

УДК 62-278

В. Ф. МУЩАНОВ, В. А. ШПИЊКОВ

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

**ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ПРОЕКТНОЙ НАДЕЖНОСТИ
МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ НАД ТРИБУНАМИ СТАДИОНОВ**

В статье рассматриваются существующие конструктивные покрытия мембранного типа, а также произведен анализ методик расчета напряженно-деформированного состояния мембранного покрытия на эллиптическом плане.

мембранное покрытие, напряженно-деформированное состояние, безразмерные параметры

В современной практике строительства при устройстве большепролетных покрытий большое признание получили мембранные оболочки. В первую очередь это связано с экономичностью использования стали. Также появилась возможность покрытия большепролетных сооружений различной геометрической формы, что ведет за собой к сокращению трудозатрат по монтажу, изготовлению и транспортировке.

Сегодня одним из ключевых вопросов проектирования остается обеспечение надежности при проектировании большепролетных конструкций, в частности покрытия на эллиптическом плане в виде мембранной оболочки с большим вырезом в центре (рис. 1).

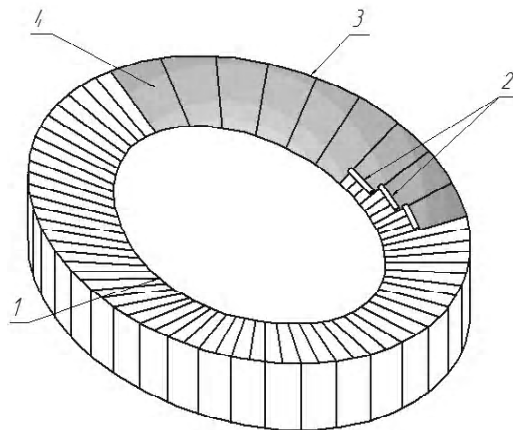


Рисунок 1 – Конструктивная схема мембранного покрытия: 1 – внутреннее кольцо; 2 – рулоны мембраны в момент раскатки; 3 – наружный опорный контур; 4 – смонтированный элемент мембраны.

В современном строительстве преобладают большепролетные конструкции различной конструктивной формы, например мембранные оболочки зарекомендовали себя в перекрытии двух стадионов в г. Коломна и г. Ангарск. В перекрытии конькобежного стадиона использовалось мембранное полотно толщиной 4 мм, которое крепилось к металлоконструкциям опорного контура. Необходимо обратить внимание и на то, что «постель» была спроектирована в виде системы параллельных элементов с применением листовой стали 150×4 мм, имеющих шаг 4 м (рис. 2а). В сравнении с конькобежным стадионом хоккейный стадион был запроектирован в виде мембранной оболочки на прямоугольном плане с размерами 90×87 м (рис. 2б).

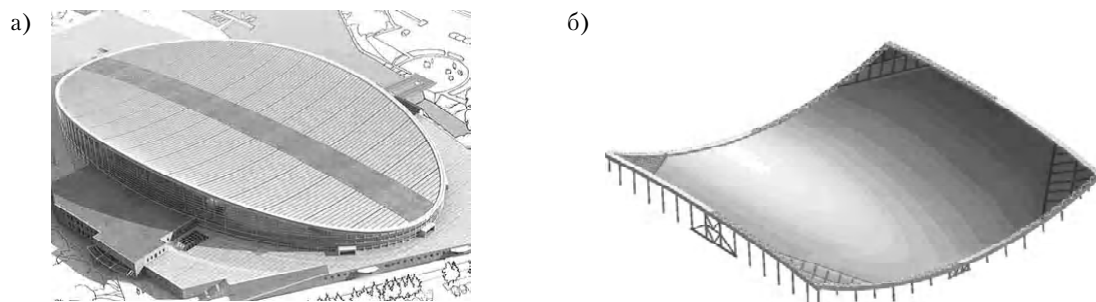


Рисунок 2 – Примеры мембранного покрытия: а) проект конькобежного стадиона в г. Коломна; б) общий вид мембранного покрытия хоккейного стадиона в г. Ангарск.

Однако проводимые исследования в области листовых конструкций показывают, что данные конструкции наиболее чувствительны к изменению основных факторов проектирования, которые влияют на характер напряженно-деформированного состояния покрытия и конструкции в целом.

К таким факторам относятся геометрические и прочностные характеристики листового проката, изготовляемого в Украине: климатические условия эксплуатации, коррозионный износ, геометрические несовершенства, обусловленные принятой технологией монтажа. Все вышеперечисленные факторы играют важную роль при разных методах расчета напряженно-деформированного состояния мембранного покрытия на эллиптическом плане.

В настоящее время определение напряженно-деформированного состояния мембранных оболочек, относящихся к группе вариационных методов анализа НДС, сводится к решению системы дифференциальных уравнений [1, 2]:

1. Статические уравнения.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \bar{X} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \bar{Y} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

2. Геометрические уравнения:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (2)$$

Уравнения совместности деформаций:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0. \quad (3)$$

3. Физические уравнения:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu \sigma_y], \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu \sigma_x], \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}. \quad (4)$$

Аналитический метод позволяет обосновать первоначальные проектные решения для реализуемых оболочек, в том числе с вырезом. Однако данный метод не учитывает геометрическую сложность конструкции, податливость опорного контура и другие особенности мембранного покрытия на эллиптическом плане.

Поэтому применяются численные методы для расчета напряженно-деформированного состояния мембранного покрытия. Сегодня преимущество предоставляется методу конечных элементов [3]. Особенностью метода является построение матриц жесткости на основе канонических уравнений, полученных для узловых точек расчетной сетки.

Как известно, наиболее затруднительным этапом исследования конструкций по МКЭ является формирование и решение систем разрешающих уравнений.

Здесь следует отметить упрощенную инженерную методику, разработанную проф. В. Ф. Муцановым, доцентами В. Р. Касимовым и Ю. В. Сивоконь для расчета напряженно-деформированного состояния мембранного покрытия на эллиптическом плане на основании безразмерных параметров конструкции [4, 5, 6]:

$$\begin{aligned} \bar{D}_1 &= \frac{E \cdot I_z^{внеш} \cdot a \cdot b_1^4 + E \cdot I_z \cdot a_1 \cdot b^4}{E \cdot t^* \cdot b^4 \cdot b_1^4}, \quad \bar{D}_2 = \frac{a^2}{b^2} + \frac{a_1^2}{b_1^2}, \quad \bar{D}_3 = \frac{\bar{w} \cdot a_1^2 \cdot f}{(t^*)^2}, \quad \bar{D}_4 = \frac{E \cdot I_y \cdot b}{E \cdot (t^*)^3 \cdot R_2^2}, \\ \bar{D}_5 &= \frac{E \cdot I_y \cdot b}{E \cdot (t^*)^3 \cdot a^2}, \quad \bar{D}_6 = \frac{a^2}{b^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

где a и b – размеры большой и малой полуосей внешнего опорного контура;
 a_1 и b_1 – размеры большой и малой полуосей внутреннего опорного контура;
 $I_z^{внеш}$ и I_z – моменты инерции внешнего и внутреннего контура;
 E – модуль упругости мембранного покрытия;
 \bar{w} – максимальное вертикальное перемещение оболочки;
 f – стрела провиса оболочки;
 R_2 – радиус кривизны внутреннего опорного контура в плоскости XOZ;
 t^* – приведенная толщина оболочки.

На основании общих уравнений теории пологих оболочек, рассмотренных в работе [5], уточнена система пространственно-жесткостных параметров для мембранных оболочек с учетом продольной жесткости внутреннего и внешнего опорных контуров в виде:

$$\bar{F}_1 = \frac{E \cdot F \cdot a \cdot b_1^2 + E \cdot F_{вн} \cdot a_1 \cdot b^2}{E \cdot t \cdot b^2 \cdot b_1^2}, \quad \bar{F}_2 = \frac{E \cdot F \cdot b \cdot a_1^2 + E \cdot F_{вн} \cdot b_1 \cdot a^2}{E \cdot t \cdot a^2 \cdot a_1^2}, \quad (6)$$

где t – толщина мембранной оболочки;
 F – площадь поперечного сечения внешнего опорного контура;
 $F_{вн}$ – площадь поперечного сечения внутреннего опорного контура.

Для расчета напряженно-деформированного состояния мембранного покрытия с перехода от безразмерных параметров мембранной оболочки воспользуемся формулами [7], которые позволяют учесть усилия и перемещения. При этом безразмерные пространственно-жесткостные параметры связаны с безразмерными параметрами НД. Безразмерные параметры: напряжения, усилия, изгибающий момент, вертикальные перемещения:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma \cdot a \cdot b}{E \cdot (t^*)^2}, \quad \bar{N} = \frac{N \cdot a \cdot b}{EF \cdot (t^*)^2}, \quad \bar{M} = \frac{M \cdot a \cdot b}{EI \cdot t^*}, \quad w = \left| \frac{w}{f} \right|, \quad (7)$$

где σ – абсолютное значение напряжения в элементе, Па;
 a – размер в плане большой полуоси покрытия;
 b – размер в плане малой полуоси;
 E – модуль упругости материала оболочки;
 (t^*) – приведенная толщина мембранной оболочки;
 N – абсолютное усилие в контуре, Н;
 EF – продольная жесткость контура;
 EI – изгибная жесткость контура;
 M – абсолютное значение изгибающего значения, кНм;
 w – абсолютное значение максимального перемещения в оболочке;
 f – стрела провиса оболочки.

Данная методика позволяет выполнить расчет на предварительной стадии проектирования мембранного покрытия на эллиптическом плане с большим вырезом, учитывая выгиб внутреннего опорного контура. Используя полученные данные о жесткостных характеристиках элементов конструкции, которые могут в дальнейшем использоваться при проверке напряженно-деформированного состояния мембранного покрытия с последующей оценкой надежности покрытия.

Одним из ключевых вопросов, в современном строительстве, является обеспечение надежности конструкции, а в особенности, большепролетных мембранных покрытий на эллиптическом плане с большим вырезом.

В основе решения задач надежности конструкций лежат методы теории вероятности и математической статистики. К важным аспектам вероятностных методов относится адекватный выбор закона распределения случайных величин и ординат случайных процессов.

При недостаточности статистических данных по отношению к разрушающим воздействиям и нагрузкам, на основе которых можно получить вероятностные параметры для определения надежности конструкции.

Исходя из этого, сегодня широко применяется подход, когда на основании статических исследований нагрузок, прочности материалов, свойств конструкций составляются вероятностные условия безотказной работы или отказа конструкции, при анализе которых получаются оценки надежности.

Обобщенное условие безотказной работы можно представить в следующем виде [8]:

$$\tilde{Y}(t) = \tilde{R}(t) - \tilde{S}(t), \quad (8)$$

где $\tilde{R}(t)$ – обобщенная несущая способность конструкции;
 $\tilde{S}(t)$ – обобщенная нагрузка на конструкцию;
 $\tilde{Y}(t)$ – резерв несущей способности.

Функционал несущей способности зависит от ряда факторов и имеет вид:

$$\tilde{Y} = Y(t, \tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n). \quad (9)$$

Вопросы надежности металлических конструкций, как статически определимых, так и неопределимых систем, рассматривали в своих работах П. Л. Визир, А. Р. Ржаницын, Ю. Д. Сухов и др. [9, 10].

При этом представленный метод в технической теории надежности сложных систем сводится к рассмотрению двух основных видов соединений:

1. Последовательное соединение:

$$P_m = \prod_{i=1}^m P_i, \quad (10)$$

где P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента;

2. Параллельное соединение:

$$P_m = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i). \quad (11)$$

Однако определения напряженно-деформированного состояния конструкции в целом, по выше изложенным формулам, не даст практического значения к оценке надежности элементов. Исходя из первой формулы, будет происходить корреляция между элементами, а вторая распределяет усилия между элементами после отказов одного из элементов.

Важно заметить, что использование в расчетах всех входных параметров достаточно затруднительно, в связи с этим рассматривается каждый входной параметр расчетной системы отдельно, что в свою очередь даст объективную оценку надежности каждого элемента в отдельности.

В анализируемой работе [11], в которой рассматривалась НДС с параллельно соединенными элементами, в качестве оценивающей надежности всяческих конструкций был принят параметр вероятности безотказной работы:

$$P_f = \frac{1}{2} f - \Phi \left(\frac{x - G_m}{S_G} \right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta), \quad (12)$$

где Φ – интеграл вероятности Гаусса;
 $\beta = \frac{x - G_m}{S_G}$ – характеристика безопасности.

При инженерном подходе всякая комбинированная система разбивается на несколько последовательно соединенных подсистем, внутри которых вычисляются групповые вероятности:

$$1 - P_{sis} = (1 - P_{нить}) \cdot (1 - P_{подв}) \cdot (1 - P_{бж}), \quad (13)$$

где P_{sis} , $P_{нить}$, $P_{подв}$, $P_{бж}$ – вероятность разрушения системы, несущих нитей, подвесок, балки жесткости.

Дальнейшее развитие работы А. А. Свентикова с применением инженерного метода было отражено в работе Ю. Н. Прядко, в которой смоделирован отказ отдельных элементов и выведена формула в виде:

$$I - P_{sis} = (I - P_{прол}) \times (I - P_{внеш.контур}) \times (I - P_{внутр.контур}). \quad (14)$$

Данная зависимость определяет вероятность неразрушения покрытия.

В работе [12] были выведены поправочные коэффициенты $k_w, k_\sigma, k_\sigma''$, которые при переходе от плоской к пространственной расчетной схеме позволяют уточнять значение напряжено-деформированного состояния узлов.

Использование инженерной методики с системой пространственно-жесткостных параметров для анализа напряженно-деформированного состояния дает возможность на предварительном этапе проектирования произвести вероятностный расчет разрушения конструкции, определив верхнюю границу надежности конструкции на эллиптическом плане с большим вырезом.

Приведенную выше систему безразмерных параметров можно упростить к следующему виду:

$$\bar{D}_1 = \frac{E \cdot I_z^{внеш} \cdot a \cdot b_1^4 + E \cdot I_z^{внутр} \cdot a_1 \cdot b^4}{E \cdot t \cdot b^4 \cdot b_1^4}, \quad \bar{D}_4 = \frac{E \cdot I_y^{внутр} \cdot b}{E \cdot t \cdot R^2}, \quad \bar{F}_1 = \frac{E \cdot F \cdot a \cdot b_1^2 + E \cdot F_{вн} \cdot a_1 \cdot b^2}{E \cdot t \cdot b^2 \cdot b_1^2}, \quad (15)$$

где $EI_z^{внеш}, EI_z^{внутр}$ – изгибные жесткости внешнего и внутреннего контуров в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

R – условный радиус кривизны внутреннего опорного контура;

a, b – полуоси покрытия на эллиптическом плане.

Однако данная методика не является унифицированной для всех видов большепролетных конструкций и требует уточнений для определения верхней и нижней границ надежности проектируемой конструкции.

С учетом вышеизложенного, для создания методики расчета НДС, на основе которой можно сделать выводы и дать оценку надежности мембранной оболочки на стадии предварительного проектирования, следует выполнить ряд задач:

1. Выполнить теоретические исследования напряженно-деформированного состояния мембранной оболочки с большим вырезом на эллиптическом плане при действии основных расчетных нагрузок с учетом особенностей совместной работы мембранной оболочки и подкрепляющих элементов постели.

2. На основе использования общепринятых подходов для наиболее неблагоприятного нагруженного состояния покрытия определить характерную траекторию разрушения конструкции мембранного покрытия на эллиптическом плане.

3. Разработать алгоритм определения вероятности отказа для внешнего сжато-изогнутого опорного контура с учетом возможностей потери несущей способности по прочности и устойчивости.

4. Разработать общий алгоритм для определения показателей надежности мембранного покрытия на эллиптическом плане.

5. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработать инженерную методику расчета и проектирования конструкции покрытия в виде большепролетной мембранной оболочки с большим вырезом на эллиптическом плане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муцанов, В. Ф. Уруго пластическое напряженное состояние круговых конических оболочек переменной и постоянной толщины с отверстием [Текст] / В. Ф. Муцанов, А. И. Демидов // Металеві конструкції. – 2008. – Том 14, № 3. – С. 125–142.
2. Расчет и проектирование пространственных металлических конструкций [Текст] : учебн. пособие / Е. В. Горохов, В. Ф. Муцанов, Я. В. Назим, И. В. Роменский ; под общей редакцией Е. В. Горохова. – Макеевка : ДонНАСА, 2012. – 561 с.
3. Метод конечных элементов в механике твердых тел [Текст] / Под ред. А. С. Сахарова и И. Альтенбаха. – Киев : Вища школа ; Лейпциг : Фех Фахбухферлаг, 1982. – 420 с.
4. Горохов, Е. В. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов [Текст] / Е. В. Горохов, В. Ф. Муцанов, В. Р. Касимов. – Макеевка : ДонГАСА, 2002. – 280 с.
5. Сивоконь, Ю. В. Мембранные оболочки покрытий над трибунами стадионов с большими вырезами на эллиптическом плане [Текст] : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю. В. Сивоконь. – Макеевка, 2007. – 273 с.
6. Касимов, В. Р. Прочность и деформативность большепролетной стержневой оболочки покрытия с большим вырезом на эллиптическом плане [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / В. Р. Касимов. – Макеевка, 2004. – 172 с.

7. Самуль, В. И. Основы теории упругости и пластичности [Текст] / В. И. Самуль. – Москва : Высшая школа, 1982. – 264 с.
8. Пичугин, С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий [Текст] / С. Ф. Пичугин. – Полтава : ООО «АСМИ», 2009. – 452 с.
9. Визир, П. Л. Приближенный метод определения надежности элемента статически определимой системы [Текст] / П. Л. Визир // Стр. механика и расчет сооружений. – 1979. – № 5. – С. 42–52.
10. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
11. Свентиков, А. А. Разработка и исследование висячих стержневых пространственных покрытий повышенной жесткости [Текст] : автореф. дис. доктора техн. наук / А. А. Свентиков. – Воронеж, 2010. – 420 с.
12. Прядко, Ю. Н. Надежность большепролетных стержневых покрытий с большим вырезом, образованных системой жестких нитей на эллиптическом плане [Текст] : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю. Н. Прядко. – Макеевка, 2013. – 173 с.

Получено 13.05.2014

В. П. МУЩАНОВ, В. О. ШПИНЬКОВ
ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ПРОЕКТНОЇ НАДІЙНОСТІ
МЕМБРАННИХ ПОКРИТІВ НАД ТРИБУНАМИ СТАДІОНУ
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті розглядаються існуючі конструктивні покриття мембранного типу, а також проведено аналіз методик розрахунку напружено-деформованого стану мембранного покриття на еліптичному плані.
мембранне покриття, напружено-деформований стан, безрозмірні параметри

VLADIMIR MUSHCHANOV, VLADIMIR SHPINKOV
RATIONALE FOR VALUATION APPROACHES DESIGN ROBUST MEMBRANE
COVERING OVER THE STANDS
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The paper examines existing structural coating membrane, and also the analysis of methods for calculating the stress-strain state of a membrane coating on an elliptical plan has been done.
membrane coating, the stress-strain state, the dimensionless parameters