

канд. техн. наук **Фарфель М.И.**,  
ОАО НИЦ «Строительство» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

## **МОНИТОРИНГ ПОКРЫТИЯ БОЛЬШОЙ СПОРТИВНОЙ АРЕНЫ ОЛИМПИЙСКОГО СТАДИОНА «ЛУЖНИКИ» - ОСНОВА ДЛЯ ЕГО БЕЗАВАРИЙНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Покрытие Большой спортивной арены Олимпийского комплекса «Лужники» – это уникальное сооружение, имеющее наибольшие в мире безопорные пролеты для стального купольного покрытия, составляющие 310м по большой оси и 250м – по малой. Наружный опорный контур покрытия опирается на 72 колонны, расположенные по периметру стадиона, отстоящие на 5 м от трибун стадиона (рис. 1а, б).

Это сооружение имеет повышенный уровень ответственности по назначению. На стадионе могут присутствовать одновременно около 90 тыс. человек, и отказ покрытия может привести к тяжелым социальным и экономическим последствиям. Необходимо повышение его надежности и безопасности. Эта задача решена с помощью мониторинга покрытия БСА – системы систематического наблюдения за изготовлением, монтажом и эксплуатацией уникального большепролетного покрытия, созданная впервые в российской строительной практике. Система позволяет предупреждать и своевременно устранять возможные нештатные ситуации, возникающие при эксплуатации покрытия.



*Рис. 1а. Большая спортивная арена Олимпийского комплекса «Лужники»*



*Рис. 1б. Внутренний вид БСА*

На стадии изготовления система мониторинга БСА включала трехуровневую систему контроля качества металла. Первый уровень осуществлялся на металлургических комбинатах, второй – на заводах металлоконструкций; третий – представлял собой контрольные испытания в ЦНИИ строительных конструкций.

На стадии монтажа мониторинг осуществлялся в два этапа. На первом проводилась контрольная сборка на заводе металлоконструкций с геодезическим контролем пространственной геометрии, сходимости отверстий, что подтверждало правильность принятой технологии изготовления и сварки. Второй этап проводился на монтаже при проведении укрупнительной сборки основных элементов. Возможное отклонение (нестыковка) контуров компенсировалась при сборке и контролировалась геодезическими методами. Также в состав работ по мониторингу на стадии монтажа входили контроль качества болтовых и сварных соединений, а также высокопрочных метизов.

Монтаж покрытия проводился следующим образом. На 72 установленные по периметру колонны, блоками по 12 м, монтировался наружный опорный контур (рис. 2).

Внутренний контур общим весом 4500 т был собран на земле (рис. 3), а затем с помощью домкратов, расположенных на предварительно смонтированных стойках, целиком был поднят на проектную отметку (рис. 4).



*Рис.2. Монтаж наружного контура*



*Рис.3. Сборка внутреннего контура*



*Рис.4. Внутренний контур на проектной отметке*

С помощью радиальных балок, которые монтировались уникальным краном DEMAG 4800 (рис. 5), а также кольцевых ферм покрытие было объединено в единую систему. После чего было произведено его раскружаливание (в течении трех суток выполнено снятие нагрузок с домкратов) (рис. 6).



*Рис. 5. Монтаж радиальных балок*



Рис. 6. Раскружаливание покрытия

Для организации мониторинга в процессе эксплуатации решены следующие задачи.

1. Выбраны методы определения параметров напряженно-деформированного состояния и измерительные приборы: деформации (напряжения) определяются с помощью механических деформометров (рис. 7), а перемещения и прогибы – геодезическими методами (рис. 8).

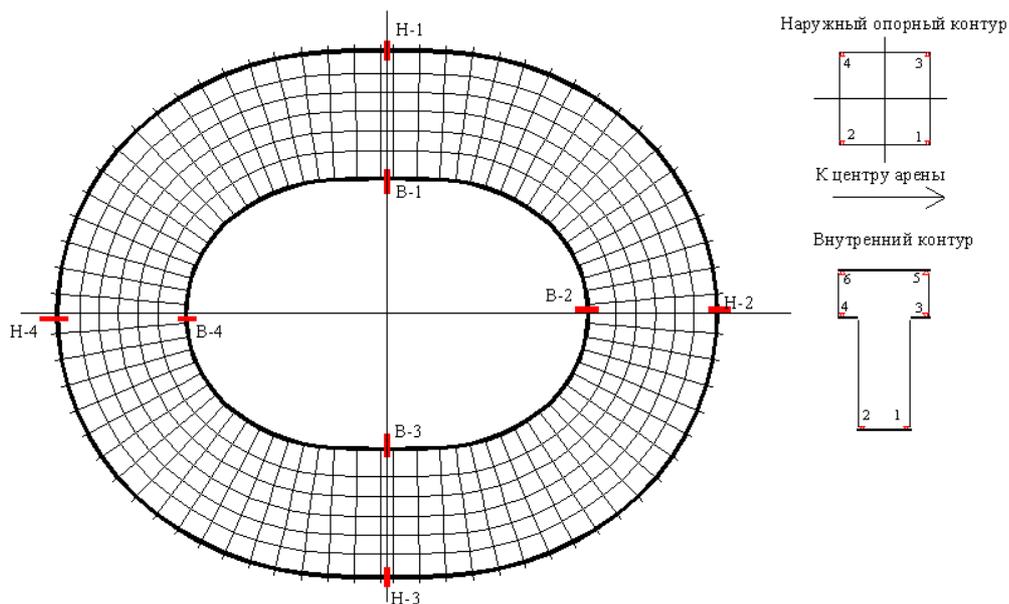
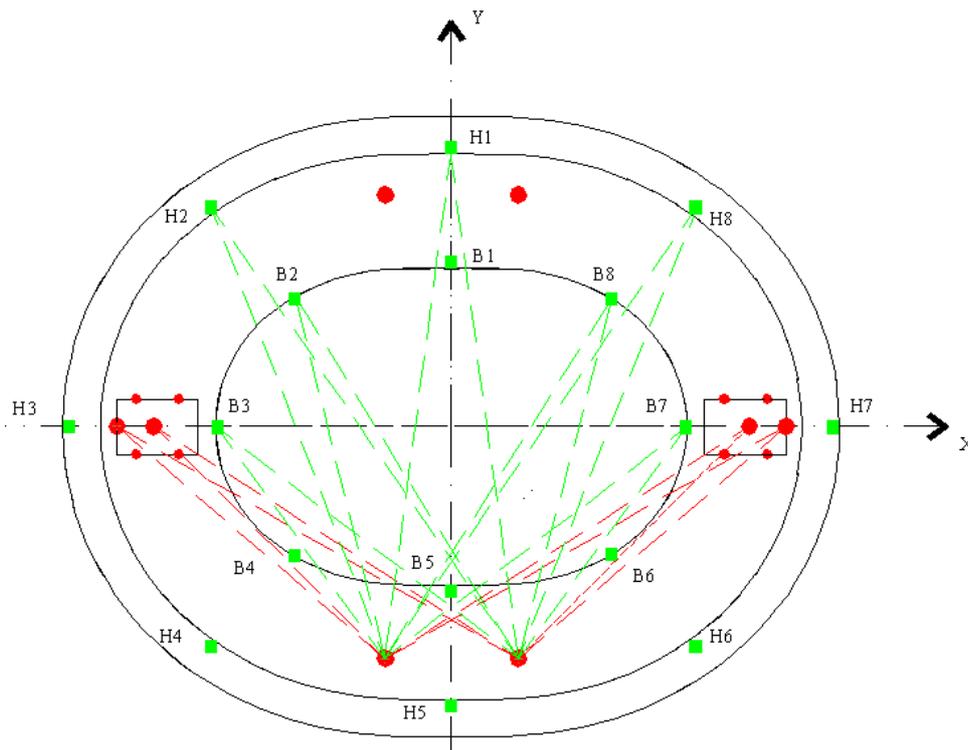


Рис.7. Схема расстановки тензометров



*Рис.8. Геодезическая сеть и точки измерения перемещений*

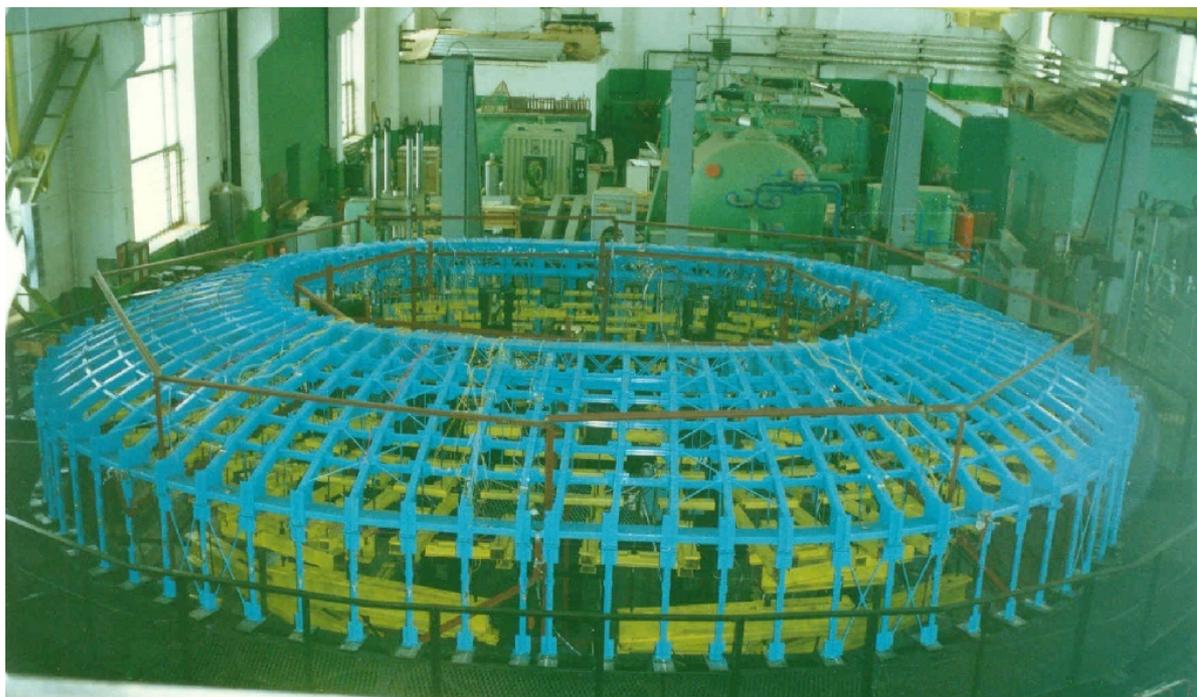
2. По данным многовариантных расчетов системы выявлены наиболее нагруженные и деформативные конструктивные элементы покрытия, в которых назначены сечения и контрольные точки для установки измерительных приборов, смонтированных на элементах конструкции в период монтажа.

3. При проведении периодических измерений определяются деформации (напряжения), а также прогибы и горизонтальные перемещения, которые при сравнении с расчетными величинами позволяют оценить достоверность полученных результатов, а также правильность принятых предпосылок и допущений при расчете покрытия. Следует отметить, что контролируются не только параметры напряженно-деформированного состояния, а и действующие на конструкцию нагрузки, включая снеговую, интенсивность и распределение которой изменяется в течение зимнего периода.

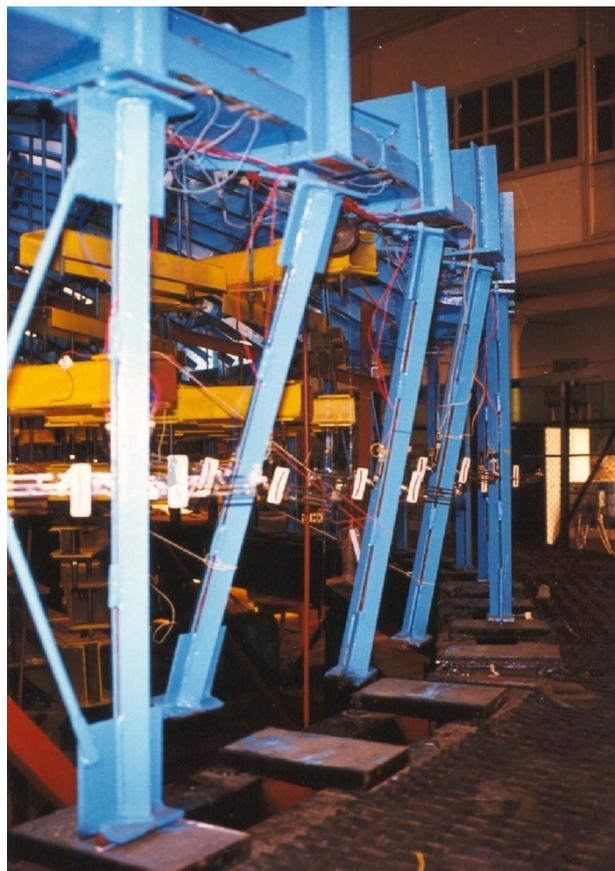
4. По результатам проведенных периодических измерений, а также визуальных осмотров конструкции делается вывод о ее техническом состоянии, и даются рекомендации по дальнейшей эксплуатации. При обнаружении возможных повреждений (нештатных ситуаций) предусматриваются меры по их предотвращению.

Мониторинг покрытия БСА в стадии эксплуатации имеет две стадии. Первая – стадия раскружаливания покрытия, при которой конструкцией воспринимается только нагрузка от ее собственного веса. Вторая – стадия эксплуатации после возведения, весьма продолжительная по времени, и дающая информацию о поведении конструкции при фактических временных (снеговых и ветровых), а также изменяющихся в процессе эксплуатации технологических нагрузках.

Для определения действительной работы покрытия проведены испытания крупномасштабной модели (рис. 9). На ней исследовалась живучесть покрытия при локальных повреждениях – из работы выключались три колонны (рис. 10). Эта проблема впервые исследовалась в российской строительной практике и впоследствии получила термин устойчивость сооружения от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения. При расчете покрытия были удалены 12 из 72 колонн. Это был первый расчет на устойчивость системы от прогрессирующего обрушения.



*Рис. 9. Модель покрытия*



*Рис. 10. Выключение из работы трех колонн*

Снеговые и ветровые нагрузки определялись по результатам продувок в аэродинамической трубе, где изучался перенос снега под ветровыми воздействиями с малыми скоростями, а также определялись ветровые давления на поверхность покрытия (рис. 11).



*Рис. 11. Продувка модели в аэродинамической трубе*

Требования к металлу, нагрузкам, узловым соединениям и расчету были приведены в соответствующих разделах проекта, что явилось прототипом специальных технических условий, которые предусматриваются при создании уникальных зданий.

Расчет покрытия осуществлялся на стандартном комплексе «Гамма», как в линейной постановке, так и по деформированной схеме. Общая устойчивость покрытия, а также его динамические характеристики определялись стандартным комплексом «Scad».

Сравнение внутренних усилий и перемещений, полученных по расчету, в контрольных сечениях, с экспериментальными данными показали, что разница между ними не превышает 3%.

В настоящее время ежеквартально проводятся измерения напряженно-деформированного состояния конструкций покрытия БСА. Деформированное состояние измеряется геодезическими методами, а напряженное – деформометрами ТМИ-500М, разработанными в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, установленными в сечениях внутреннего и наружного опорного контуров.

В зимние периоды проводятся измерения интенсивности и распределения снеговой нагрузки на покрытия (рис. 12а, б).

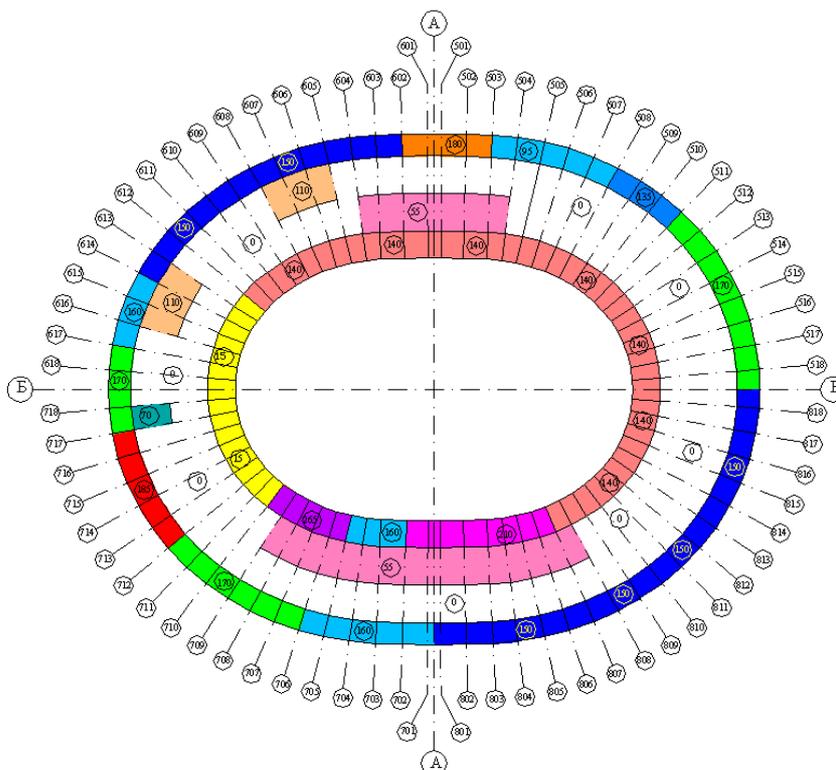


Рис. 12а. Снеговая нагрузка на покрытия 1.03.2012 г.

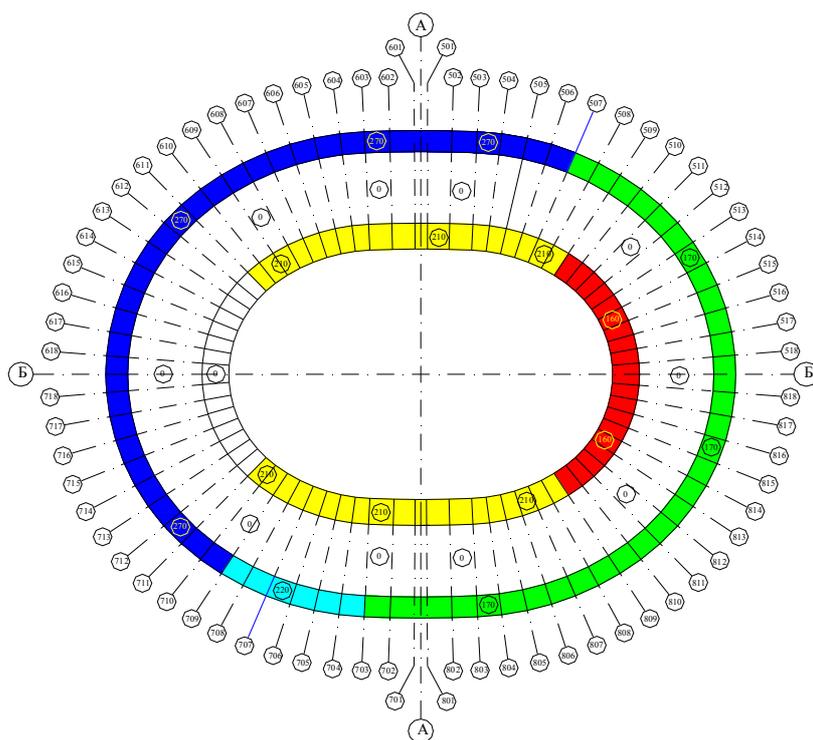


Рис. 12б. Снеговая нагрузка на покрытии 1.03.2013 г.

. За прошедшие 16 лет эксплуатации расчетная снеговая нагрузка, предусмотренная проектом, так и не была достигнута. Ее значение, измеренное на земле, рядом со стадионом на плохо проветриваемом участке отмечено в этом году и составило  $q=172 \text{ кг/м}^2$ , при высоте снегового покрова 64 см. Эта величина получена как среднее значение 10-ти измерений. Наибольшее значение снеговой нагрузки составило  $q=185 \text{ кг/м}^2$ , при высоте снега 70 см. Плотность снега составила  $260 \text{ кг/м}^3$ .

Анализ результатов расчетов в летний и зимний периоды и зависимости нагрузка-перемещение показывают линейный характер работы системы, что подтверждается данными при проведении измерений. Деформированное состояние покрытия в конце зимнего и начале летнего периода 2012 г. и в начале марта 2013 г. показано на рис. 13, 14, 15.

Следует отметить, что за 16-летний период эксплуатации покрытия серьезных нештатных ситуаций, которые могли бы привести к исчерпанию несущей способности элементов, не зафиксировано. Однако, нештатные ситуации за этот период все-таки возникали. Для примера приведем одну из них.

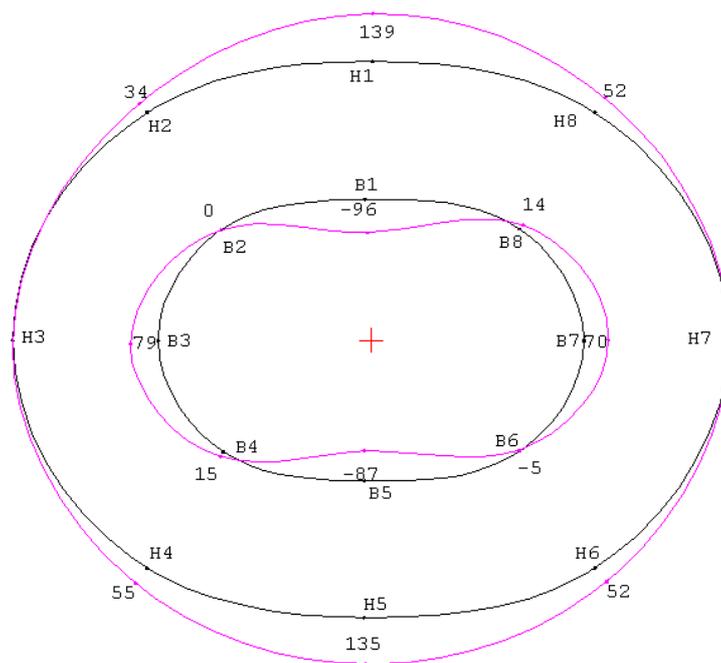


Рис. 13. Деформированная схемы покрытия 1.03.2012

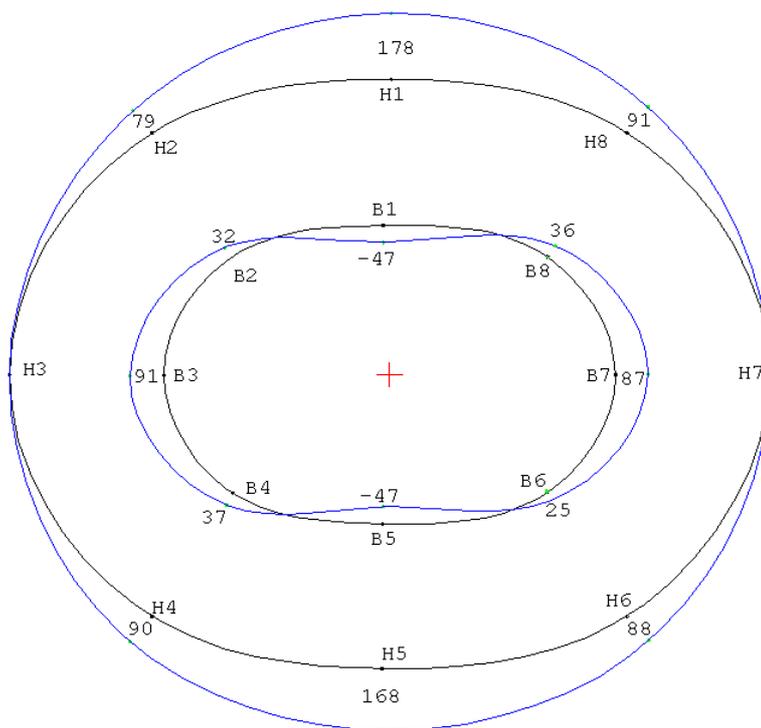
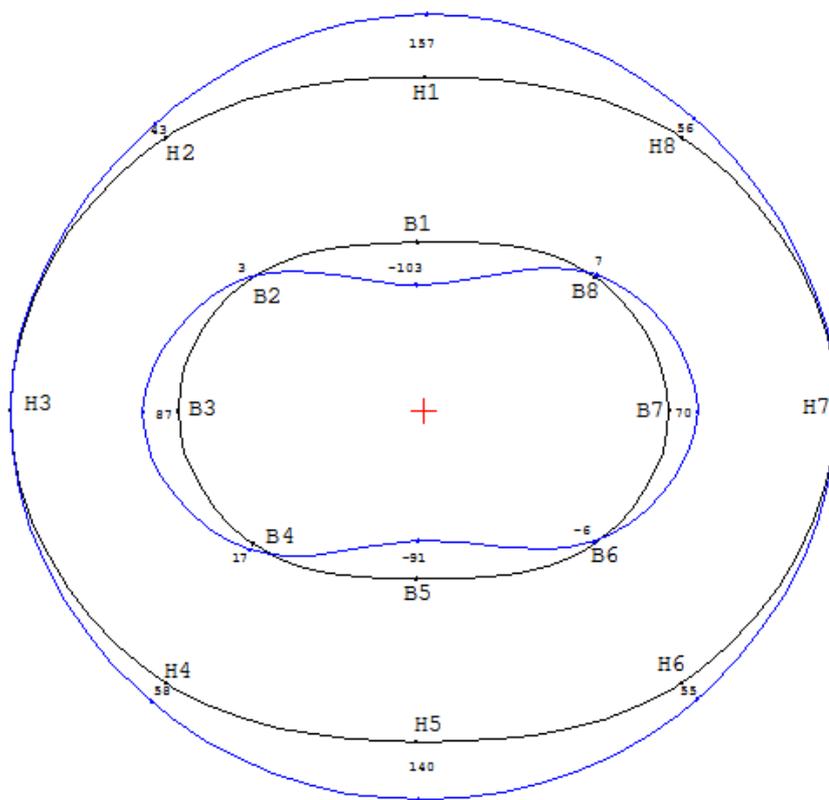


Рис. 14. Деформированная схема покрытия 14.06.2012 г.



*Рис. 15. Деформированная схема покрытия 5.03.2013 г.*

Для обеспечения общей устойчивости покрытия предусмотрена система вертикальных связей, которая по архитектурным соображениям запроектирована таким образом, что связи с треугольной решеткой присоединяются одним концом к наружному контуру, а другим – к железобетонной гребенке стадиона. Связи выполнены из двух уголков 140x9 мм, сваренных в замкнутое квадратное сечение, причем верхний узел крепления связи выполнен шарнирно неподвижным на шпильке, вставленной в овальное отверстие. Такие связи передают на гребенку трибун только горизонтальные усилия, а вертикальные – не воспринимают. В ненагруженном состоянии шпилька должна находиться в центре овального отверстия. Однако при сдаче покрытия в эксплуатацию некоторые шпильки не удовлетворяли этому требованию. Зимой 2001 г. снеговая нагрузка достигла значения  $152 \text{ кг/м}^2$ , зазор был выбран (рис. 16), вертикальная составляющая нагрузки передалась на элемент связи и произошла потеря устойчивости опорного ребра. Данное повреждение было вовремя замечено и устранено (рис.17).



*Рис. 16. Отсутствие зазора между шпилькой и овальным отверстием*

Системы мониторинга, действующие в настоящее время на стадионе «Локомотив», покрытии Старого гостиного двора, крытом конькобежном центре в Крылатском, а также на строящемся высотном здании «Евразия» комплекса «Москва-Сити» созданы аналогично системе мониторинга покрытия БСА Олимпийского стадиона «Лужники».

### **ВЫВОДЫ:**

1. Описанная система безотказно и надежно действует уже 16 лет и позволяет безопасно эксплуатировать уникальное большепролетное покрытие БСА Олимпийского стадиона в Лужниках, предупреждая возможные нестандартные ситуации, которые при их обнаружении своевременно устраняются.
2. Основные принципы системы мониторинга, апробированные при создании и последующей эксплуатации покрытия БСА в Лужниках, целесообраз-

разно использовать при разработке аналогичных систем для новых уникальных большепролетных покрытий, а также высотных зданий.



*Рис. 17 Потеря устойчивости опорного ребра вертикальной связи*

## **Литература:**

1. Микулин В.Б., Одесский П.Д., Оспенников А.Г, Ханджи А.В., Фарфель М.И. и др. Покрытие Большой спортивной арены стадиона «Лужники» (проектирование, научные исследования и строительство) ». М: Фортэ, 1998, 144 стр.

2. Микулин В.Б., Фарфель М.И., Ханджи А.В. Покрытие Большой спортивной арены Олимпийского комплекса в Лужниках. [Текст] //ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. 80 лет. Сборник статей. М.: 2007. С. 46-55.

## **Контакты:**

тел. 89169506129 – моб.

8(499)170-10-87 – раб.

E-mail: [Farfelmi@yandex.ru](mailto:Farfelmi@yandex.ru).