 110292. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110292
  12. EASY. Software for form finding, statics and patterning. URL: [technet-gmbh.com/en/products/easy/](http://technet-gmbh.com/en/products/easy/) (дата обращения: 27.05.2024).
-

## References

1. Llorens J., Zanelli A. Procedia Engineering. 2016. № 155. P. 18-27. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.003.
2. Severin A.V., Petrova V.S., Korobkova A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5789
3. Lyubin N.S., Gerasimova V.O., Severin A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5688
4. Hegyi D. Structures. 2021. № 29. pp. 785-795. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.11.025
5. Wagner R. Bauen mit seilen und membranen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. 517 p.
6. Forster B., Mollaert M. European design guide for tensile surface structures. Brussel: TensiNet, 2004. 354 p.
7. Seidel M. Tensile surface structures: a practical guide to cable and membrane construction. Berlin: Ernst and Sohn, 2009. 229 p.
8. Eremeev P.G. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2015. № 4. pp. 33-36.
9. Llorens J.I. Proc. X-th International Conference on textile composites and inflatable structures. «Structural membranes». Munich, Germany. 2021. 12 p. DOI: 10.23967/membranes.2021.008
10. Xu J., Zhang Y., Yu Q., Zhang L. Thin-Walled Structures. 2022. №170. Article 108619. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108619
11. Hu J., Chen W., Qu Y., Yang D. Engineering Structures. 2020. Vol. 210. Article 110292. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110292.
12. EASY. Software for form finding, statics and patterning. URL: technet-gmbh.com/en/products/easy/ (date assessed: 27.05.2024).

**Дата поступления: 30.04.2024**

**Дата публикации: 25.06.2024**

---