

УДК 624.014.074:69.036.5:725.826

Теоретическое и экспериментальное исследование конструктивных форм большепролётных покрытий над трибунами стадионов

**Горохов Е.В., д.т.н., Мущанов В.Ф., д.т.н., Касимов В.Р., к.т.н.,
Сивоконь Ю.В., к.т.н., Прядко И.Н.**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Украина

Анотація. Просторові великопрогонові конструкції стаціонарних покриттів над трибунами стадіонів, що зводяться відповідно до вимог міжнародних футбольних організацій, є одними з видів просторових систем, що найдинамічніше розвиваються нині, цікавих як в архітектурному, так і конструктивному плані. У зв'язку з тим, що більшість стадіонів України і інших країн СНД мають порівняно невеликі розміри і частина трибун, що перекривається, складає незначну частку по відношенню до усього прогону споруди, що знижує ефективність просторової роботи використовуваних конструкцій, виникає необхідність додаткових досліджень із відшукування їх раціональних форм. Об'єктами досліджень є пологі великопрогонові оболонки з великим вирізом на еліптичному плані, виконані у вигляді сітчастих (опуклих і провисаючих) або мембранних систем позитивної гаусової кривизни.

Аннотация. Пространственные большепролётные конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов, возводимые в соответствии с требованиями международных футбольных организаций, являются одними из наиболее динамично развивающихся в настоящее время видов пространственных систем, интересных как в архитектурном, так и конструктивном плане. В связи с тем, что большинство стадионов Украины и других стран СНГ имеют сравнительно небольшие размеры и перекрываемая часть трибун составляет незначительную долю по отношению ко всему пролёту сооружения, и тем самым, снижает эффективность пространственной работы используемых конструкций, возникает необходимость дополнительных исследований по отысканию их рациональной формы. Объектами исследований являются пологие большепролётные оболочки с большим вырезом на эллиптическом плане, выполненные в виде сетчатых (выпуклых и провисающих) или мембранных систем положительной гауссовой кривизны.

Abstract. Spatial long-span constructions of stationary coverages above the tribunes of stadiums, erected in accordance with the requirements of international soccer organizations, are one of most dynamically developing presently types of the spatial systems, interesting both in architectural and structural plan. In connection with that small sizes and recovered part of tribunes have most stadiums of Ukraine and other countries the CIS comparatively makes an insignificant stake in relation to all flight of building, and the same, reduces efficiency of spatial work of the used constructions, it stipulates the necessity of additional researches on searching for of their rational form. The objects of researches on this question are declivous long-span shells with a large cut on an elliptic plan, executed as the reticulated (protuberant and sagging) or membrane systems positive gaussian.

Ключевые слова: стадион, большепролетные конструкции, покрытия над трибунами, испытание.

После проведения европейских и всемирных первенств по футболу, прошедших в 2002, 2004, 2006 и 2008 годах, произошел мощнейший толчок в строительстве спортивных арен новой формации. Он вызван все более ужесточающимися требованиями UEFA и FIFA по обязательному устройству покрытия над трибунами спортивных арен новой формации (т.н. уровня «5 звезд»), где допускается проводить спортивные состязания высокого ранга. Данные объекты перестали быть стадионами как таковыми, а превратились в многофункциональные культурно-развлекательные комплексы, являющиеся архитектурной, культурно-досуговой и, естественно, спортивной составляющей города, на территории которого они возведены.

Рассматривая конструктивные решения покрытий стадионов уровня «5 звезд», построенных в Европе, можно отметить применение следующих конструктивных форм [1]:

- для более 35 % стадионов в качестве покрытия использованы балочные и рамные покрытия;
- до 25 % стадионов имеют в качестве элементов покрытий стержневые оболочки;
- покрытия над трибунами в виде подвешенных оболочек и структур приняты у 18 % стадионов;
- до 15 % стадионов с вантово-балочными покрытиями;
- над остальной частью стадионов применены висячие покрытия (вантовые сети и мембранные оболочки).

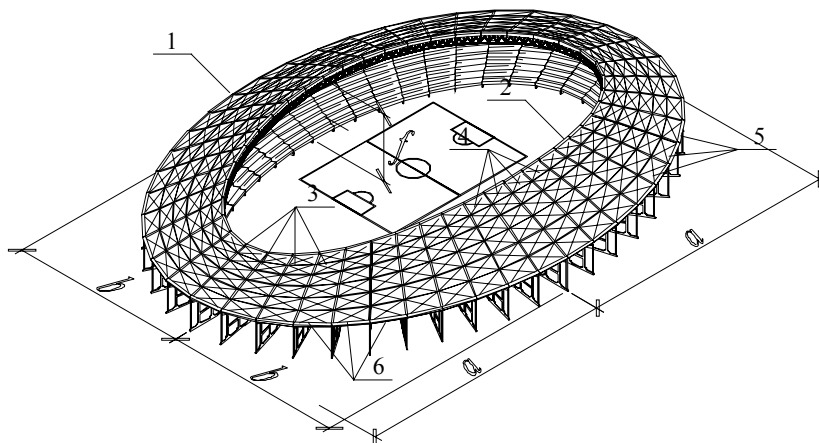


Рис. 1. Пространственное стержневое покрытие в виде усеченного купола:
1 – внешний опорный контур; 2 – внутренний опорный контур; 3 – радиальные ребра; 4 – кольцевые ребра; 5 – диагональные элементы; 6 – колонны внешнего опорного контура

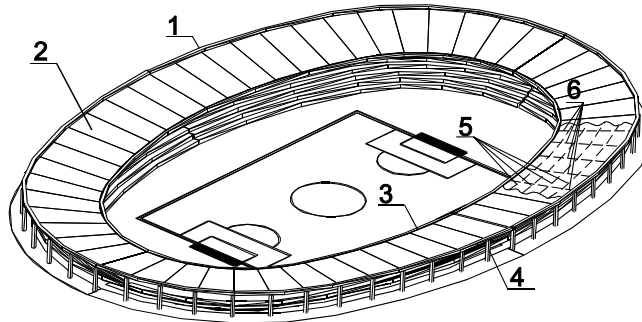


Рис. 2. Мембранное покрытие положительной гауссовой кривизны с большим вырезом на эллиптическом плане:

- 1 – внешний опорный контур, 2 – пролетная конструкция (мембрана),
3 – внутренний опорный контур, 4 – колонны внешнего опорного контура,
5 и 6 – соответственно кольцевые и радиальные элементы «постели»

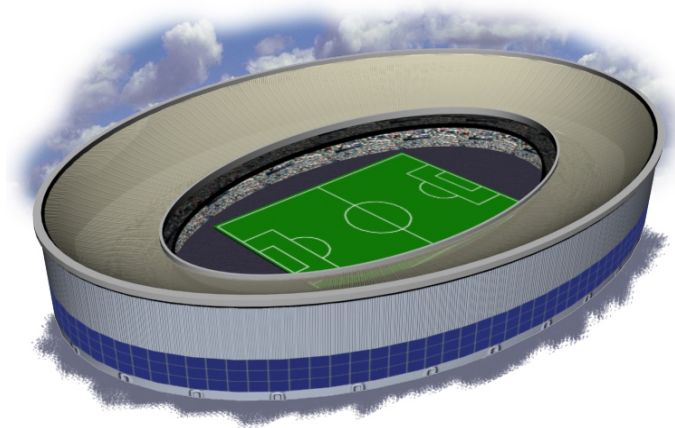


Рис. 3. Висячая пространственная оболочка на эллиптическом плане

На основании анализа конструктивных схем стационарных покрытий над трибунами стадионов определены основные конструктивные решения и формы данного вида сооружений, намечены направления для изучения их поведения.

Приняты конструктивные решения стационарных покрытий над трибунами, работа которых была исследована, а также разработана приближенная методика проектирования.

Для изучения поведения конструктивных схем стационарных покрытий над трибунами стадионов были реализованы следующие исследования:

1. Изучение теоретических предпосылок расчета континуальных систем аналогичной геометрии, на основе которых получена система пространственно-жесткостных параметров.
2. Исследование взаимосвязи безразмерных пространственно-жесткостных параметров с безразмерными параметрами напряженно-деформированного состояния.
3. Проверка адекватности математической модели на экспериментальной установке.
4. Разработка приближенной методики расчета пространственных конструкций стационарного покрытия над трибунами стадионов.

Пространственно-стержневое покрытие в виде усеченного купола (рис. 1). Некоторые результаты исследований. Для получения общего подхода в исследовании стержневых систем, геометрия которых описана в виде поверхности, приводим к эквивалентной континуальной оболочке толщиной $t = A_{к.р.} / S_{к.р.} + A_{р.р.} / S_{р.р.}$, где $A_{к.р.}$, $A_{р.р.}$ – площадь поперечного сечения кольцевого и радиального ребер соответственно; $S_{к.р.}$, $S_{р.р.}$ – шаг кольцевых и радиальных ребер соответственно.

В качестве исходной использована система дифференциальных уравнений равновесия элемента оболочки, записанная с учетом допущений линейной теории пологих оболочек.

Рассмотрим далее систему уравнений равновесия по линии примыкания оболочки к контуру (рис. 4, а, б). Величины погонных усилий, используемые в уравнениях, выражаются через соответствующие деформации, которые в свою очередь выражаются через перемещения.

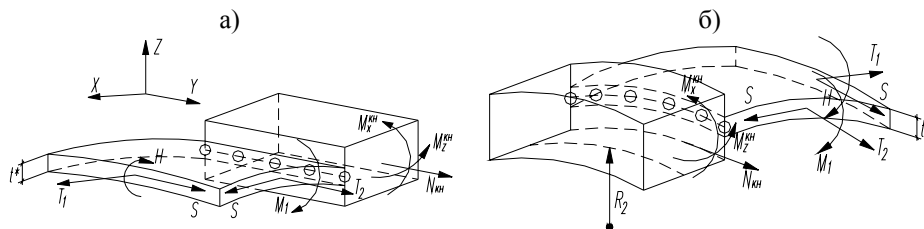


Рис. 4. Схемы примыкания континуальной полой оболочки:

а – к наружному опорному контуру; б – к внутреннему кольцу;

T_1, T_2 – радиальное и кольцевое погонное усилие оболочки; S – сдвигающее погонное усилие оболочки; M_1, H – изгибающий и крутящие погонные моменты оболочки; $N_{кн}$ – продольное усилие опорного контура; $M_{хкн}, M_{зкн}$ – изгибающий момент в опорном контуре относительно оси X и оси Z

Применяя безразмерные координаты $\xi = x/a$, $\eta = y/b$ и относительные перемещения $\bar{u} = ua/t^2$, $\bar{v} = vb/t^2$, $\bar{w} = w/f$, (где a , b , a_1 , b_1 – полуоси внешнего и внутреннего опорных контуров соответственно; R_1 – радиус кривизны контуров в радиальном направлении; R_2 – радиус кривизны внутреннего контура в плоскости XOZ ; $b_{кн}$, $b_{1кн}$ горизонтальный размер сечения внешнего и внутреннего контуров соответственно; f – стрела подъема внутреннего опорного контура; $I_z^{внеш.}$, $I_z^{внутр.}$ – изгибная жесткость внешнего и внутреннего опорных контуров в вертикальной плоскости; $I_y^{внутр.}$ – изгибная жесткость внутреннего опорного контура в горизонтальной плоскости) и проведя необходимые преобразования, получим систему пространственно-жесткостных безразмерных параметров, которые могут быть использованы при исследовании общих закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния пространственных конструкций в зависимости от изменения геометрических и жесткостных характеристик:

$$\bar{D}_1 = \frac{EI_z^{внеш} ab_1^4 + EI_z^{внутр} a_1 b^4}{Et b^4 b_1^4}, \quad \bar{D}_1' = \frac{EI_z^{внеш} a_1 b_1^2 + EI_z^{внутр} ab^2}{Et a b^2 a_1 b_1^2},$$

$$\bar{D}_2 = \frac{a^2 b_1^2 + a_1^2 b^2}{b^2 b_1^2}, \quad \bar{D}_3 = \frac{a_1 f}{t^2}, \quad \bar{D}_4 = \frac{EI_y^{внутр} \cdot b}{Et^3 R_2^2}, \quad \bar{D}_5 = \frac{EI_y^{внутр} \cdot b}{Et^3 a^2}, \quad \bar{D}_6 = \frac{a^2}{b^2}.$$

Проведенный анализ системы дифференциальных уравнений позволил выделить параметры \bar{D}_1 и \bar{D}_4 как основные, оказывающие наибольшее влияние на изменение напряженного деформированного состояния исследуемой конструкции. С использованием основных безразмерных пространственно-жесткостных параметров \bar{D}_1 , \bar{D}_4 был проведен численный эксперимент для установления указанных выше взаимосвязей. В процессе проведенных исследований были получены данные и зависимости внутренних усилий в радиальных ребрах, ориентированных вдоль главных полуосей конструкции и в средней части четверти схемы.

Аналогичные данные были получены и для кольцевых элементов, а также для вертикальных перемещений внутреннего опорного контура, которые заслуживают особого внимания. Основные результаты исследований приведены на рис. 5.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы:

1. Нелинейные эффекты изменения безразмерных параметров напряженно-деформированного состояния на участке при $\bar{D}_4 \approx 0..0,015$ обусловлены низкими жесткостными характеристиками опорных кон-

струкций и пролетной части, а также повышенной деформативностью конструкции

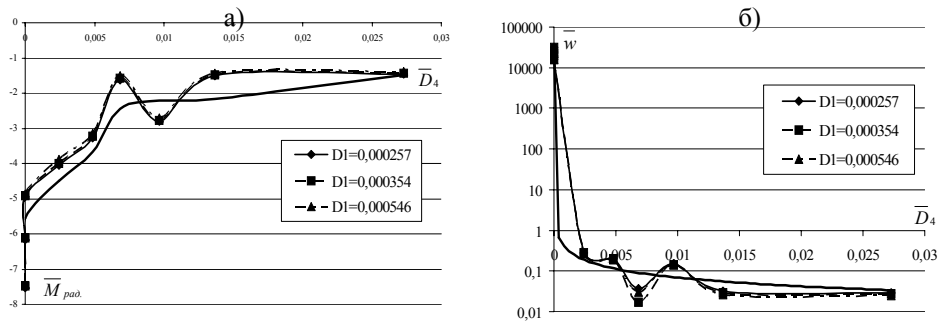


Рис. 5. Зависимость безразмерных параметров напряженно-деформированного состояния для основных несущих элементов от безразмерных пространственно-жесткостных параметров \bar{D}_1 и \bar{D}_4 :

а – для радиального элемента, расположенного вдоль полуоси b безразмерный параметр изгибающего момента $\bar{M}_{rad} = M_{y,ab} / (EI_y a_p)$, б – безразмерный параметр вертикальных перемещений $\bar{w} = w / f$ для внутреннего опорного контура.

- Увеличение параметра \bar{D}_4 сопровождается перераспределением внутренних усилий в элементах покрытия. При этом отмечается, что резкое снижение величин изгибающих моментов, действующих в контурах; приводит к увеличению продольных сил, действующих в радиальных элементах пролетной части покрытия. Одновременно изменение параметра \bar{D}_4 вызывает незначительное (в пределах 8 % – 16 %) изменение безразмерного параметра продольной силы $\bar{N}_{min-max}$, сжимающей во внутреннем и растягивающей во внешнем опорных контурах. При этом большей чувствительностью к увеличению параметра \bar{D}_4 обладает внешний опорный контур, характеризующийся изменчивостью безразмерного параметра продольной силы \bar{N}_{max} в пределах 12...16 %.
- Увеличение параметра \bar{D}_1 с 2,573E-04 до 5,462E-04, характеризующего жесткость диска покрытия, создаваемую изгибными жесткостями контуров в горизонтальной плоскости и продольной жесткостью пролетной части покрытия, приводит к изменению безразмерного параметра изгибающего момента в горизонтальной плоскости $\bar{M}_{z,max-min}$ для внешнего опорного контура на 18 % – 26 %, безразмерного параметра продольной силы в контурах $\bar{N}_{min-max}$ – на 2 % – 3 %,

безразмерного параметра горизонтальных смещений внешнего опорного контура \bar{u} – на 8 – 10 %.

Для проверки результатов численного эксперимента и адекватности фактической конструкции математической модели сооружения (расчетной схемы) были проведены экспериментальные исследования на крупномасштабной модели пространственного стержневого покрытия, выполненного в виде полой оболочки положительной Гауссовой кривизны с поверхностью в виде эллиптического параболоида. Вид модели в процессе испытаний представлен на рис. 6. Модель покрытия испытывалась в упругой стадии на статические нагрузки. Во время проведения эксперимента измерялись относительные деформации внешнего, внутреннего опорных контуров, радиальных и кольцевых ребер.

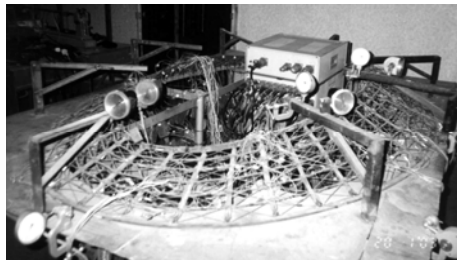


Рис. 6. Общий вид модели пространственного стержневого покрытия в процессе испытаний



Рис. 7. Общий вид модели мембранного покрытия в процессе испытаний

Сопоставление результатов эксперимента и теоретических исследований, выполненных при помощи численного моделирования с использованием наиболее распространенного программного комплекса SCAD 7.31 и программного комплекса «CORONA», который может производить расчеты в геометрически нелинейной постановке и учитывать изменения расчетной схемы, обусловленные фактической последовательностью монтажа, позволяет сделать следующие выводы:

1. Максимальные перемещения, составляющие $l_p/350$ для радиальных элементов, расположенных вдоль короткой оси сооружения и в середине четверти покрытия, $l_p/682$ – вдоль длинной оси, а следовательно и усилия в большинстве элементов конструкции, возникают при загрузке ее равномерно распределенными постоянной и временной нагрузками.

2. Перемещения, возникающие при загрузке конструкции неравновесной временной нагрузкой составляют всего 22...10 % от максимальных перемещений загрузений.
3. Результаты эксперимента совпадают с данными теоретического расчета (отклонение составляет 8...25 %), однако указанные отклонения в большинстве представленных случаях неравновесных загрузений происходят в сторону превышения экспериментальных результатов от расчетных, что следует учитывать при разработке окончательной методики проектирования конструкций.

На основе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан алгоритм инженерной методики расчета пространственно стержневой оболочки с большим вырезом, которая позволяет определять и оценить геометрические параметры, жесткостные характеристики основных несущих элементов и параметры напряженно-деформированного состояния рассматриваемого объекта.

Разработанная приближенная методика расчета конструкций предусматривает следующие этапы:

1. Определение конструктивно-геометрических параметров сооружения:
 - 1.1 определение шага основных несущих элементов (радиальных и кольцевых ребер);
 - 1.2 определение условного радиуса кривизны внутреннего опорного контура в вертикальной плоскости, который определяет геометрию пространственно стержневой оболочки.
2. Принятие значения безразмерного пространственно жесткостного параметра \bar{D}_4 .
3. Определение, используя зависимость, $\bar{W} = f(\bar{D}_1, \bar{D}_4)$, безразмерного пространственно жесткостного параметра \bar{D}_1 .
4. Нахождение значений безразмерных параметров внутренних усилий в основных несущих элементах (радиальных, кольцевых ребрах и внешнем и внутреннем опорных контурах).
5. На основе рекомендуемых соотношений жесткостных параметров основных несущих элементов осуществляется определение жесткостных характеристик основных несущих элементов (радиальных, кольцевых ребер и внешнего и внутреннего опорного контура).
6. Определение абсолютных значений внутренних усилий в основных несущих элементах.
7. Уточнение безразмерных пространственно-жесткостных параметров.
8. Определение геометрических характеристик основных несущих элементов с использованием ограничений по прочности, устойчивости.
9. Нахождение приведенной толщины оболочки.

10. Пересчет алгоритма, начиная с пункта 4 до тех пор, пока не выполняются условие прочности в основных несущих элементах при использовании геометрических характеристик, полученных в результате предыдущей итерации.
11. Уточнение параметров напряженно-деформированного состояния конструкции при помощи численного расчета методом конечного элемента.

Мембранное покрытие положительной гауссовой кривизны с большим вырезом на эллиптическом плане (рис. 2). Использованный аналогичный подход при выводе безразмерных пространственно-жесткостных параметров и проведенный анализ системы дифференциальных уравнений позволили выделить параметры $\overline{D}_1, \overline{D}_4,$

$$\overline{F}_1 = \frac{E \cdot F^{ext} \cdot a \cdot b_1^2 + E \cdot F^{int} \cdot a_1 \cdot b^2}{E \cdot t \cdot b^2 \cdot b_1^2}, \quad \overline{F}_2 = \frac{E \cdot F^{ext} \cdot b \cdot a_1^2 + E \cdot F^{int} \cdot b_1 \cdot a^2}{E \cdot t \cdot a^2 \cdot a_1^2} \quad \text{как}$$

основные, оказывающие наибольшее влияние на изменение НДС конструкции. Из этой системы отдельно следует выделить параметры \overline{F}_1 и \overline{F}_2 , причем степень влияния этих параметров практически одинакова. С учетом этих данных была сформирована матрица планирования эксперимента и проведен численный эксперимент, который позволил получить основные зависимости параметров НДС от безразмерного пространственно-жесткостного параметра \overline{F}_1 .

Графики некоторых зависимостей с выделением области значений, рекомендуемых для проектных решений (в которой практически с небольшой корректировкой выполняются требования 1-го и 2-го предельного состояний), приведены на рис. 8, 9.

Анализ полученных в ходе численных исследований данных позволил сделать следующие выводы:

- наибольшее влияние на изменение безразмерных параметров НДС оказывают безразмерные параметры \overline{F}_1 и \overline{F}_2 , степень влияния которых практически одинакова;
- наиболее рациональная область использования безразмерных параметров продольной жесткости (в частности \overline{F}_1), составляет:
 - 0,85 – 1,8 для оболочек с площадью, составляющей 42 % – 49 % площади стадиона;
 - 0,9 – 1,9 для оболочек с площадью, составляющей 50 % – 60 % площади стадиона;

– 0,95 – 2 для оболочек с площадью, составляющей 61 % – 65 % площади стадиона;

– 1 – 2,3 для оболочек с площадью выше 65 % – 70 % площади стадиона;

— при корректировке конструктивной схемы с помощью «вспарушивания» (выгиба внутреннего опорного контура в вертикальной плоскости) максимальные вертикальные перемещения уменьшаются в 3-5 раз, радиальные и кольцевые напряжения в мембране уменьшаются в среднем на 30 % – 50 %, продольные усилия во внутреннем опорном контуре снижаются до 20 %.

Теоретические исследования были проверены и подтверждены экспериментальным путём на модели мембранного покрытия. Вид модели в процессе испытаний представлен на рис. 7. При моделировании использован принцип прямого геометрического подобия с масштабным коэффициентом $m_l = 1/100$. Конструкция покрытия, опорные контуры и радиальные элементы модели выполнены из пластика ПВХ, колонны – из фанеры ФК.

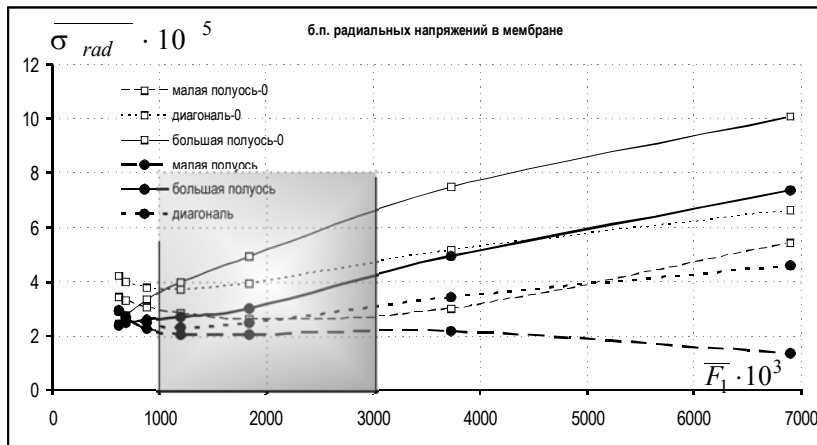


Рис. 8. Зависимость изменения б.п. радиальных напряжений в мембране от б.п. продольной жесткости \bar{F}_1

Модель испытывалась в упругой стадии на статические нагрузки. Во время эксперимента измерялись относительные деформации внешнего, внутреннего опорных контуров, мембраны и перемещения характерных узлов конструкции.

Для уточнения фактических жесткостных характеристик элементов модели выполнены исследования физико-механических характеристик матери-

ала (пластика ПВХ). На рис. 8 показана діаграма розтягнення пластика. Геометрические розміри моделі покриття в плані $2a \times 2b = 2,46 \times 1,7$ м со стрелою провисання $f = 0,09$ м. Общие розміри моделі спроектовані в відповідності з розмірами трибун стадіона «Шахтер» в г. Донецьке.

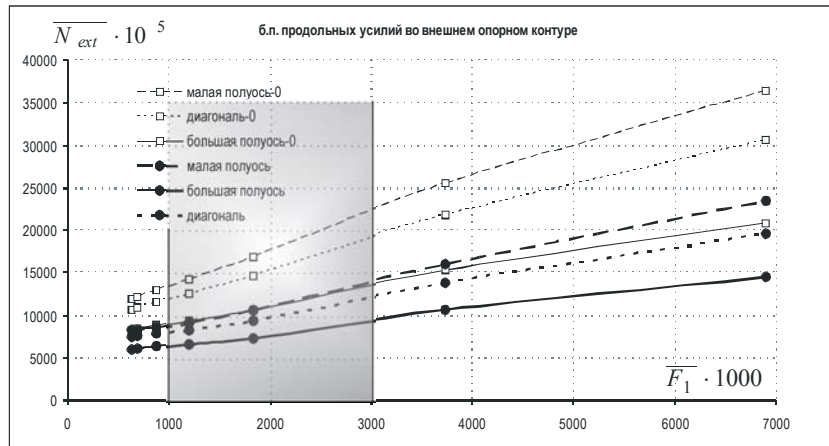


Рис. 9. Залежність зміни б.п. продольного зусилля в зовнішньому опорному контурі від б.п. продольної жорсткості \overline{F}_1

Результати порівняння експерименту та теоретичних досліджень, виконаних за допомогою чисельного моделювання з використанням універсального програмного комплексу SCAD 7.31, в геометрично неліній постановці наведені на рис. 9. Збіг результатів експерименту з даними теоретичного розрахунку (відхилення становить 13...19 %).

Реалізація наближеної методики може бути представлена в вигляді блок-схеми та включає в себе наступні етапи:

1. Визначення параметрів мембранної оболонки на еліптичному плані: t – товщина мембрани, τ – період часу, на який розраховується конструкція; a, b – поперечні осі оболонки; a_1, b_1 – поперечні осі вирізу, навантаження на розрахункову схему.
2. Визначення площі поперечного перерізу внутрішнього опорного контуру з урахуванням того, що його об'єм повинен приблизно дорівнювати об'єму вирізу F^{int} .
3. Визначення площі поперечного перерізу зовнішнього опорного контуру F^{ext} з урахуванням того, що $F^{ext} = F^{int} / k$, де $k \in [0,75...0,95]$.

4. Вычисление безразмерного пространственно-жесткостного параметра

$$\overline{F}_1 = \frac{EF^{ext} \cdot a \cdot b_1^2 + EF^{int} \cdot a_1 \cdot b^2}{E \cdot t^* \cdot b^2 \cdot b_1^2} \text{ – первое приближение.}$$

5. Вычисление оптимального значения \overline{F}_1 с учетом минимального значения безразмерного параметра перемещений \overline{w} , учитывая ограничения $\overline{F}_1 \in [1...3]$.

6. Вычисление параметров НДС оболочки по зависимостям приближенной методики первоначально для плоского внутреннего опорного контура.

7. Проверка прочности конструкции.

8. Если проверка по 1-му предельному состоянию не выполняется, то корректировка параметра \overline{F}_1 (увеличение, если не выполняется проверка прочности).

9. Вычисление F^{ext} и F^{int} из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \overline{F}_1 &= \frac{EF^{ext} \cdot a \cdot b_1^2 + EF^{int} \cdot a_1 \cdot b^2}{E \cdot t^* \cdot b^2 \cdot b_1^2} \\ F^{ext} &= F^{int} / k \end{aligned} \right\}, \text{ где } \overline{F}_1 \text{ – скорректированное значение}$$

параметра, $k \in [0,75...0,95]$.

10. Конструирование поперечных сечений: опорных контуров, элементов постели.

11. Уточнение нагрузок согласно действующим нормам.

12. Составление расчетной схемы. Расчет конструкции на ЭВМ МКЭ.

13. Проверка жесткости конструкции.

14. Если проверка по 2-му предельному состоянию не выполняется и период времени эксплуатации $\tau = 25$ лет, то вычисление параметров НДС оболочки с теми же параметрами, но для депланированного внутреннего опорного контура.

15. Если проверка по 2-му предельному состоянию не выполняется для депланированного внутреннего опорного контура с периодом времени эксплуатации $\tau = 25$ лет или для конструкции с периодом времени эксплуатации $\tau = 50$ лет, корректировка расчетной схемы путем «вспарушивания».

16. Окончательный расчет оболочки с учетом законструированных сечений на ЭВМ.

Висячая пространственная оболочка на эллиптическом плане (рис. 3).

Так как основными пролётными несущими элементами висячей пространственной оболочки являются жесткие нити, преимущественно работающие на растяжение, то исследование параметров напряженно-деформи-

рованного состояния было основано на безразмерных пространственно-жесткостных параметрах мембранной оболочки, а именно \bar{D}_1 , \bar{D}_4 , \bar{F}_1 и \bar{F}_2 . На основе варьирования выше приведенных параметров были проведены численные исследования. Анализ полученных данных (рис. 10) позволил сделать следующие выводы:

1. Наибольшее влияние на изменение безразмерных параметров напряженно-деформированного состояния пролетной части выпуклой оболочки покрытия (\bar{N} , \bar{M} , \bar{w}) оказывает безразмерный параметр изгибной жесткости внутреннего опорного контура в вертикальной плоскости \bar{D}_4 . При изменении параметра в пределах 0,00109...0,0194 параметр вертикальных перемещений радиальных элементов \bar{W}_p удается снизить в 5...7 раз вдоль короткой оси, а вдоль длинной оси в 20...25 раз.
2. Увеличение параметра \bar{D}_4 сопровождается перераспределением внутренних усилий в элементах покрытия: если уменьшение параметра изгибающих моментов \bar{M}_p вдоль длинной оси составляет 9...10 раз, то вдоль короткой происходит снижение \bar{M}_p в 2...3 раза, при этом в средней части уменьшение \bar{M}_p составляет 1.3...16 раз;
3. При увеличении параметра \bar{D}_4 безразмерный параметр продольной силы вдоль длинной оси \bar{N}_p снижается на 26 %, а вдоль короткой изменение усилий перераспределяется в пределах 10 %, при этом в средней части четверти покрытия усилия уменьшились на 25 %.
4. Увеличение параметра \bar{D}_1 от 4,72E-03 до 1,89E-02, характеризующего жесткость диска покрытия, приводит к изменению параметра вертикальных перемещений радиальных элементов по длинной оси \bar{W} на 7 % – 22 %.

При эксплуатации поликарбонатных пластиков в составе пространственных конструкций покрытий были случаи деформаций и даже появления трещин в ограждающих конструкциях, что вызвано жестким его креплением к несущим конструкциям. По требованиям фирм-производителей углепластиков панели ограждающей конструкции необходимо соединять с несущими элементами через специальные элементы крепления, что исключает совместную работу конструкций.

Но нет информации о проектировании большепролетных пространственных висячих покрытий с большими кинематическими перемещениями и повышенной деформативностью.

Для изучения действительной работы поликарбонатного светопрозрачного пластика в составе пространственной стержневой висячей оболочки с вырезом на эллиптическом плане при постоянной и временной нагрузках были выполнены экспериментальные исследования крупномасштабной модели блока висячих ферм совместно с ограждающей конструкцией из углепластика типа «Danpalon» с толщиной листа 8 мм (рис. 11).

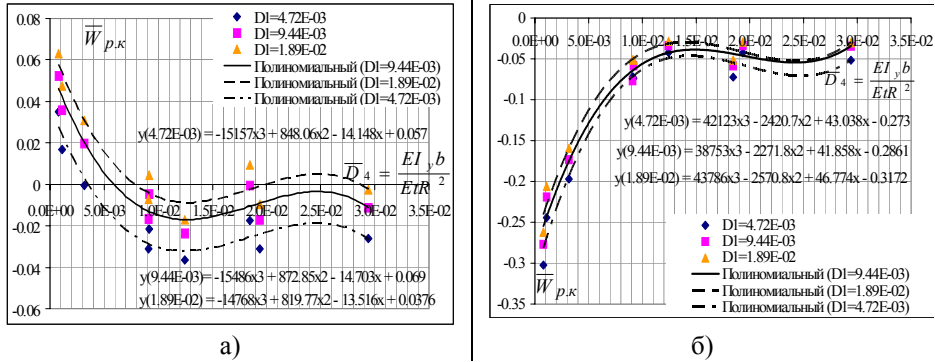


Рис. 10. Зависимость безразмерного параметра напряженно-деформованного состояния максимальных перемещений $\bar{W} = W / f$ от безразмерных пространственно-жесткостных параметров \bar{D}_1 и \bar{D}_4 для радиального элемента вдоль длинной (а) и короткой (б) оси



Рис. 11. Общий вид экспериментальной модели с ограждающей конструкцией из поликарбонатного пластика типа «Danpalon»



Рис. 12. Узел крепления пластика к несущей конструкции модели

Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. За счет разомкнутого нижнего пояса фермы верхний пояс конструкции работает экономно, как гибкая нить, а замыкание пояса после приложения постоянной нагрузки позволяет уменьшить конечную требуемую изгибную жесткость. При этом напряжения в нижнем поясе снижаются.

2. На каждой стадии нагружения характер деформирования фермы при постоянной нагрузке отличается от характера деформирования при нагружении фермы временной (снеговой) нагрузкой, при этом угол деформирования фермы уменьшается в 2,2 раза, что объясняется уменьшением конечной требуемой изгибной жесткости за счет замыкания нижнего пояса.

3. Полученные в ходе эксперимента усилия в элементах ферм подтверждают качественную картину распределения усилий в элементах ферм, возникающих в результате численных исследований, для нагружений временной нагрузкой. Аналогичное качественное совпадение результатов расчета с результатами экспериментальных исследований до 10 % – 19 % наблюдается при анализе величин вертикальных перемещений.

4. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований для обеспечения надежности эксплуатации ограждающей конструкции должна производиться проверка как 1-го, так и 2-го предельного состояния:

- обеспечение нормальной эксплуатации узла сопряжения элементов ограждающей конструкции выполняется при величине относительных вертикальных перемещений элемента до 1/50 и относительного удлинения диагонали пластиковой панели $\bar{d}_{\max}^{diag} \leq 0,008$;
- с целью обеспечения 1-го предельного состояния элементов ограждающей конструкции на панель с расчетным пролетом до 1 м и толщиной 8 мм величина снеговой нагрузки не должна превышать 30 кг/м².

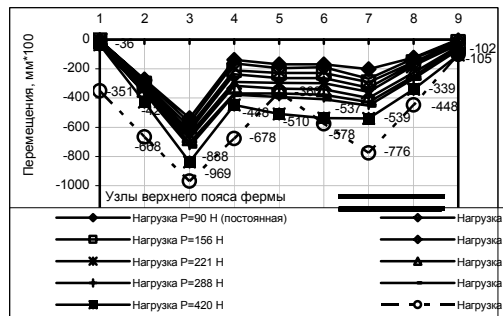


Рис. 13. Вертикальные перемещения узлов ферм при загрузении распределённой нагрузкой по всему пролёту

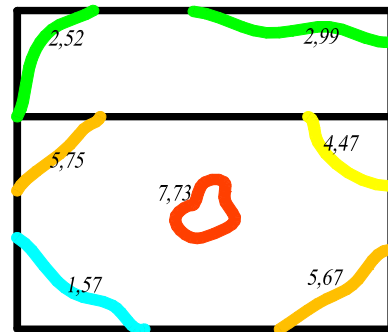


Рис. 14. Распределение напряжений в ограждающей конструкции $\sigma_{прив}$, кг/см²

Методика розроблена на основі отриманих результатів чисельного і натурального експериментів, в ході яких варіювались безрозмірні просторово-жесткісні параметри $\bar{D}_1 = EI_z^{нещ} ab_1^4 + EI_z a_1 b^4 / Etb^4 b_1^4$ і $\bar{D}_4 = EI_y b / (EtR^2)$ (геометрія оболонки, жесткості зовнішнього і внутрішнього опорних контурів, снігові навантаження), і експериментальних досліджень фрагмента покриття в формі висячої оболонки на еліптичному плані.

Висновки

Виконаний комплекс теоретичних і експериментальних досліджень дозволив з використанням теоретичних передумов сформувати інженерну методику розрахунку і проектування найбільш розповсюджених конструктивних форм стаціонарних покриттів над трибунами стадіонів, які з достаточною точністю можуть бути використані на стадіях варіантного проектування і призначення вихідних жесткісних характеристик при проведенні кінцевоелементного розрахунку.

Предполагаемая методика розрахунку і проектування передбачається використовувати як основу блоку розрахунку напружено-деформованого стану, як упрощений варіант при розробці загального алгоритму визначення чисельних показників надійності експлуатуємих конструкцій стаціонарних покриттів стадіонів.

Література

- [1] Горохов Е.В., Мушанов В.Ф., Кинаш Р.И., Шимановский А.В., Лебедич И.Н. Конструкции стаціонарних покриттів над трибунами стадіонів (2-е издание, исправленное и дополненное) / Под общей редакцией Е.В. Горохова и А.В. Шимановского. – Макеевка, РИО ДонНАСА, 2008. – 404 с.
- [2] Касимов В.Р. Прочность и деформативность большепролетной стержневой оболочки покриття з великим вирізом на еліптичному плані. Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Донецк: ООО «Норд-Компьютер», 2004. – 19 с.
- [3] Руднева И.Н. Особенности пространственной работы висячего покриття, образованного системой жестких нитей. Автореф. дисс. канд. тех. наук 05.23.01. – Донецк: ООО «Норд-Компьютер», 2006. – 21 с.
- [4] Сивоконь Ю.В. Мембранные оболочки покриттів над трибунами стадіонів з великими вирізами на еліптичному плані. Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Донецк: ООО «Норд-Компьютер», 2007. – 21 с.

Надійшла до редколегії 15.06.2010 р.