

УДК 624(047.2+074.2)

**В. Ф. МУЩАНОВ, А. Н. ОРЖЕХОВСКИЙ, Д. С. КОРОВКИНА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **МЕМБРАННЫЕ СИСТЕМЫ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ С КОНСТРУКТИВНЫМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются мембранные системы покрытий, оболочки положительной Гауссовой кривизны. Выполнен анализ достоинств и недостатков. Приведены основные способы стабилизации мембранных конструкций на круглом и овальном планах. Рассмотрена система безразмерных параметров, позволяющая определять жесткостные характеристики основных несущих элементов преднапряженных мембранных конструкций. Поставлена задача разработать аналогичную систему жесткостных параметров для преднапряженных мембранных конструкций покрытий на круглом плане с учетом совместной работы покрытия и нижерасположенных опорных конструкций. Приведена новая конструктивная форма покрытия, позволяющая конструктивно создавать преднапряжение в опорном контуре оболочки, что способствует снижению материалоемкости системы. Для наиболее рациональной работы материала конструкции предлагается решить оптимизационную задачу проектирования. В качестве параметров оптимизации рассматривается не только масса покрытия, но и масса нижележащих опорных элементов конструкции.

**Ключевые слова:** мембрана, висячее покрытие, стабилизация, преднапряжение, опорный контур.

Висячими называют покрытия, в которых главная несущая пролетная конструкция работает на растяжение. Она может быть образована из стальных стержней, канатов, тросов, прокатных профилей, а также может быть металлической или железобетонной предварительнонапряженной оболочкой.

Мембранное покрытие состоит из пролетной конструкции – мембраны, воспринимающей поперечную нагрузку и работающей в основном на двухосное растяжение, и опорного контура, который воспринимает распор и передает на поддержание конструкции главным образом вертикальную нагрузку.

Висячие покрытия за последние годы нашли широкое применение в спортивных и выставочных сооружениях, гаражах, крытых рынках, городских залах общего назначения, некоторых производственных зданиях и в других сооружениях. Этому способствует ряд преимуществ висячих покрытий перед традиционными конструктивными формами покрытия:

1. Работа несущих конструкций на растяжение, что позволяет полно использовать материал, поскольку несущая способность таких конструкций определяется прочностью, а не устойчивостью.

2. Большое разнообразие архитектурных форм висячих покрытий позволяет применять их для зданий самого различного назначения.

3. Транспортабельность элементов висячих покрытий и почти полное отсутствие вспомогательных подмостей при монтаже делают их достаточно индустриальными.

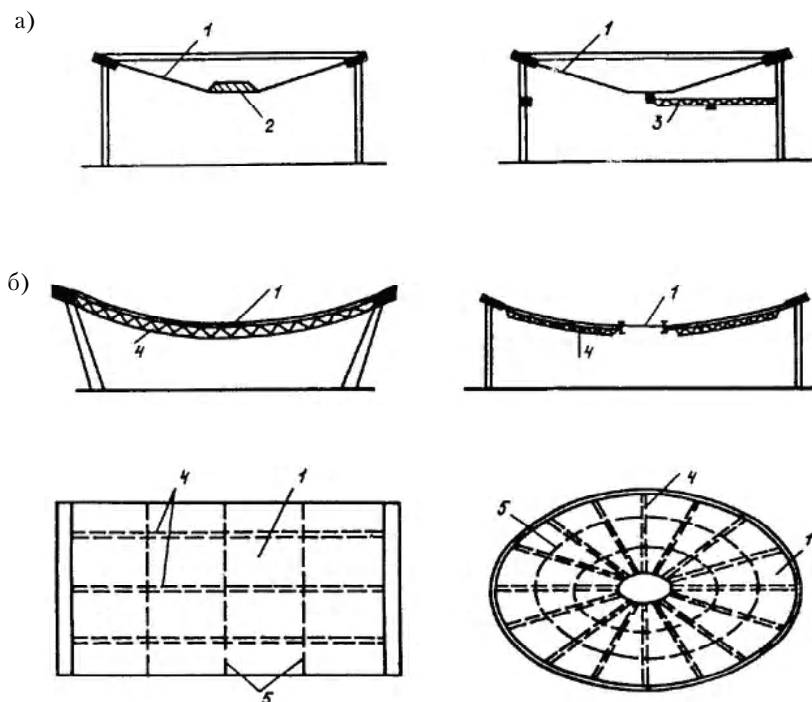
4. Малый собственный вес несущей конструкции и ее повышенная деформативность делают ее сейсмостойкой, так как резко уменьшается сейсмический импульс на конструкцию.

Однако висячие покрытия имеют и недостатки:

1. Висячие системы – системы распорные, и для восприятия распора необходима специальная опорная конструкция, могущая воспринять эти горизонтальные силы; стоимость опорной конструкции может составлять значительную часть стоимости всего покрытия. Желание уменьшить стоимость опорной конструкции повышением эффективности ее работы приводит к преимущественному использованию покрытий круглой, овальной и других непрямоугольных форм плана.

2. К специфическим особенностям висячих покрытий относится их повышенная деформативность. Она обуславливается повышенными упругими деформациями применяемых высокопрочных материалов и особенно тросов, геометрической изменяемостью большинства систем висячих покрытий и горизонтальной деформацией опор, их податливостью в распорных висячих системах.

Для снижения деформативности покрытий висячих конструкций производят их стабилизацию. Существует несколько способов стабилизации покрытия (рис. 1):



**Рисунок 1** – Стабилизация покрытий: а) пригрузом; б) с использованием изгибно-жестких элементов; 1 – мембрана; 2 – пригруз; 3 – кольцевой кран; 4 – основные (продольные или радиальные) ребра; 5 – вспомогательные (поперечные или кольцевые) ребра.

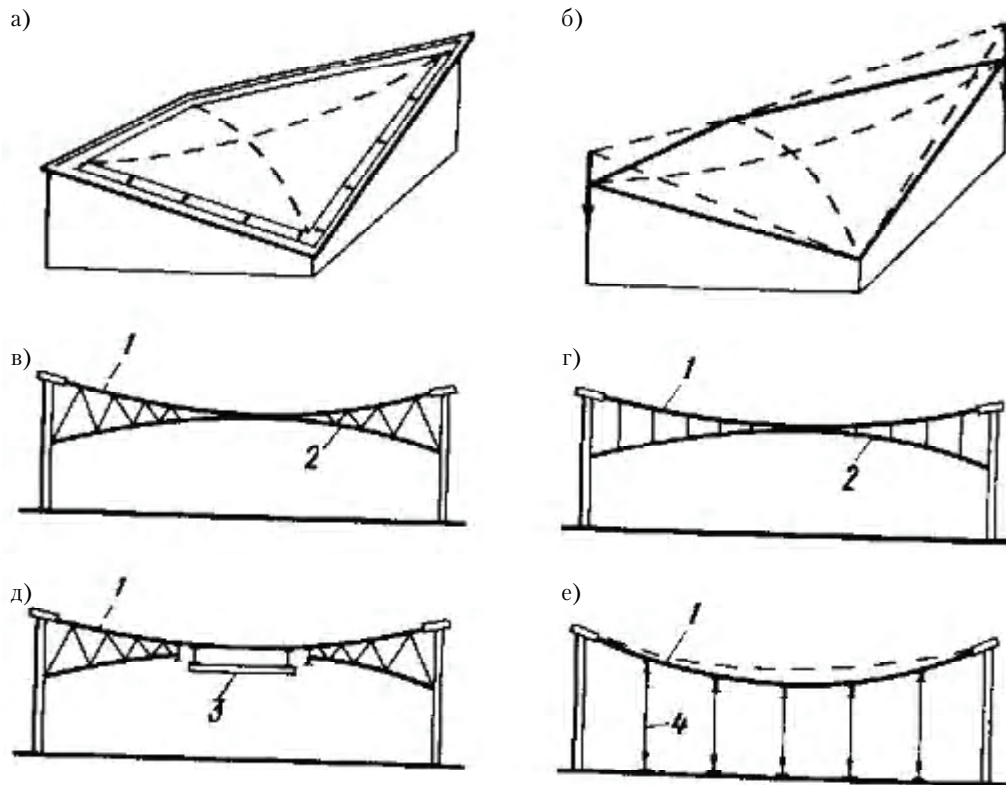
- стабилизация пригрузом;
- стабилизация с помощью изгибно-жестких элементов;
- стабилизация предварительным напряжением;
- стабилизация формой поверхности (отрицательной кривизны) (гиперболические параболоиды).

Наиболее оптимальным способом стабилизации мембранных покрытий является преднапряжение как наиболее рациональный способ с учетом работы материала конструкции (рис. 2). Наиболее разработанными являются методы преднапряжения для оболочек на прямоугольном и овальном планах. Рассмотрим методику преднапряжения мембранной оболочки для круглых планов, как менее изученную.

В достаточной степени подробно разработана инженерная методика непреднапряженных мембранных покрытий на круглом плане, которая зависит от системы безразмерных параметров:

$$\bar{S} = 0,125 \frac{q R}{E t} \left( \frac{R}{f_0} \right)^3; \quad \bar{K} = \frac{(EA)_k}{EtR}; \quad \beta = \frac{q_1}{q_2}, \quad (1)$$

- где  $\bar{K}$  – относительная продольная жесткость контура;  
 $\beta$  – коэффициент, определяющий форму поверхности;  
 $q$  – суммарная равномерно распределенная нагрузка, действующая на покрытие от собственного веса и технологического оборудования, а также от снега;  
 $E$  – модуль упругости материала оболочки и стального контура;  
 $R, f_0, t$  – соответственно радиус покрытия, начальная стрела провиса оболочки и ее толщина;



**Рисунок 2** – Стабилизация покрытий предварительным напряжением: а) притягиванием мембраны к контуру; б) изменением геометрии покрытия; в), г), д) с помощью натяжения вантовых ферм; е) притягиванием поперечных балок к основанию; 1 – мембрана; 2 – стабилизирующие ванты; 3 – центральный пригруз; 4 – оттяжка.

$A$  – площадь поперечного сечения опорного контура;

$q_1, q_2$  – интенсивность трапециевидной нагрузки на радиальный элемент «постели» при монтаже оболочки, включающая, как правило, вес мембранных полотнищ и собственный вес постели.

Используя рекомендуемые значения параметров, можем выйти на необходимые жесткостные характеристики. В рассмотренной системе параметров абсолютно нет предварительного напряжения, так как для таких систем, как правило, использовалась стабилизация с использованием изгибно-жестких элементов.

До 50 % материалоемкости и стоимости всего покрытия в целом составляет расход материала на замкнутый опорный контур. Снижение материалоемкости опорного контура представляется важной и актуальной задачей, которая позволит в целом повысить эффективность используемой конструкции. Президентом академии архитектуры Украины В. Г. Штолько предлагается новая конструктивная форма покрытия, которая представляет из себя: арочные элементы, на которых располагаются трибуны зрелищного объекта; стойки – колонны, которые на необходимую высоту поднимают провисающую оболочку мембранного покрытия с небольшой стрелой провисания; замкнутый опорный контур, который также от основной нагрузки на покрытие испытывает сжимающие усилия, но в силу того, что нижележащие конструкции обладают довольно значительной нагрузкой, может испытывать растяжение. Используя рациональные сочетания размеров колонны, арки и нагрузки можно добиться того, чтобы контур от совокупности всех усилий испытывал практически незначительные сжимающие усилия, так как за счет постоянной нагрузки в нем будут создаваться растягивающие усилия, а от нагрузки собственного веса мембраны, кровли и снеговой нагрузки наоборот сжимающие усилия. Решением оптимизационной задачи можно добиться минимального расхода материала по совокупности всех трех элементов, которые должны дать в конечном итоге эффективную пространственную конструкцию со сниженным расходом материалоемкости этого опорного контура.



Рисунок 3 – Рассматриваемая конструктивная форма покрытия.

### ВЫВОДЫ

1. Для предложенной конструкции существующая система безразмерных параметров проектирования мембранных покрытий на круглом плане должна быть дополнена факторами, учитывающими величину конструктивного предварительного напряжения, создаваемого системой нижележащих конструктивных элементов (геометрические и жесткостные характеристики колонн, полуарок, величина постоянной нагрузки на полуарку).

2. На основе обновленной системы безразмерных параметров должна быть разработана методика расчета и проектирования конструктивно преднапряженного мембранного покрытия на круглом плане.

3. Учитывая, с одной стороны, снижение расхода материала на внешний опорный контур, но с другой стороны – появление дополнительных элементов в виде полуарок и несущих колонн, должна быть решена оптимизационная задача на основе критерия расхода материала на основные несущие элементы системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов, В. И. Мембранные конструкции зданий и сооружений. Справочное пособие в двух частях [Текст] / В. И. Трофимов, П. Г. Еремеев; Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1990. – 248 с.
2. Беленя, Е. И. Металлические конструкции. Специальный курс [Текст] / Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий ; Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов строительных специальностей высших учебных заведений. – М. : Стройиздат, 1982. – 472 с.
3. Основы расчета и проектирования конструкций большепролетных покрытий спортивных сооружений [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Ф. Муцанов, В. И. Корсун, Н. И. Ватин ; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Электрон. текстовые дан. (1 файл : 15,1 Мб). – Санкт-Петербург, 2019. – Загл. с титул. экрана. – Свободный доступ из сети Интернет (чтение, печать, копирование). – Adobe Acrobat Reader 7.0. – <<http://elib.spbstu.ru/dl/2/s19-76.pdf>>. – <<http://doi.org/10.18720/SPBPU/2/s19-76>>.
4. An unsymmetric 8-node hexahedral solid-shell element with high distortion tolerance: Linear formulations [Text] / J. Huang, S. Cen, Z. Li, C.-F. Li // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2018. – Volume 116. – Issue 12–13. – PP. 759–783.
5. Cyclic lateral response of FRP-confined circular concrete-filled steel tubular columns [Text] / Yu. T., Hu Y. M., J. G. Teng // Journal of Constructional Steel Research. – 2016. – Volume 2016. – PP. 12–22.
6. Spatial finite element analysis for dynamic response of curved thin-walled box girder bridges [Electronic resource] / Yinhui Wang, Yidong Xu, Zheng Luo, Haijun Wu and Liangliang Yan // Mathematical Problems in Engineering. – 2016. – Volume 2016. – ID 8460130. – <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8460130>.
7. A Hybrid Interpolation Method for Geometric Nonlinear Spatial Beam Elements with Explicit Nodal Force [Electronic resource] / Huiqing Fang and Zhaohui Qi // Mathematical Problems in Engineering. – 2016. – Volume 2016(2). – Article ID 8980676. – <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8980676>.
8. Modelling a Cracked Beam Structure Using the Finite Element Displacement Method [Electronic resource] / Hui Long, Yilun Liu, Changzheng Huang, Weihui Wu and Zhaojun Li // Shock and Vibration. – 2019. – Volume 2019. – ID 7302057. – <https://doi.org/10.1155/2019/7302057>.

Получено 10.04.2019

В. П. МУЩАНОВ, А. М. ОРЖЕХОВСЬКИЙ, Д. С. КОРОВКИНА  
МЕМБРАННІ СИСТЕМИ ВЕЛИКОПРОЛЬОТНИХ ПОКРИТТІВ З  
КОНСТРУКТИВНИМ ПОПЕРЕДНІМ НАПРУЖЕННЯМ  
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті розглядаються мембранні системи покриття, оболонки позитивної Гауссової кривизни. Виконано аналіз достоїнств та недоліків. Наведені основні способи стабілізації мембранних конструкцій на круглому та овалному планах. Розглянута система безрозмірних параметрів, що дозволяють визначити жорсткісні характеристики основних несучих елементів попереднапружених мембранних конструкцій. Пропонується розробляти аналогічну систему жорсткісних параметрів для переднапружених мембранних конструкцій покриття на круглому плані, з урахуванням спільної роботи покриття та нижчезозташованих опорних конструкцій. Наведена нова конструктивна форма покриття, що дозволяє конструктивно створювати переднапруження в опорному контурі оболонки, що здатне знизити матеріаломісткість системи. Для найбільш раціональної роботи матеріалу конструкції пропонується розв'язати оптимізаційну задачу проектування. За параметри оптимізації розглядається не лише маса покриття, а й маса нижчезозташованих опорних елементів конструкції.

**Ключові слова:** мембрана, висячі покриття, стабілізація, переднапруження, опорний контур.

VOLODYMYR MUSCHANOV, ANATOLY ORZHEKHOVSKY, DARIA KOROVKINA  
LONG-SPAN MEMBRANE COATING SYSTEMS WITH CONSTRUCTIVE  
PRESTRESS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article discusses membrane systems of coatings, shells, and positive Gaussian curvature. The analysis of the advantages and disadvantages. The main methods of stabilizing membrane structures on the round and oval planes are given. A system of dimensionless parameters is considered, which makes it possible to determine the stiffness characteristics of the main bearing elements of non-stressed membrane structures. The task is to develop a similar system of stiffness parameters for pre-stressed membrane structures of coatings on a circular plane, taking into account the joint operation of the coating and the underlying structures. A new structural form of the coating is given, which allows constructively creating prestressing in the support contour of the shell, which helps reduce the material consumption of the system. For the most rational work of the material of construction it is proposed to solve the optimization problem of design. As optimization parameters, we consider not only the mass of the coating, but also the mass of the underlying supporting structural elements.

**Key words:** membrane, hanging coating, stabilization, prestress, support circuit.

**Мущанов Владимир Филиппович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной ассоциации «Пространственные конструкции». Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Оржеховский Анатолий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование действительной работы и показателей надежности стержневых систем в строительстве, численные методы расчета пространственных стержневых конструкций.

**Коровкина Дарья Станиславовна** – студентка ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: изучение особенностей напряженно-деформируемого состояния оболочек.

**Мущанов Володимир Пилипович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки, проректор з наукової роботи ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» і міжнародної асоціації «Просторові конструкції». Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Оржеховський Анатолій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження дійсної роботи і показників надійності стержневих систем у будівництві, числові методи розрахунку просторових стержневих конструкцій

**Коровкіна Дар'я Станіславівна** – студентка ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вивчення особливостей напружено-деформованого стану оболонок.

**Mushchanov Volodymyr** – DSc (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures». Scientific interests: include the reliability theory, analyses, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

**Orzhekhovsky Anatoly** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the study of real work and reliability indicators of pivotal systems in construction, numerical methods for calculating spatial pivotal structures.

**Korovkina Daria** – student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: study of the features of stress-strain state of shells.