

УДК 692.45.042

**В. П. МУЩАНОВ, А. Г. ВАРДАНЯН**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ПЛАН И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ИССЛЕДОВАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТО-ИЗОГНУТОГО ОПОРНОГО КОНТУРА МЕМБРАННОГО ПОКРЫТИЯ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ**

В статье описан план проведения дальнейших экспериментальных исследований устойчивости сжато-изогнутого опорного контура мембранного покрытия. Выбрана форма покрытия для дальнейшего рассмотрения. Описано экспериментальное исследование физико-механических свойств материала ПВХ (поливинилхлорид), который был выбран в качестве материала для модели. Получены значения масштабных коэффициентов для пластиковой модели. Проведен анализ численных испытаний исследуемого покрытия и пластиковой модели.  
**поливинилхлорид, опорный контур, мембрана, моделирование**

### **ЦЕЛЬ**

Расчет модели покрытия с определением НДС в основных элементах модели покрытия, ориентированных на разработку плана и методики проведения экспериментальных исследований.

### **ЗАДАЧИ**

1. Выбор формы покрытия для дальнейшего исследования.
2. Выбор материала для моделирования выбранного покрытия, определение модуля упругости и коэффициента Пуассона.
3. Определение геометрических характеристик площадей сечения основных несущих элементов.
4. Расчет модели покрытия с определением усилий, деформаций в основных элементах модели покрытия.
5. Конструктивное решение отдельных узлов модели.
6. Выбор и расстановка приборов.

### **ВЫБОР ФОРМЫ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

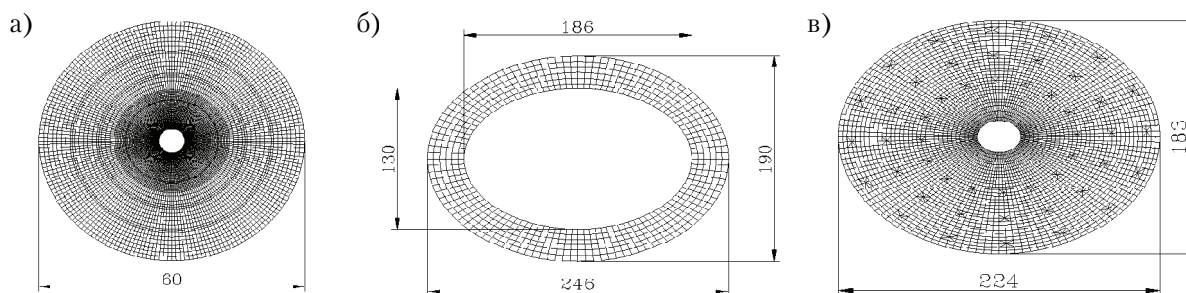
Для детального исследования покрытия необходимо выбрать самое неблагоприятное расчетное сочетание жесткостных и геометрических параметров для проверки устойчивости сжато-изогнутого элемента наружного опорного контура. Следует определить коэффициент запаса устойчивости для наружного опорного контура для каждой формы покрытия с учетом жесткостных и геометрических параметров модели.

Рассматриваются 3 формы мембранного покрытия:

- На круглом плане (покрытие резервуара объемом 50 тыс. м<sup>3</sup> диаметром 60 м) рис. 1а);
- На эллиптическом плане с большим вырезом (проект покрытия стадиона «Шахтер» с размерами в осях 246×190 м) рис. 1б);
- На эллиптическом плане (покрытие стадиона «Олимпийский» в г. Москва с размерами в осях 224×182 м) рис. 1в).

Конструкции покрытий рассчитывались на осесимметричное нагружение от собственного веса и снеговой нагрузки, для которой принималось повышенное значение 2 кПа в результате численного расчета с применением расчетного комплекса SCAD. Результаты численного расчета приведены в таблице 1.

© В. Ф. Мущанов, А. Г. Варданын, 2012



**Рисунок 1** — Мембранные покрытия: а) на круглом плане (покрытие резервуара объемом 50 тыс. м<sup>3</sup> диаметром 60 м); б) на эллиптическом плане с большим вырезом (проект покрытия стадиона «Шахтер» с размерами в осях 246×190 м); в) на эллиптическом плане (покрытие стадиона «Олимпийский» в г. Москва с размерами в осях 224×182 м).

**Таблица 1** — Основные характеристики НДС для исследуемых покрытий

Покрытие	$W_{ц}, мм$	$\sigma_{рад}, кН/м^2$	$\sigma_{кольц}, кН/м^2$	$N, кН$	$M, кНм$	КЗУ
Резервуар	-238,5	112,9	-103,52	34,8	38,08	10,5
«Шахтер»	-428,6	165,5	-107,9	-588,19	383	1,08
«Олимпийский»	-387,9	272,7	108,3	-5 094,5	3 898,5	0,97

КЗУ — коэффициент запаса устойчивости.

Из таблицы 1 видно, что для стационарного покрытия стадиона «Олимпийский» коэффициент запаса устойчивости меньше допустимых норм (1), следовательно далее рассмотрению и моделированию подлежит мембранное покрытие на эллиптическом плане без выреза.

### ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫБРАННОГО ПОКРЫТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

В масштабе 1:100 технологически очень сложно выполнить масштабированную модель, поэтому необходимо использовать те же геометрические параметры, но уже с другим модулем упругости, который обладает схожими жесткостными характеристиками. Для модели был выбран пластик ПВХ. Твердый пластик ПВХ представляет собой однородные листы, с гладкой поверхностью. Этот материал легко поддается механической обработке, сравнительно не дорогой, благодаря чему его удобнее и гораздо менее трудоемко использовать при моделировании конструкций по сравнению с моделями, которые изготавливаются из стали.

Для уточнения фактических жесткостных характеристик элементов модели выполнены исследования физико-механических характеристик материала (пластика). Размеры образца составили 3×40×650 мм (рис. 2), количество образцов — 4 шт. На рис. 3 показано фото испытаний. Испытания проводились с помощью машины для растяжения, деформации измерялись с помощью тензометров Гугенбергера с базой 2 см.

При моделировании использован принцип прямого геометрического подобия с масштабным коэффициентом  $m_l = 1/100$ .

Итак, экспериментальным методом определен модуль упругости пластика, который составил  $E_{pl} = 2,26 \cdot 10^9 Па$ , коэффициент Пуассона  $\mu_{pl} = 0,414$ .

Диаграмма растяжения пластика не приведена, так как в дальнейшем предполагается уточнить поведение материала с учетом фактора времени.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОЩАДЕЙ СЕЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для проведения дальнейших экспериментальных исследований необходима крупномасштабная модель стационарного покрытия на овальном плане, размеры которой в плане составили  $2a \times 2b = 2,24 \times 1,83$  м, со стрелой провиса  $f = 120$  мм.

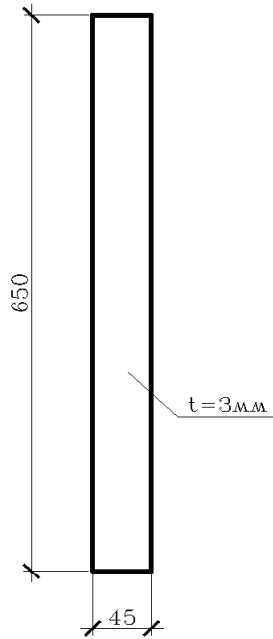


Рисунок 2 – Геометрические размеры образцов.

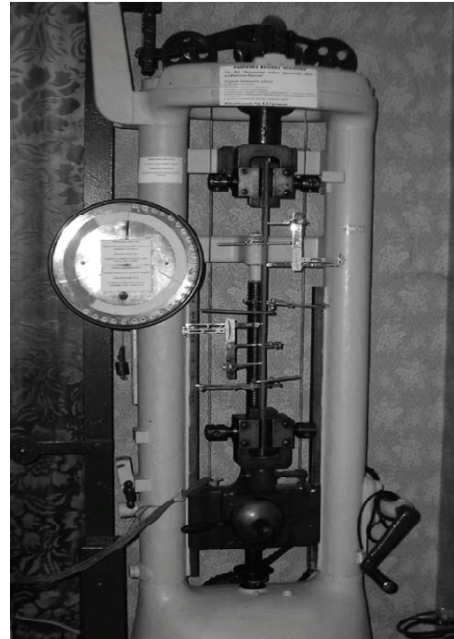


Рисунок 3 – Испытание образца пластика.

В таблицах 2, 3 приведены геометрические характеристики площадей сечений основных несущих элементов.

Таблица 2 – Геометрические характеристики площадей сечений основных несущих элементов

Тип элемента	Жесткость элементов объекта исследования			Жесткость элементов модели		
	F, см <sup>2</sup>	I <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	I <sub>z</sub> , см <sup>4</sup>	F, см <sup>2</sup>	I <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	I <sub>z</sub> , см <sup>4</sup>
Мембрана	t = 5 мм			t = 0,2 мм		
Внешний контур	0,3336	84,1E+06	16,6E+06	0,3336 E-04	1,93E-02	7,78E-02
Внутренний контур	4,01E-02	6,55E-05	1,783E-04	4,01E-06	6,55E-13	1,78E-12
Кольцевые рёбра	2,73E-03	1,72E-06	2,46E-04	–	–	–
Радиальные элементы	84,9E	956,3E+03	154,1E+02	84,9E-02	956,3E-02	154,1E-03

Таблица 3 – Площади сечений основных элементов модели

Тип элемента	Внешний опорный контур	Внутренний опорный контур	Радиальные элементы	Мембрана
Эскиз поперечного сечения элемента				
Размеры сечения	h = 10 мм b = 22 мм	h = 2 мм b = 8 мм	h = 2 мм b = 10 мм	t = 0,2 мм

В плане опорные контуры описаны по эллипсу с полуосями, составляющими для внешнего опорного контура  $a = 1\,120$  мм,  $b = 920$  мм, для внутреннего опорного контура —  $a = 150$  мм,  $b = 125$  мм.

### РАСЧЕТ МОДЕЛИ ПОКРЫТИЯ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ УСИЛИЙ, ДЕФОРМАЦИЙ В ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МОДЕЛИ ПОКРЫТИЯ

Модель рассчитывалась на постоянную нагрузку — от собственного веса и на временную нагрузку — снеговую. В результате численного расчета в программном комплексе SCAD получились следующие показатели НДС (табл. 4).

Таблица 4 — Сравнение показателей НДС исследуемого покрытия и модели

Показатели НДС	Показатели исследуемого покрытия	Показатели модели	$m_x$
$W$ , мм	-387,9	-3,79	0,01
$N_x$ , кН	-5 094,5	-15,77	0,003
$M$ , кНм	3 898,5	10,42	0,003
$N_y$ , МПа	108,3	-0,309	0,003
$N_z$ , МПа	272,7	-0,349	0,001

Примечание:  $m_x$  — коэффициент подобия;  $x$  — переменные  $W, N, M, N_x, N_y$ .

Сравнивая результаты расчета для исследуемого покрытия и пластиковой модели, следует указать на полное совпадение их безразмерных параметров:

$$\bar{n} = \frac{E \cdot I_z^{ext} \cdot ab_1^4 + E \cdot I_z \cdot a_1 \cdot b^4}{Et b^4 \cdot b_1^4} = 0,669 \quad \text{и} \quad \bar{k} = \frac{E \cdot F^{ext} \cdot ab_1^4 + E \cdot F \cdot a_1 \cdot b^4}{Et b^4 \cdot b_1^4} = 0,985.$$

На основании результатов численных исследований модели приведены изополя напряжений и перемещений, в соответствии с которыми ниже рассмотрена схема расстановки приборов (значения НДС в табл. 4).

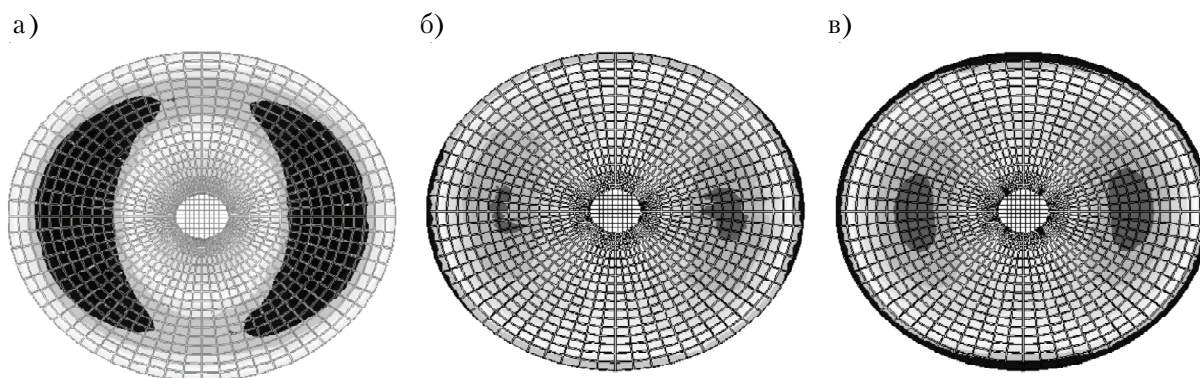


Рисунок 4 — Изополя: а) горизонтальных перемещений; б) кольцевых напряжений; в) радиальных напряжений.

**Конструктивное решение отдельных узлов модели** приведено на рис. 5.

Сопряжение элементов модели:

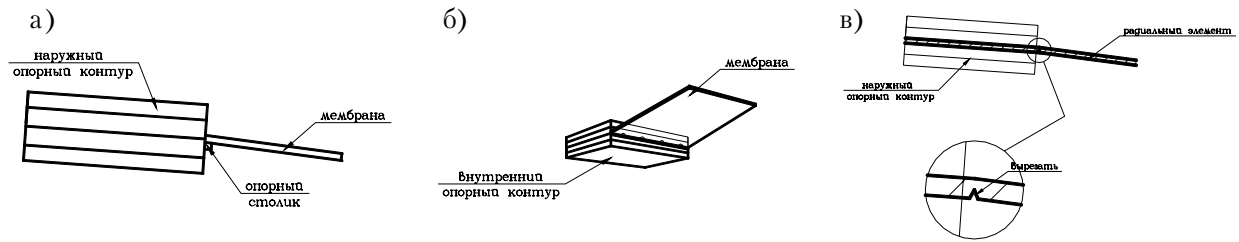
- мембраны с внутренним опорным контуром — шарнирное;
- мембраны с внешним опорным контуром — шарнирное;
- радиальных элементов с внутренним и внешним опорным контуром — шарнирное.

Данные конструктивные узлы не являются окончательными и в дальнейшем будут уточняться.

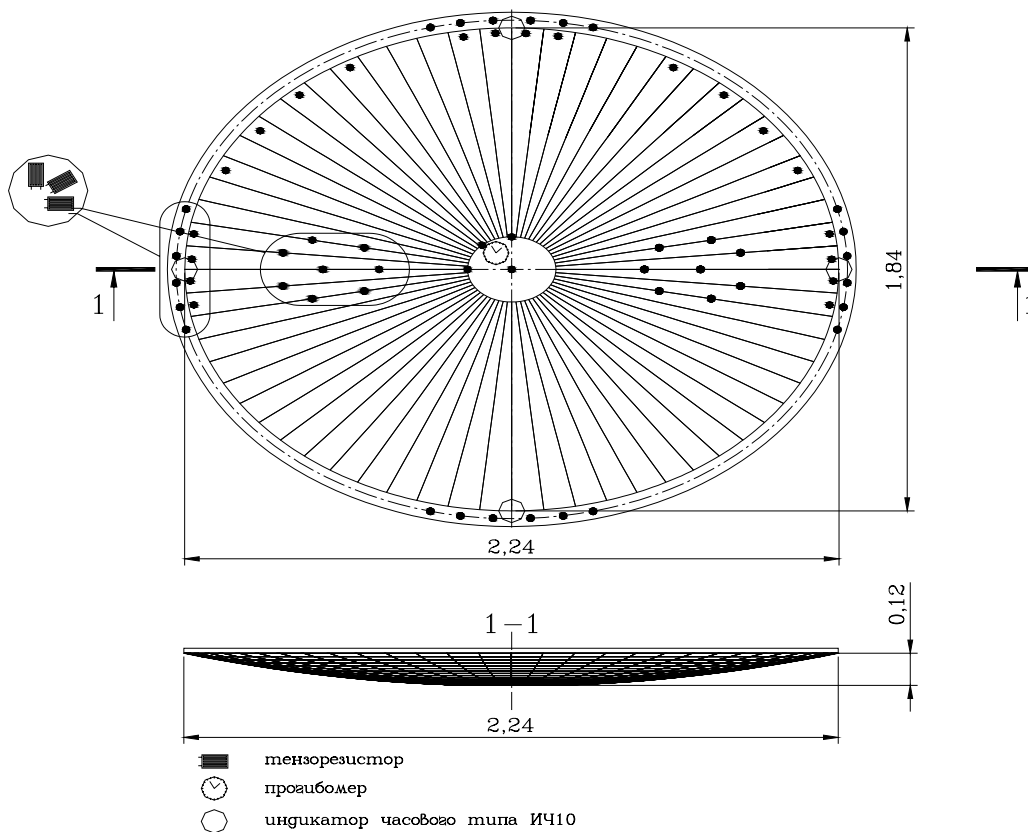
### ВЫБОР И РАССТАНОВКА ПРИБОРОВ

Для дальнейшего исследования покрытия были выбраны следующие приборы (рис. 6):

- Тензорезистор (для определения напряжений в контуре).
- Прогибомер (для определения вертикальных перемещений).
- Индикатор часового типа (для определения горизонтальных перемещений).



**Рисунок 5** – Конструктивное решение узлов модели: а) сопряжение наружного опорного контура с мембраной; б) сопряжение внутреннего опорного контура с мембраной; в) сопряжение наружного опорного контура с радиальным элементом.



**Рисунок 6** – Схема расстановки приборов.

## ВЫВОДЫ

1. При заданных расчетных сочетаниях жесткостных и геометрических параметров сжато-изогнутой элемент опорного контура покрытия на эллиптическом плане без выреза может потерять устойчивость при повышенном значении равномерно-распределенной временной нагрузки.

2. Для моделирования будет использоваться пластик ПВХ, подходящий своими физико-механическими свойствами.

3. Модуль упругости пластика  $E_{pl} = 2,26 \cdot 10^9 \text{ Па}$ , коэффициент Пуассона  $\mu_{pl} = 0,414$ .

4. При расчете мембраны и опорных контуров определяющим нагружением будет «собственный вес + снеговая нагрузка, равномерно распределенная по всему покрытию».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыховичный, Ю. А. Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады-80 в Москве [Текст] / Ю. А. Дыховичный. – М. : Стройиздат, 1982. – 277 с.

2. Поляков, Л. П. Моделирование строительных конструкций [Текст] / Л. П. Поляков, В. М. Файнбурд. — Киев : Будівельник, 1975. — 144 с.
3. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. — Киев : ВВП «Компас», 2001. — 448 с.
4. Мембранные конструкции зданий и сооружений [Текст] : Справочное пособие : В 2-х ч. Ч. 1 / Под ред. В. И. Трофимова и П. Г. Еремеева; ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. — М. : Стройиздат, 1990. — 248 с.
5. Обследование и испытание несущих конструкций зданий и сооружений [Текст] : Учебное пособие / Е. В. Горюхов, В. Ф. Муцанов, В. Н. Васылев, А. А. Ягмур. — К. : УМК ВО, 1991. — 156 с.

Получено 09.10.2012

**В. П. МУЦАНОВ, А. Г. ВАРДАНЯН**  
**ПЛАН І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**СТІЙКОСТІ СТИСНУТО-ЗІГНУТОГО ОПОРНОГО КОНТУРА**  
**МЕМБРАННОГО ПОКРИТТЯ НА ЕЛІПТИЧНОМУ ПЛАНІ**  
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті описано план проведення подальших експериментальних досліджень стійкості стиснуто-зігнутого опорного контура мембранного покриття. Обрана форма покриття для подальшого розгляду. Описано експериментальне дослідження фізико-механічних властивостей матеріалу ПВХ (полівінілхлорид), який був обраний як матеріал для моделі. Отримані значення масштабних коефіцієнтів для пластикової моделі. Проведено аналіз чисельних випробувань досліджуваного покриття та пластикової моделі.

**полівінілхлорид, опорний контур, мембрана, моделювання**

**VOLODYMYR MUSHCHANOV, ARUSYAK VARDANYAN**  
**PLAN AND METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF**  
**STABILITY OF COMPRESSED-BENT SUPPORT CONTOUR MEMBRANE**  
**COATING ON THE ELLIPTICAL PLAN**  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

This paper describes a plan for further experimental studies stable compression and bending of the support contour of the membrane surface. Form of cover for further consideration has been chosen. Experimental study of physical - mechanical properties of PVC (polyvinyl chloride) has been described, which was chosen as the material for the model. The values of the scale factor for the plastic model have been taken in. The analysis of the numerical testing of the coating and plastic model has been made.

**PVC, reference circuit, membrane, modeling**

**Муцанов Володимир Пилипович** — д. т. н., професор кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Академік Української академії наук, академік Академії будівництва і архітектури, член-кореспондент Академії архітектури України, дійсний член Міжнародного інституту інженерів будівельників і член міжнародної асоціації «Просторові конструкції». Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Варданян Арусяк Гегамівна** — аспірантка кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових конструкцій.

**Муцанов Владимир Филиппович** — д. т. н., профессор кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Академик Украинской академии наук, академик Академии строительства и архитектуры, член-корреспондент Академии архитектуры Украины, действительный член Международного института инженеров строителей и член международной ассоциации «Пространственные конструкции». Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Варданян Арусяк Гегамовна** — аспирантка кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: расчет и проектирование пространственных конструкций.

**Volodymyr Mushchanov** – DSc, Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of Ukrainian Academy of Science, a member of Ukrainian Academy of Civil Engineering and Architecture, a corresponding member of Ukrainian Academy of Architecture, a real member of International Institute of Civil Engineering, a member of International Association of Spatial Structures. Scientific interests: theory of reliability, analysis, design and technical diagnosis of spatial metal construction.

**Arusyak Vardanyan** – postgraduate student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: calculation and design of spatial structures.