



## ОПТИМІЗАЦІЯ МЕМБРАННОЇ ОБОЛОНКИ З ВЕЛИКИМ ОТВОРОМ НА ОВАЛЬНОМУ ПЛАНІ

**В.П. Мущанов, Ю.В. Сивоконь**

*Кафедра "Теоретична і прикладна механіка", Донбаська національна академія будівництва і архітектури, вул. Державіна 2, 86123, м. Макіївка, Україна.  
E-mail: y55lia@mail.ru*

*Отримана 20 лютого 2006; прийнята 22 травня 2006*

**Анотація.** В статті описано застосування методів оптимізації до мембранної оболонки покриття стадіону на овальному плані з великим отвором. Оптимізація проводилася по безрозмірному параметру  $\bar{F}_1$  та площині поперечного перерізу внутрішнього опорного контуру (жорсткості на розтяг-стиск) для цільової функції  $t$ -товщини мембрани.

**Ключові слова:** сталеві мембранна оболонка постійної товщини, напружено-деформований стан, методика оптимізації, наближена методика розрахунку оболонки.

## ОПТИМИЗАЦИЯ МЕМБРАННОЙ ОБОЛОЧКИ С БОЛЬШИМ ВЫРЕЗОМ НА ОВАЛЬНОМ ПЛАНЕ

**В.Ф. Мущанов, Ю.В. Сивоконь**

*Кафедра "Теоретической и прикладной механики", Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина 2, 86123, г. Макеевка, Украина.  
E-mail: y55lia@mail.ru*

*Получена 20 февраля 2006; принята 22 мая 2006*

**Аннотация.** В статье описано применение методов оптимизации к мембранной оболочке покрытия стадиона на овальном плане с большим вырезом. Оптимизация проводилась по безразмерному параметру  $\bar{F}_1$  и площади поперечного сечения внутреннего опорного контура (жесткости на растяжение-сжатие) для целевой функции  $t$ -толщины мембраны.

**Ключевые слова:** стальная мембранная оболочка постоянной толщины, напряженно-деформированное состояние, методика оптимизации, приближенная методика расчета оболочки.

## OPTIMIZATION MEMBRANE ENVIRONMENTS WITH GREATER ВЫРЕЗОМ ON THE OVAL PLAN

V.F. Mushchanov, Yu.V. Syvokon

*Department of theoretical and applied mechanics, Donbas National Academy of Civil Engineering and  
Architecture, Derzavin str. 2, 86123, Makeyevka, Ukraine.*

*E-mail: y55lia@mail.ru*

*Received 20 February 2006; accepted 22 May 2006*

**Abstract.** In clause application of methods of optimization to membrane to an environment of a covering of stadium on the oval plan with greater aperture is described. Optimization it was spent on dimensionless parameter  $\bar{F}_1$  and the area of cross-section section of an internal basic contour (rigidity on a stretching-compression) for criterion function of t-thickness of a membrane.

**Keywords:** steel membrane an environment of the constant thickness, the is intense-deformed condition, a technique of the optimization, the approached design procedure of an environment.

### Связь оптимизации конструкций с важными научными и практическими задачами

При проектировании строительных конструкций наибольший экономический эффект может быть получен при назначении проектных параметров в результате применения методов теории оптимизации. Оптимальное проектирование представляет собой целенаправленный выбор параметров с применением методов теории оптимизации, в результате которого получается наилучшее по заданному критерию конструктивное решение.

### Анализ последних достижений и публикаций

В работе [5] был рассмотрен общий подход к оптимизации строительных конструкций. В работе [4] выполнена оптимизация мембранного покрытия на прямоугольном плане. На напряженно-деформированное состояние и экономические показатели такого покрытия существенно влияют толщина оболочки, размеры сечения опорного контура и начальная стрела провиса оболочки.

### Цели оптимизации и нерешенная часть проблемы

Оптимизация конструктивной формы покрытия или отдельного его элемента осуществляется на

этапе разработки технических предложений. На этом этапе имеется возможность оптимизации не только отдельных элементов, но и объемно-планировочного решения объекта в целом, а также методов производства строительного-монтажных работ и т.д.

### Применение методики оптимизации к мембранной оболочке на овальном плане с размерами полуосей 123 и 85 м.

В качестве критерия оптимальности принимаем толщину  $t$  мембранной оболочки. Основными параметрами, влияющими на толщину, являются продольная жесткость внутреннего опорного контура и стрела провиса. Продольная жесткость внутреннего опорного контура  $EF_{внутр}$  входит в безразмерный параметр  $\bar{F}_1$ :

$$\bar{F}_1 = \frac{EF_{внеш} \cdot a \cdot b_1^2 + EF_{внутр} \cdot a_1 \cdot b^2}{E \cdot t \cdot b^2 \cdot b_1^2} \quad (1)$$

Стрела провиса оболочки входит в безразмерный параметр  $\bar{w} = w/f$ , где  $w$  — максимальные вертикальные перемещения оболочки, которые для расчета принимаются 0.15м.

Поэтому эти параметры принимаются в качестве варьируемых. При расчете оболочки рекомендуется использовать следующие ограничения:  $t = 2 \div 6$  мм,  $f = (1/20 \div 1/40)L$  [3],

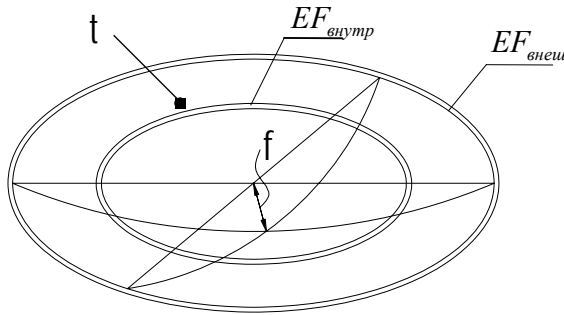


Рис 1. Параметры оптимизации мембранной оболочки.

$$F_{\text{внутр}} = (0.8 \dots 1.2) \cdot 0.056 \text{ м}^2,$$

$$\bar{F}_1 \in [0.626 \dots 1.83].$$

В алгоритм закладывается инженерная методика определения НДС оболочки для мембранного покрытия с нормативной снеговой нагрузкой 50 кг/м<sup>2</sup>, при перекрытии 100% площади трибун стадиона [6].

Задачу оптимизации можно сформулировать в терминах математического программирования, как требование определить оптимальные параметры  $X_i^*$ , при которых целевая функция  $f(X_i)$  достигнет экстремального значения (минимума) в области допустимых значений, представленных в виде неравенств:

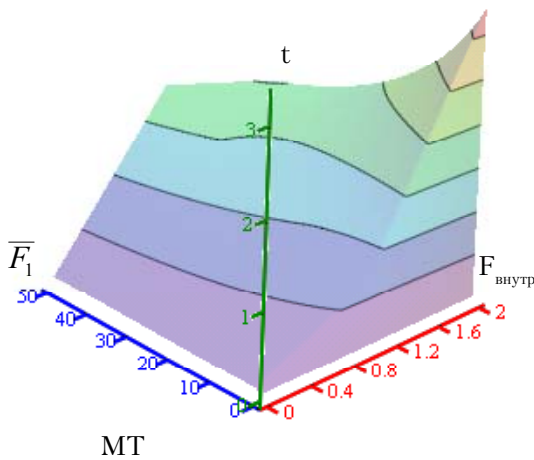


Рис 2. Целевая функция толщины оболочки (вертикальная ось) в зависимости от параметров  $\bar{F}_1$  и  $F_{\text{внутр}}$  (горизонтальные оси).

$$L_i \leq x_i \leq U_i, \text{ при } i = 1 \dots n \quad (2)$$

$$g_j(X) \leq b_j, \text{ при } j = 1 \dots m \quad (3)$$

Здесь в формуле (2) представлены явные ограничения переменных, от которых зависит целевая функция, в формуле (3) — неявные ограничения. Здесь везде имеется в виду, что

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} - \text{вектор-столбец } n \text{ переменных, от}$$

которых зависит целевая функция, m — количество неявных ограничений. В данном случае 2 переменных.

Для решения указанной задачи выразим толщину оболочки t через безразмерный параметр  $\bar{F}_1$  из формулы (1):

$$t = \frac{EF_{\text{внеш}} \cdot a \cdot b_1^2 + EF_{\text{внутр}} \cdot a_1 \cdot b^2}{E \cdot \bar{F}_1 \cdot b^2 \cdot b_1^2} \quad (4)$$

таким образом, получаем функцию двух переменных  $t = t(F_{\text{внутр}}, \bar{F}_1)$  - остальные параметры фиксированные. Это  $a = 123 \text{ м}$ ,  $b = 85 \text{ м}$  - полуоси внешнего опорного контура;  $a_1 = 93.72 \text{ м}$ ,  $b_1 = 65 \text{ м}$  - полуоси внутреннего опорного контура;  $E = 2.06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  - модуль упругости стали,  $EF_{\text{внеш}} = 13640805 \text{ кН}$  - жесткость внешнего опорного контура.

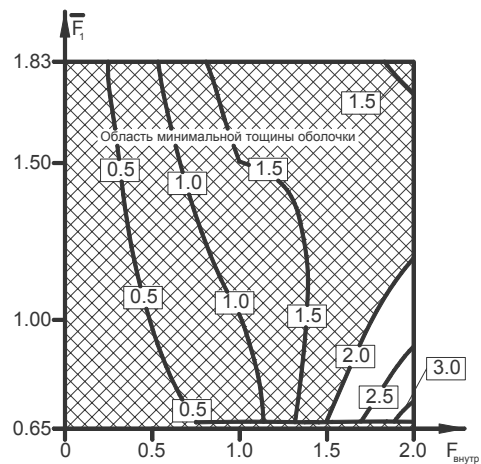


Рис 3. Целевая функция толщины оболочки в зависимости от параметров  $\bar{F}_1$  и  $F_{\text{внутр}}$  вид сверху с обозначением области минимальной толщины. Здесь параметр  $F_{\text{внутр}}$  меняется в наиболее оптимальном диапазоне  $F_{\text{внутр}} = (0.8 \dots 1.2) \cdot 0.056 \text{ м}^2$ .

Так как рекомендуемая толщина оболочки может принимать значения 2...6 мм, ограничим целевую функцию там, где она принимает значения меньше 2 мм этим значением.

Кроме того, учитывая конструктивные возможности варьирования жесткостными параметрами внутреннего опорного контура, ограничиваем пределы изменения площади поперечного сечения внутреннего опорного контура  $F_{внутр} = (0.8...1.2) \cdot 0.056 \text{ м}^2$ . Если посмотреть на объемный график функции и на его изолинии, то увидим, что целевая функция  $t$  принимает значения 2 мм, и менее в некоторой области, которую можно описать неравенством:

$$\bar{F}_1(F_{внутр}) \leq 11.091 \cdot F_{внутр} - 0.564, \quad (5)$$

где  $F_{внутр}$  в  $\text{м}^2$

Следовательно, оптимальной будет оболочка, параметры которой удовлетворяют неравенству (5) и наложенным на эти параметры ограничениям. Зная безразмерный параметр  $\bar{F}_1$  и используя зависимости  $w(F_1)$  и др., полученную путем аппроксимации значений в результате численного эксперимента, можно вычислить стрелу провиса и параметры напряженно-деформированного состояния оболочки и опорных контуров.

Например, для исследуемой расчетной схемы:

$$\bar{w} = 0.002768 + \bar{F}_1 \cdot 4.03 \cdot 10^{-5} + \frac{2129.1}{\bar{F}_1^2} \quad (6)$$

В таблицах приведены сравнительные параметры оболочек до оптимизации и после оптимизации (оболочек, которые удовлетворяют наложенным ограничениям и неравенству (5)).

### Вывод

В статье предложенный алгоритм оптимизации толщины пологой мембранной оболочки на эллиптическом плане с большим вырезом, учитывающий изменение жесткостных характеристик опорных контуров при соблюдении заданной величины прогиба  $w = w/f$ .

### Литература

1. Горохов Е.В. Муцанов В.Ф. Касимов В.Р. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов. — Макеевка.: ДонГАСА, 2002. — 156 с.
2. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. — Москва.: Радио и связь, 1988. — 128 с.
3. Андреева Г.Н. Гольденберг Л.И. Демьгина С.Н. и др. Мембранные конструкции зданий и сооружений Под общей редакцией В.И. Трофимова и П.Г. Еремеева: Справочное пособие в двух частях. — Москва.: Стройиздат, 1990. — 248 с.
4. Еремеев П.Г. Картелишвили В.М. Ладыженский Д.В. Роменский И.В. Оптимизация конструкций мембранных покрытий по технико-экономическим критериям// Строительная механика и расчет сооружений. — Москва: Госстрой. — 1990. — №3. — С. 48-51.

Таблица 1.

<i>Исходные данные:</i>	Оболочка до	Оболочка после
	оптимизации	оптимизации
размеры полуосей оболочки	$a=123 \text{ м}, b=85 \text{ м}$	
размеры полуосей выреза	$a_1=93 \text{ м}, b_1=64.27 \text{ м}$	
модуль упругости	$E = 2.06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$	
продольная жесткость внешнего опорного контура	$EF_{внеш} = 1.3636 \cdot 10^7 \text{ кН.}$	
толщина оболочки	$t=2 \text{ мм}$	
стрела провиса в центре поверхности, образующей оболочку	$f=16.72 \text{ м}$	$f=16.78 \text{ м}$
площадь поперечного сечения внутреннего опорного контура	$F_{внутр} = 0.056 \text{ м}^2$	$F_{внутр} = 0.045 \text{ м}^2$

Таблица 2. Расчет оболочки до и после оптимизации. Сравнительная таблица.

Усилия, напряжения, перемещения	До оптимизации	После оптимизации
<b>Максимальное вертикальное перемещение мембраны</b> $w$ , м	-0.146	-0.15
<b>Максимальные напряжения в мембране:</b>		
По большой полуоси $\sigma_{ax}$ , МПа	12.8	13.06
$\sigma_{ay}$ , МПа	55.19	66.06
По диагонали $\sigma_{bx}$ , МПа	14.91	14.64
$\sigma_{by}$ , МПа	47.07	46.10
По малой полуоси $\sigma_{cx}$ , МПа	17.49	16.41
$\sigma_{cy}$ , МПа	40.21	44.36
<b>Усилия во внутреннем опорном контуре:</b>		
По большой полуоси $N_a$ , МН	3.56	4.06
По диагонали $N_b$ , МН	3.12	3.53
По малой полуоси $N_c$ , МН	2.18	2.37
<b>Усилия во внешнем опорном контуре:</b>		
По большой полуоси $N_a$ , МН	-3.60	-3.39
По диагонали $N_b$ , МН	-3.26	-4.50
По малой полуоси $N_c$ , МН	-2.60	-2.48
<b>Изгибающие моменты во внутреннем опорном контуре:</b>		
<i>В вертикальной плоскости</i>		
По большой полуоси $M_a^y$ , кНм	74.93	44.55
По диагонали $M_b^y$ , кНм	86.02	59.05
По малой полуоси $M_c^y$ , кНм	87.74	11.88
<i>В горизонтальной плоскости</i>		
По большой полуоси $M_a^z$ , кНм	-67.47	-62.97
По диагонали $M_b^z$ , кНм	-3.76	-3.70
По малой полуоси $M_c^z$ , кНм	-102.38	-84.87
<b>Изгибающие моменты во внешнем опорном контуре:</b>		
<i>В вертикальной плоскости</i>		
По большой полуоси $M_a^y$ , кНм	98.89	218.09
По диагонали $M_b^y$ , кНм	111.84	369.55
По малой полуоси $M_c^y$ , кНм	161.43	46.48
<i>В горизонтальной плоскости</i>		
По большой полуоси $M_a^z$ , кНм	-1.96	-1.83
По диагонали $M_b^z$ , кНм	-1.45	-2.35
По малой полуоси $M_c^z$ , кНм	-0.87	-0.95
Объем стали для оболочки и контуров $V$ , м <sup>3</sup>	139.918	134.457

5. Валу́йских В.П. Гибкие стратегии статических методов оптимального проектирования конструкций// Строительная механика и расчет сооружений. Москва: Госстрой. — 1990. — №2. — С. 31- 38.
6. Мущанов В.Ф. Сивоконь Ю.В. Зубенко А.В. Особенности исследования закономерностей

работы мембранных оболочек покрытий с большими вырезами// Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. — Випуск 10. — Рівне: УДУВГП. — 2003. — С. 144-150.

**Мущанов Володимир Пилипович** працює завідувачем кафедри "Теоретична і прикладна механіка", проректором з наукової роботи Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Міжнародної організації по мостам і будівельним конструкціям та міжнародної асоціації "Просторові конструкції", аудитор системи сертифікації УкрСЕПРО. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Сивоконь Юлія Володимирівна** є асистентом та аспірантом кафедри "Теоретична і прикладна механіка" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових мембранних конструкцій.

**Мущанов Владимир Филиппович** работает заведующим кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе. Член Международной организации по мостам и строительным конструкциям и международной ассоциации "Пространственные конструкции", аудитор системы сертификации УкрСЕПРО. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Сивоконь Юлия Владимировна** является аспирантом и работает ассистентом кафедры "Теоретическая и прикладная механика" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: расчет и проектирование пространственных мембранных конструкций.

**Muschanov Volodimir Pilipovich** is a Principal of Theoretical and applied mechanics department, prorector of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of International Association for Bridge and Structural Engineering, and member of International Association of Spatial Structures, auditor of certification scheme UKRSEPRO. His research interests include the reliability theory, calculation, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

**Yulia V. Syvokon** works is the post-graduate student and the assistant to faculty "Theoretical and applied mechanics" Donbass national academy of construction and architecture. Scientific interests: calculation and designing spatial membrane designs.