

## РЕАЛИЗОВАННЫЕ МЕМБРАННЫЕ ОБОЛОЧКИ. РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВОЗВЕДЕНИЕ.

Н.В. КАНЧЕЛИ, д.т.н., ЗАО «Курортпроект», Москва

П.А. БАТОВ, к.ф.-м.н. ЗАО «Курортпроект», Москва

Д.Ю. ДРОБОТ, асп. МГСУ, инженер ЗАО «Курортпроект», Москва.

С 2000-2008 г специалистами ЗАО «Курортпроект» были запроектированы две мембранные оболочки в г. Коломна, и в г. Ангарск. Сооружения, несмотря на различные размеры, весьма схожи по конструктивной основе, что показывает широкие возможности формообразования мембранных оболочек.

### Перекрытие главного зала конькобежного центра в г. Коломне

#### *Выбор оптимального покрытия и его приближённый расчёт.*

Спортивный центр в г. Коломне предназначен для проведения соревнований международного уровня, возведен на месте старого спортивного центра буквально в нескольких сотнях метров от стен и башен Коломенского кремля.



Рис. 1. а) Подача рулонированных полотнищ мембраны, их раскатка по временным элементам постели.  
б) Законченное мембранное покрытие, вид с противоположного берега реки Коломенка

Главный зал центра перекрыт стальной мембраной. Применение висячего покрытия на овальном плане позволило создать сооружение минимального объема при обеспечении соответствующих требований внутренней планировки, спортивной технологии, размещения трибун и зон видимости.

В соответствии с архитектурным заданием конькобежный стадион должен иметь вытянутую беговую дорожку с размерами 178 x 68 м и трибуны, расположенные вдоль длинных сторон. В этом случае требовалось покрытие овальной формы, имеющее наиболее высокие точки по серединам длинных сторон. Если плавно очертить требуемые высоты вдоль контура сооружения, то получится пространственная кривая на овальном плане с низшими точками по серединам коротких сторон и высокими по центрам длинных. Такая форма обеспечивает расположение зрительских трибун, комментаторских и судейских кабин вдоль длинных сторон объекта. С учетом необходимости стока воды с покрытия его оптимальной формой является седлообразная поверхность на эллиптическом плане.

При проектировании оболочечных систем очень важно минимизировать изгибающие моменты в разных элементах покрытия (поле оболочки, опорный контур, колонны и фундаменты). Поскольку поле мембраны не может быть моментным кроме малых краевых эффектов, колонны и фундаменты при шарнирных узлах по верху и низу при наличии связей в плоскостях наружных стен также не могут воспринимать моментные усилия. Тогда опорный контур в основном будет работать на сжатие, при этом испытывая незначительные изгибающие моменты лишь в вертикальной плоскости. Таким образом, основная задача заключается в обеспечении безмоментности опорного контура. Последнее условие реализуется при следующем соотношении размеров сторон в плане:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{l_1^2}{l_2^2}$$

Вывод функциональных зависимостей подробно освещен в работе [1] (§2, глава 1). По следующим формулам были выполнены приближенные ручные расчёты мембранной оболочки на равномерную симметричную нагрузку:

$$T_1 = q \cdot \frac{l_1^2}{2(f_1 + f_2)} = 0.3 \cdot \frac{100^2}{2 \cdot (9.5 + 3.5)} = 115 \frac{m}{m},$$

$$T_2 = q \cdot \frac{l_2^2}{2(f_1 + f_2)} = 0.3 \cdot \frac{100^2}{2 \cdot (9.5 - 3.5)} = 35 \frac{m}{m},$$

$$N_{\min} = T_2 l_1 = 35 \cdot 100 = 3500m,$$

$$N_{\max} = T_1 l_2 = 115 \cdot 55 = 6325m,$$

где:  $T_1$  – усилие в мембране вдоль длинной оси,  
 $T_2$  – усилие в мембране вдоль короткой оси,  
 $l_1 = 100$  м – большая полуось эллипса,  
 $l_2 = 55$  м – меньшая полуось эллипса,  
 $f_1 = 9.5$  м – стрела провиса мембраны по малой оси,  
 $f_2 = 3.5$  м – стрела подъёма мембраны по большой оси,  
 $q$  – полная расчётная нагрузка,  
 $N_{\max}, N_{\min}$  – максимальное и минимальное усилие в опорном контуре.

Результаты приближенных расчетов достаточно близко совпали с компьютерными, что подтверждает применимость на практике вышеуказанных формул.

**Конструктивное решение. Порядок монтажа.** Мембрана была образована раскаткой рулонов покрытия из стали толщиной 4 мм по смонтированным элементам «постели», которые крепятся к металлоконструкциям опорного контура. Конструктивно «постель» решена в виде системы параллельных элементов из листовой стали 150 x 4 мм, идущих с шагом 4 м. Узел примыкания «постели» к «фартуку» опорного контура имеет регулировочное устройство, позволяющее осуществлять подтяжку «постели». Во время монтажа для уменьшения деформаций из плоскости от действия ветровых нагрузок, «постель» раскрепляется системой временных распорок. Сварка полотнищ мембраны производится после укладки всех элементов мембраны в проектное положение. Провис мембраны в поперечном направлении в период монтажа составляет 9.5 м, а вспарушенность в продольном направлении для обеспечения водоотвода – 3.5 м.



Рис. 2. а) Заваренное мембранное покрытие зимой 2004-2005 годов.  
 б) Сдача объекта в эксплуатацию летом 2006 года.

Опорный контур опирается по периметру с шагом около 12 м на шарнирные стойки трубчатого сечения высотой от 7 до 20 м, диаметром 430 мм. Стойки изнутри заполнены пескобетоном класса В25, что существенно повышает их стойкость к аварийным (взрывным) нагрузкам. Опорный контур здания вдоль продольных сторон дополнительно опирается на две арки пролетом около 70 м, необходимые для «перешагивания» через существующий дворец спорта. Арки обеспечивают устойчивость сооружения и восприятие ветровых нагрузок в направлении продольной оси. Арки запроектированы из сварных двутавров. В поперечном направлении устойчивость сооружения на стадии строительства обеспечивается малыми арками, а на стадии эксплуатации – ж.б. стенами, расположенными по торцам сооружения. Опорный контур оболочки имеет прямоугольное сечение размерами 1.2 x 1.5(h) м, выполнен в виде заполненного бетоном стального короба, с уложенной внутри арматурой.

При строительстве была использована наиболее рациональная схема монтажа мембранных оболочек – раскатка рулонов мембраны по заранее смонтированной висячей «постели». Во время монтажа оболочка представляет собой дискретную систему с вантами, расположенными в параллельных плоскостях. Контур такой системы для возможности сохранения ее формы при монтаже мембранных листов должен быть раскреплен временными связями: подкосами или затяжками. В данном случае бортовой элемент подпирался наклонными стойками с песочными домкратами у нижней опоры. Снятие усилий с домкратов производилось одновременно этапами по 3-5 мм. В начальный момент монтажа мембранных листов усилия в подкосах нулевые, после окончания монтажа усилия в них достигают максимального значения. После заварки листов мембраны между собой и контуром система превращается в континуальную систему, способную работать в двухосном напряженном состоянии. Повисшая на опорном контуре мембрана обеспечивает его устойчивость и малую деформативность. При снятии усилий с временных подкосов, в провисающем направлении мембраны контур перемещается к оси оболочки, а во вспарушенном направлении контур перемещается в сторону от оси оболочки. При этом происходит преднапряжение мембраны в обоих направлениях.

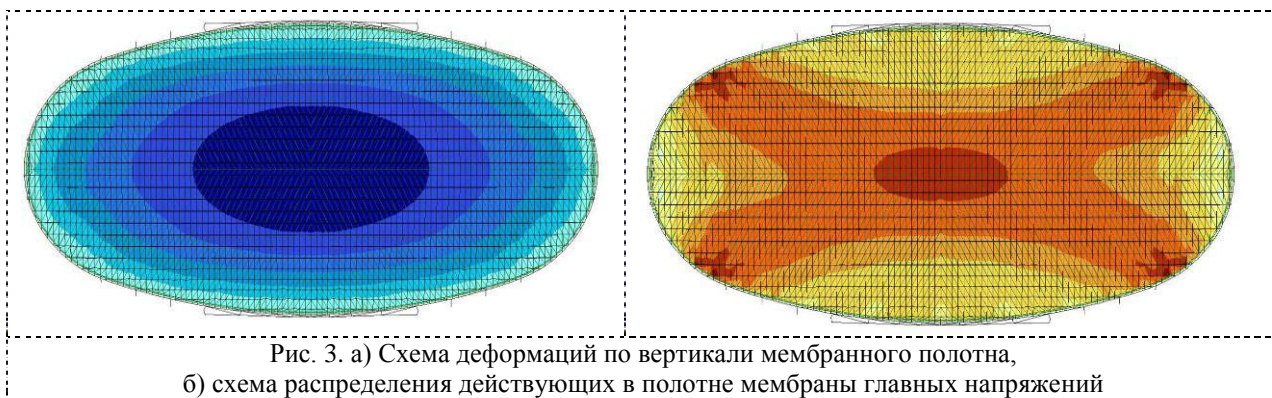
#### ***О компьютерных расчётах конструкции.***

Расчет сооружения на все предусмотренные нормами нагрузки и воздействия на всех этапах монтажа и в стадии эксплуатации с накоплением усилий производился в геометрически нелинейной постановке на двух программах разных разработчиков. Дополнительно поверочный расчет был выполнен специалистами Киевского НИИАСС. Результаты расчета по всем вариантам для контроля сравнивались между собой. Кроме того, учитывая сложность и уникальность сооружения, была проведена серия испытаний на модели масштаба 1:50 в лаборатории НИИ транспортного строительства (ЦНИИС).

При порядке монтажа, реализованном в натуре, оболочка до заварки листов мембраны между собой и к опорному контуру представляет собой дискретную систему из параллельно расположенных висячих стальных полос. После заварки мембраны она вместе с опорным контуром преобразуется в континуальную оболочку. Как следствие расчёт этих двух состояний различен:

- на первом этапе рассчитываются отдельные висячие нити на вес мембраны, а опорный контур на систему параллельных сил от распора висящей «постели» и на восприятие нагрузок от веса «мокрого» бетона при его бетонировании,

- на втором этапе континуальная мембрана с опорным контуром рассчитывается на все постоянные и временные нагрузки.



Для учёта изменения расчетной схемы в процессе возведения и геометрической нелинейности системы, специалистами ЗАО «Курортпроект» был применен программный комплекс «ЛИРА 9.2» (модуль «Монтаж+»). Для выявления резервов несущей способности мембранного покрытия фирмой «HEXA» (<http://www.hexa.ru>) был выполнен компьютерный расчёт с увеличенной снеговой нагрузкой. Расчёт проводился в программном комплексе «ABAQUS». При расчёте были приняты следующие коэффициенты перегрузки  $k_1 = 1.37$ ,  $k_2 = 1.94$ ,  $k_3 = 2.93$ . В результате расчётов установлено, что при коэффициенте перегрузки  $k \sim 2.7$ , соответствующему снеговой нагрузке интенсивностью  $486 \text{ кг/м}^2$ , происходит выпрямление впадины оболочки в продольном направлении.

### Перекрытие главного зала хоккейного стадиона в г. Ангарск

#### *Выбор оптимального покрытия и его приближённый расчёт.*

Покрытие хоккейного стадиона возводится над существующей ареной с трибунами по двум противоположным сторонам. Такое условие предопределило устройство более высокой части покрытия по двум сторонам, где расположены трибуны, и опускающейся части по двум другим. Было принято решение применить новый тип мембранной оболочки на прямоугольном плане с временными затяжками по авторскому свидетельству разработчиков проекта.

Покрытие прямоугольное в плане  $90 \times 87 \text{ м}$  представляет собой оболочку переноса, образованную движением провисающей параболы пролетом  $90 \text{ м}$  со стрелкой  $10 \text{ м}$  по впадине параболы пролетом со стрелкой  $2.5 \text{ м}$ .

Уравнение поверхности оболочки имеет вид:

$$z = \frac{f_2}{l_2^2} y^2 - \frac{f_1}{l_1^2} x^2.$$

Поскольку для монтажа мембраны применена система раскатки стальных рулонированных листов по заранее смонтированной «постели», а заварка листов между собой и к опорному контуру производится после раскладки всей мембраны, то система принципиально меняет в процессе монтажа свою расчетную схему.

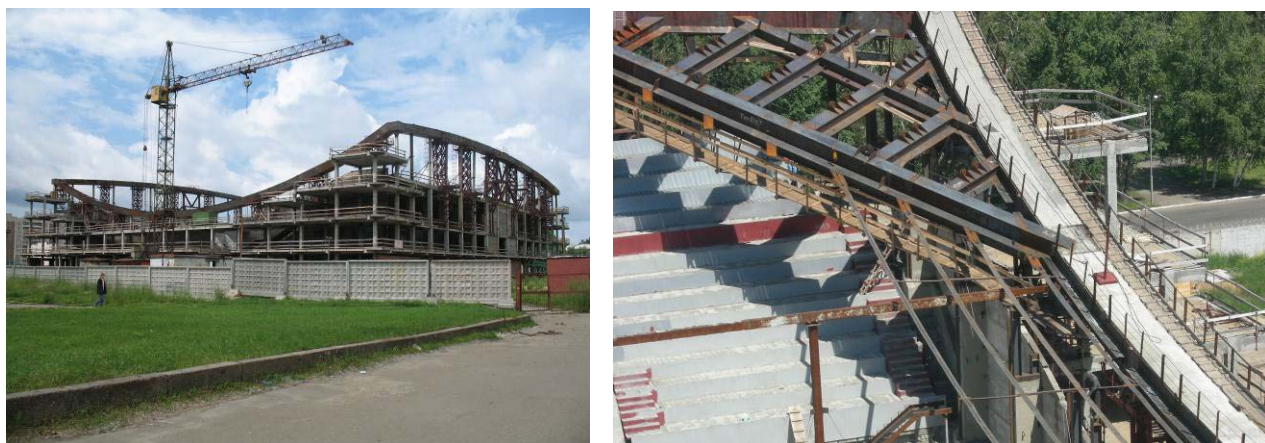


Рис. 4. а) Смонтированный опорный контур на временных опорах  
б) Начало навески нитей «постели».

Аналитический расчет такой оболочки весьма сложен. Задание начальных параметров системы для компьютерных расчетов можно выполнить по [1]. При дальнейших расчетах параметры должны уточняться.

Следует отметить, что первый вариант покрытия был разработан еще в институте «Союзкурортпроект» в 80-е годы XX века. Тогда покрытие представляло собой цилиндрическую оболочку с размерами в плане 90 x 87 м и стрелой провеса 9.5 м, и выполнялось из стального листа толщиной 3 мм. Замкнутый опорный контур из сборно-монолитного железобетона имеет сечение 1 x 1.5 м с утолщением по углам по 1 x 3.8 м

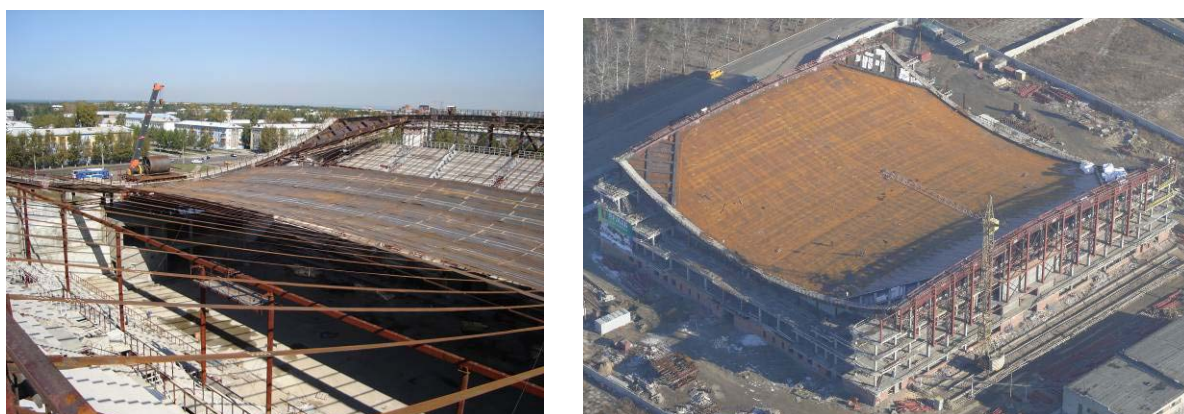


Рис. 5. а) Раскладка полотнищ мембраны по временным элементам «постели».  
б) Законченное мембранное покрытие. Осень 2007г.

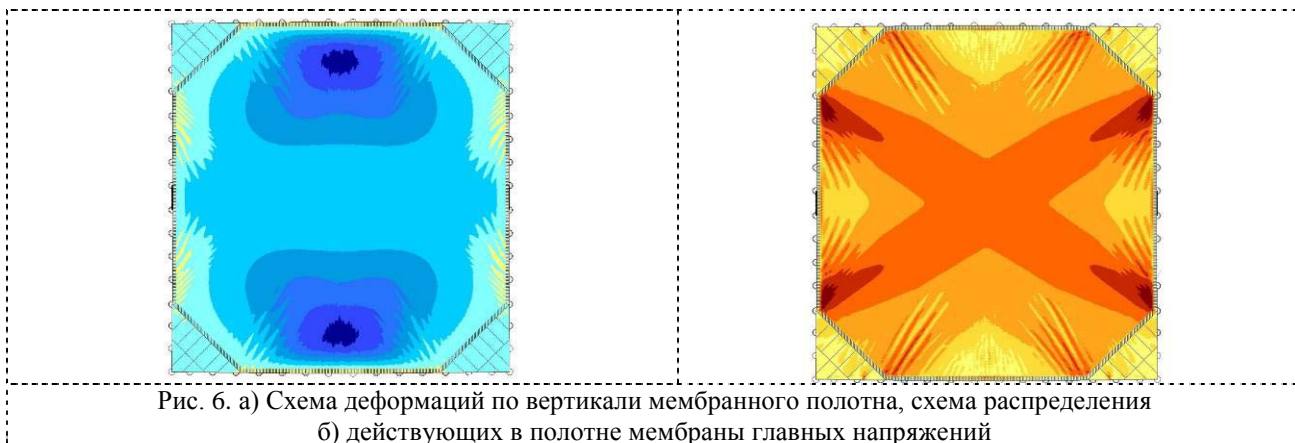
**Конструктивное решение. Порядок монтажа.** Мембрана, выполненная из стального листа толщиной 4мм, возводится раскаткой рулонированных стальных листов по висячей «постели». «Постель» выполнена из стальных полос 150 x 6 мм, идущих с шагом 2,0 м.

Опорный контур оболочки имеет прямоугольное сечение размерами 1.2(h) x 1.5 м, выполнен в виде заполненного бетоном стального короба с уложенной внутри арматурой.

Если на стадии до заварки мембраны не принять некоторые временные конструктивные меры, то изгибающие моменты и перемещения в горизонтальной плоскости контура будут в несколько раз больше, чем перемещения и моменты в эксплуатационной стадии. С целью увеличения жесткости опорного контура и уменьшения моментов в нем в углах оболочки с помощью ортогональной балочной клетки выполнены четыре жестких в плоскости поверхности угловых участка. Эти участки попарно соединены временными стальными затяжками, демонтируемыми после заварки мембраны. Регулируемые затяжки позволили сократить деформации контура и уменьшить изгибающие моменты в несколько раз.

Опорная система оболочки воспринимает вертикальные и горизонтальные воздействия и обеспечивает общую устойчивость сооружения при сохранении возможности свободного

перемещения опорного контура в направлении ортогональном плоскости наружных стен. Это достигается устройством колонн с полными шарнирами с обоих концов, что позволяет не передавать изгибающие моменты на колонны и нижележащие конструкции при изменении вертикальных нагрузок на покрытие. Все горизонтальные воздействия (ветер, сейсмика и т.д.) воспринимаются плоскими рамами с цилиндрическими шарнирами в их плоскости по осям наружных стен. Сама же мембранная оболочка активно работает в диагональном направлении. Такое направление является наиболее растянутым, а перпендикулярно ему в приопорной зоне возле контура от сжимающих напряжений малой интенсивности образуются складки (волны). Максимальные прогибы покрытия получаются в зоне с наименьшей жесткостью – зоне, повисшей на диагональном кресте (см. рис. 6).



Основные этапы порядка монтажа оболочки совпадают с этапами монтажа при строительстве оболочки в г. Коломна.

### ***Заключение.***

Более подробные материалы о вышеуказанных мембранных покрытиях можно будет найти в книге «Реализованные мембранные оболочки. Расчет, проектирование и возведение». Издательство «АСВ» планирует публикацию книги в 2-м квартале 2009 г. В книге приведены все этапы проектирования таких сооружений от начальных приближенных расчетов до подробнейшего компьютерного моделирования, а также все принципиальные конструктивные схемы, элементы и узлы. Книга проиллюстрирована фотографиями с натуры на разных этапах возведения сооружений.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Канчели Н.В. Строительные пространственные конструкции. М.: АСВ, 2008 – 126с.
2. Канчели Н.В. Седлообразная мембранная оболочка над ареной конькобежного стадиона в г. Коломне. «Строительные материалы и оборудование XXI века» 8(91), 2006. – С. 66-67.
3. Канчели Н.В. «Курортпроект» - пространственные конструкции. Ж-л «Строительные материалы. Оборудование, технологии XXI века», № 3,4, 1999, с. 34-35.
4. Канчели Н.В., Батов П.А., Дробот Д.Ю. Опыт и перспективы проектирования мембранных оболочек на примере реализованных объектов. Строительные материалы, оборудование, технологии 21-го века. 2(109), 2008.