

УДК 624.072.2.014

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\[28\]-110-123](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1[28]-110-123)

АПРОБИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

PROVEN METHODS OF MONITORING IN BUILDINGS AND STRUCTURES

М. И. ФАРФЕЛЬ, канд. техн. наук

М. И. ГУКОВА, канд. техн. наук

Д. В. КОНДРАШОВ

Д. Ю. КОНЯШИН

Представлена методика проведения мониторинга технического состояния конструкций, проводимого на двух уникальных объектах в Москве – покрытия Большой спортивной арены в «Лужниках» и распорной системы котлована строящейся гостиницы у Курского вокзала. Уникальные здания и сооружения, в том числе высотные и большепролетные, подлежат мониторингу технического состояния для обеспечения безопасного их функционирования. Мониторинг используется для отслеживания степени, скорости и своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций зданий и сооружений, а также принятия, в случае необходимости, экстренных мер по предотвращению катастроф, связанных с их обрушением. Для безопасной эксплуатации конструкций система мониторинга должна функционировать в течение всего срока эксплуатации.

Ключевые слова:

Деформации, здания, конструкции, мониторинг, напряжения, приборы, система, сооружения, тензометры, техническое состояние, устройства

The article presents a method for monitoring the technical condition of structures carried out at two unique sites in Moscow – the coating of the Large sports arena in Luzhniki and the spacer system of the pit of the hotel under construction near the Kursky railway station. Unique buildings and structures, including high-rise and long-span ones, are subject to technical condition monitoring to ensure their safe operation. Monitoring used to track the degree, speed and timely detection of negative changes in the stress-strain state of non-existing structures of buildings and structures at an early stage, as well as to take, if necessary, emergency measures to prevent disasters associated with their collapse. For safe operation of structures, the monitoring system must function throughout the entire service life.

Key words:

Buildings, deformations, devices, monitoring, strain gauges, stresses, structures, system, technical condition

Мониторинг покрытия Большой спортивной арены (БСА) «Лужники» выполняется сотрудниками ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Уникальность возведенного в Москве покрытия БСА в Лужниках [1, 2, 3] определяется наибольшим в мире пролетом для металлоконструкций купольного типа, по большой оси равным 310 м, и вместимостью более 80 тыс. зрителей.

Система мониторинга покрытия БСА была разработана ещё при его проектировании и установлена в период его монтажа [4] в 1996 г. (рис. 1), действовала в процессе проведения реконструкции стадиона к чемпионату мира по футболу 2018 г. (с января 2014 г. по май 2017 г. [5]) и продолжает функционировать в настоящее время [6].



Рис. 1. Монтаж внутреннего контура БСА с установленными в контрольных сечениях механическими тензометрами для взятия начальных отсчетов на элементах конструкций без нагрузки

Внедренная система мониторинга позволяет проводить измерения деформаций и перемещений основных элементов конструкции, т. е. осуществлять периодическое слежение за работой конструкции покрытия, обеспечивать её повышенную надежность в стадии эксплуатации, предупреждать и своевременно устранять возможные нештатные ситуации.

Измерение деформаций покрытия БСА проводится механическими тензометрами ТМИ-500М, разработанными в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко.

Выбор механических тензометров для измерения обусловлен тем, что при применении электромеханических или электронных систем измерений возможна реальная угроза повреждения или утрата закрепленных на конструкциях приборов или соединительных кабелей для электромеханических датчиков. Воздействие на электромеханические или электронные датчики атмосферных осадков и электромагнитного излучения от сварочных работ или другого строительного-монтажного оборудования также может привести к их повреждению.

Установленный на конструкции механический тензометр со съемным деформометром показан на рис. 3.

Перед проведением каждого измерения производится тарировка съемного деформометра на базе индикатора часового типа ИЧ-10. Деформометр перестроен таким образом, чтобы можно было проводить измерение деформаций как сжатия, так и растяжения. Тарировка проводится с помощью специально изготовленного в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко калибра (рис. 4, а, б).



Рис. 3. Установленный механический тензометр со съемным деформометром



Рис. 4. Общий вид калибра (а) и тарировка деформометра с помощью калибра (б)

Для определения напряженного состояния конструкций покрытия БСА тензометры установлены (рис. 5) в контрольных сечениях на наружном и внутреннем контурах в 4 сечениях, расположенных по осям симметрии покрытия.

Кроме того, приборы установлены на вертикальных треугольных связях в 24 шагах, расположенных между колоннами покрытия. Места их установки (в тех же шагах) совпадают с установленными тензометрами на одном из диагональных элементов временных вертикальных крестовых связей, которые были смонтированы в период реконструкции арены к чемпионату мира 2018 г. по футболу (рис. 6) и обеспечивали общую устойчивость покрытия в период демонтажа старых трибун и сооружения нового каркаса трибун при сохранении фасадной стены [5].

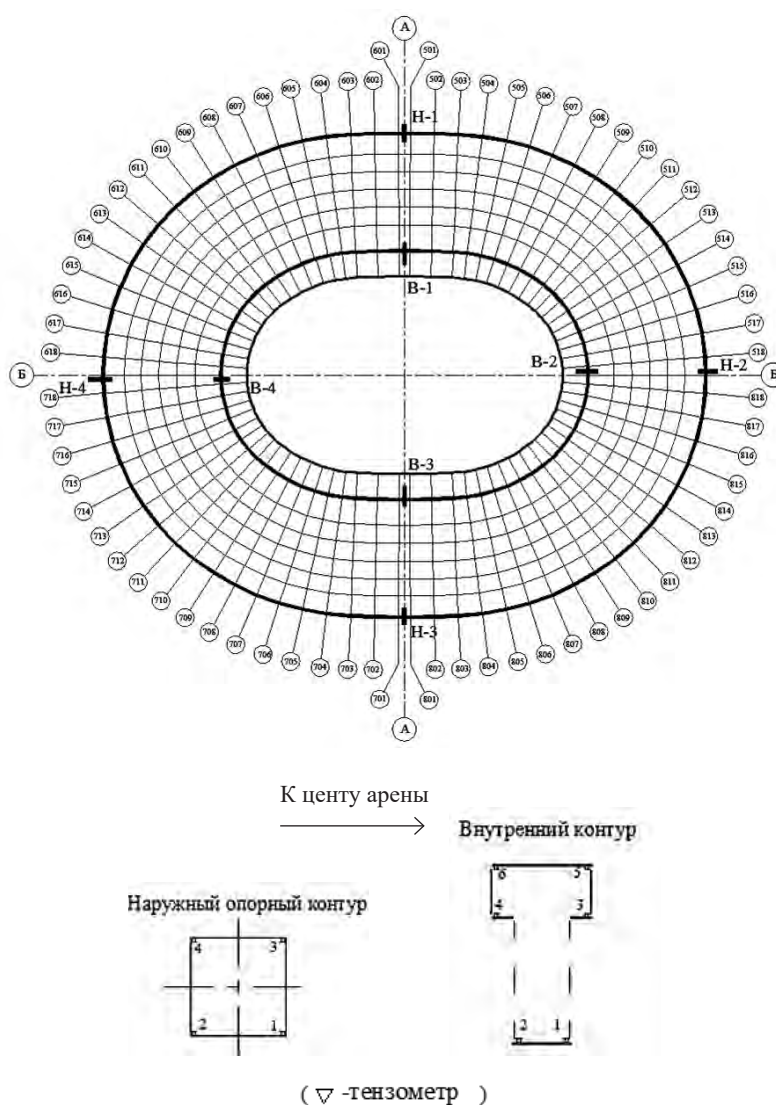


Рис. 5. Схема расстановки тензометров ТМИ-500М на покрытии БСА



Рис. 6. Установка и снятие показаний с приборов на конструкции покрытия и временных связях при реконструкции БСА

После возведения нового каркаса трибун временные связи были демонтированы, а измерительные приборы (тензометры) перенесены на стационарные вертикальные связи [5].

Мониторинг распорной системы котлована строящейся гостиницы у Курского вокзала (рис. 7) также выполняется сотрудниками ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» с помощью разработанных в этом институте таких же измерительных приборов.

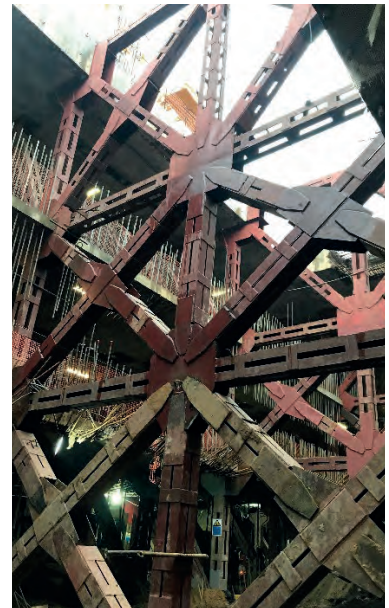


Рис. 7. Система распорных ферм котлована строящейся гостиницы в г. Москве

В качестве временной ограждающей конструкции котлована использована монолитная железобетонная «стена в грунте» толщиной 800 мм, глубиной 26,80...30,25 м. Крепление «стен в грунте» предусмотрено четырьмя ярусами капитальных перекрытий, которые соединяются между собой системой из распорных ферм и обеспечивают ее устойчивость от опрокидывания.

Вес перекрытий с монтажной нагрузкой передается на «стену в грунте» через распорные фермы, опирающиеся на нее с помощью временных опорных столиков, выполненных из двутавров 50Б2. Опорные столики крепятся к закладным деталям, заложенным в «стене в грунте».

План расположения распорных ферм приведен на рис. 8. Схема одной из распорных ферм с указанием элементов показана на рис. 9.

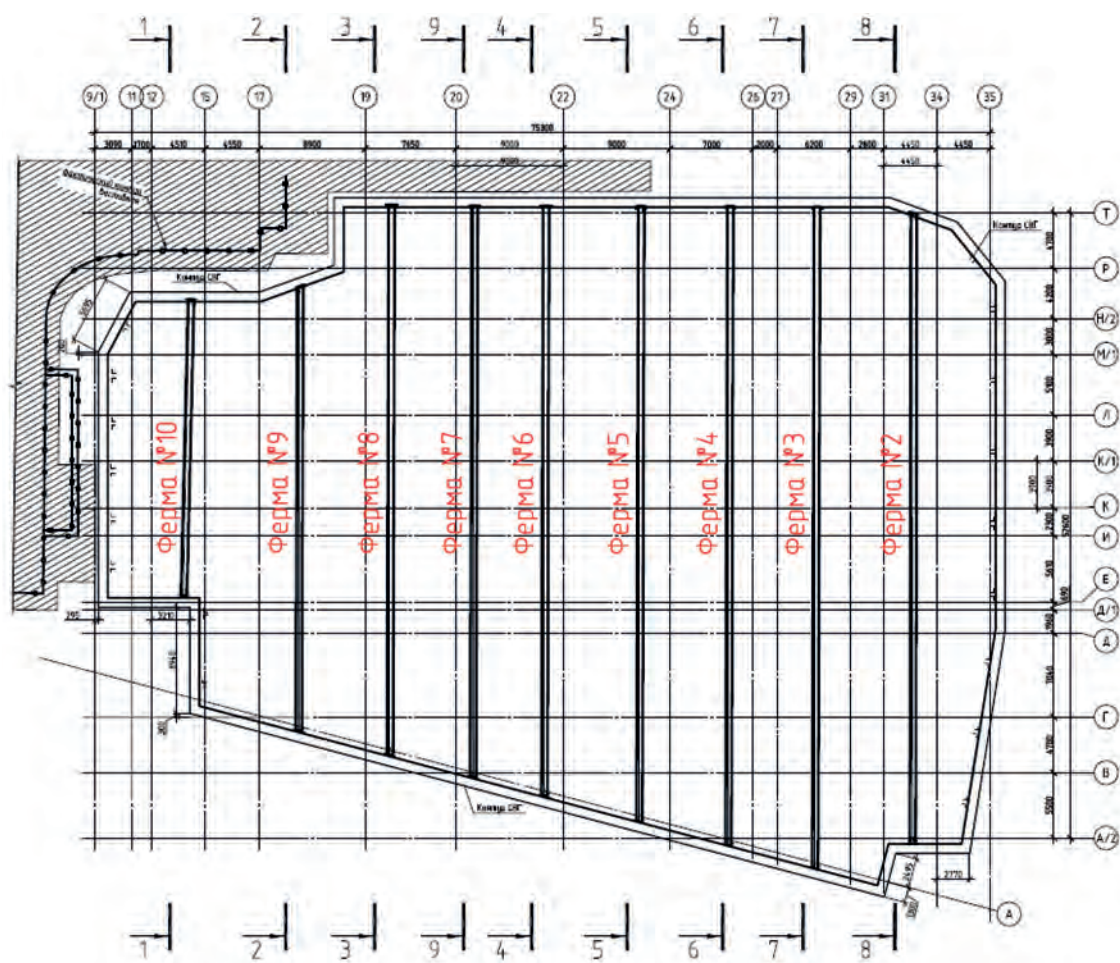


Рис. 8. План расположения ферм распорной системы котлована

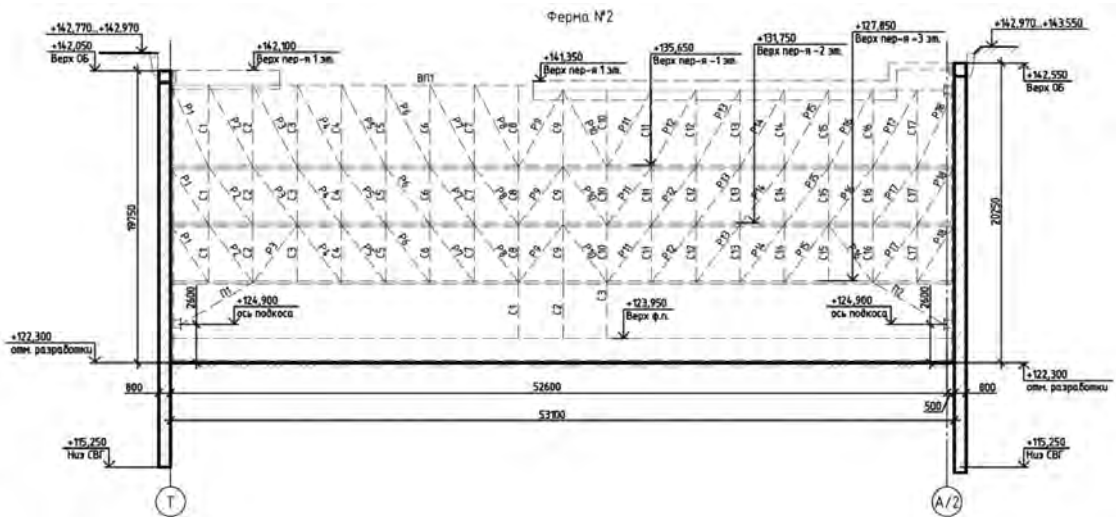


Рис. 9. Схема распорной фермы №2 (Разрез 8-8)

Механические тензометры, с помощью которых проводятся измерения параметров напряженного состояния, смонтированы на наиболее напряженных элементах первого, второго и третьего и четвертого ярусов стальных элементов распорных ферм №2 – 10 котлована строящегося здания (рис. 10).

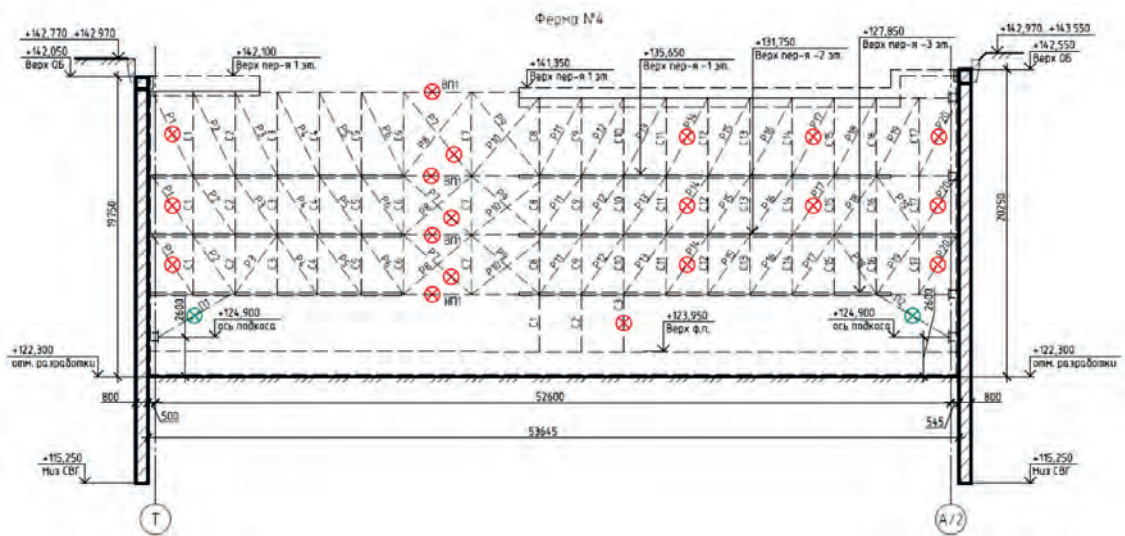


Рис. 10. Схема установки механических тензометров на ферме №4 (Разрез 6-6)

Определение напряжений с помощью механического тензометра ТМИ-500М осуществляется по приведенной далее методике.

По результатам измерений деформаций с помощью тензометров по закону Гука определяются напряжения в элементах покрытия. При этом учитывается вся история нагружения конструкции с момента его возведения до проведения измерения на текущем этапе.

Показание индикатора ИЧ-10 позволяет определить напряжение, возникающее в месте установки прибора. Согласно закону Гука $\sigma = E\varepsilon$, где

σ – напряжение в конструкции;

E – модуль упругости материала;

$\varepsilon = \Delta L/L$ – относительная деформация;

ΔL – абсолютная деформация;

$L = 50$ см – измерительная база прибора.

Одно деление шкалы прибора ИЧ10 составляет 0,01 мм, или 0,001 см, тогда абсолютная деформация, соответствующая этой величине, будет равна напряжению

$$\sigma = 2,1 \cdot 10^6 \cdot (0,001/50) = 42 \text{ кг/см}^2 = 4,2 \text{ МПа}.$$

При определении деформаций элементов вводится учет температурных поправок.

Конструкция (база деформометра), штанга и скоба калибра характеризуются следующими соответственными характеристиками: длина – L , $L_{\text{ш}}$, L_c ; температура – t , $t_{\text{ш}}$, t_c . Штанга, конструкция и контрольный калибр изготовлены из стали и имеют одинаковый коэффициент линейного расширения равный $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$. Приводя длины штанги и калибра к базе деформометра, получим формулы для определения их длины: $L_{\text{ш}} = \beta \cdot L$; $L_c = \xi \cdot L$.

Разности температур штанги, калибра и конструкции соответственно равны:

$$\Delta t_{\text{ш}} = t - t_{\text{ш}}; \Delta t_c = t - t_c.$$

Деформация штанги от действия температуры равна

$$\Delta_{\text{ш}} = \alpha \cdot \Delta t_{\text{ш}} \cdot L_{\text{ш}}.$$

Деформация калибра от действия температуры

$$\Delta_c = \alpha \cdot \Delta t_c \cdot L_c.$$

Общая деформация от действия температуры

$$\Delta_t = \Delta_{\text{ш}} + \Delta_c.$$

Формула для определения общей температурной деформации

$$\begin{aligned} \Delta_t &= -\alpha \cdot (t - t_{\text{ш}}) \cdot \beta \cdot L + (-\alpha \cdot (t - t_c) \cdot \xi \cdot L) = \alpha \cdot L \cdot (-\beta \cdot t + \beta \cdot t_{\text{ш}} - \xi \cdot t + \xi \cdot t_c) = \\ &= \alpha \cdot L \cdot (-t \cdot (\beta + \xi) + \beta \cdot t_{\text{ш}} + \xi \cdot t_c). \end{aligned}$$

Учитывая, что $\beta + \xi = 1$, а одно деление деформометра ИЧ-10М составляет 0,01 мм, формула для вычисления температурной деформации примет следующий вид с учетом того, что для механического тензометра ТМИ-500М $\alpha \cdot L = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 500 = 0,006$ мм; $L = 500$ мм; $L_{\text{ш}} = 305$ мм; $L_c = 195$ мм; $\beta = 0,39$; $\xi = 0,61$, получим формулу для вычисления температурной деформации

$$\Delta_t = 100 \cdot \alpha \cdot L \cdot (-\beta \cdot t_{\text{ш}} \cdot \xi \cdot t_c + t),$$

а после элементарных преобразований – формулу

$$\Delta_t = -0,234 \cdot t_{\text{ш}} - 0,366 \cdot t_c + 0,6 \cdot t,$$

которую можно записать в другом виде:

$$\Delta_t = 0,234 \cdot (-t_{\text{ш}} + t) + 0,366 \cdot (-t_c + t).$$

Таким образом, учитывая, что деформация, полученная при измерении, равна Δ_k , формула для деформации волокна сечения будет иметь вид

$$\Delta = \Delta_k + \Delta_t.$$

Температура конструкции, штанги и калибра измеряется электронным контактным термометром (рис. 11).

При анализе полученных результатов измерений напряжений в элементах ферм котлована также отмечено, что на их напряженное состояние влияет поперечная нагрузка и изменение температуры с момента прикрепления распорных ферм к «стене в грунте». Из-за прикрепления опорных узлов к «стене в грунте» с граничными условиями, запрещающими горизонтальное смещение, влияние температурных воздействий на напряженное состояние ферм различно: при уменьшении температуры в элементах ферм возникает дополнительное растяжение, а при увеличении – дополнительное сжатие.

а



б



Рис. 11. Измерение контактным термометром ТК-5.01 П температуры штанги прибора (а) и элемента конструкции (б)

В мониторинг технического состояния покрытия БСА дополнительно входит изучение деформированного состояния, которое определяется геодезическими методами. В предварительно выбранных контрольных точках измеряются три координаты перемещений, по которым можно построить деформированную схему сооружения (рис. 12).

В нашем климате основной нагрузкой на конструкцию является снег, поэтому для определения действительного характера напряженного состояния покрытия БСА в момент проведения цикла мониторинга прежде всего фактическое значение снеговой нагрузки.

По используемой методике действительный характер распределения снеговых отложений определяется измерением толщины снега непосредственно на покрытии.

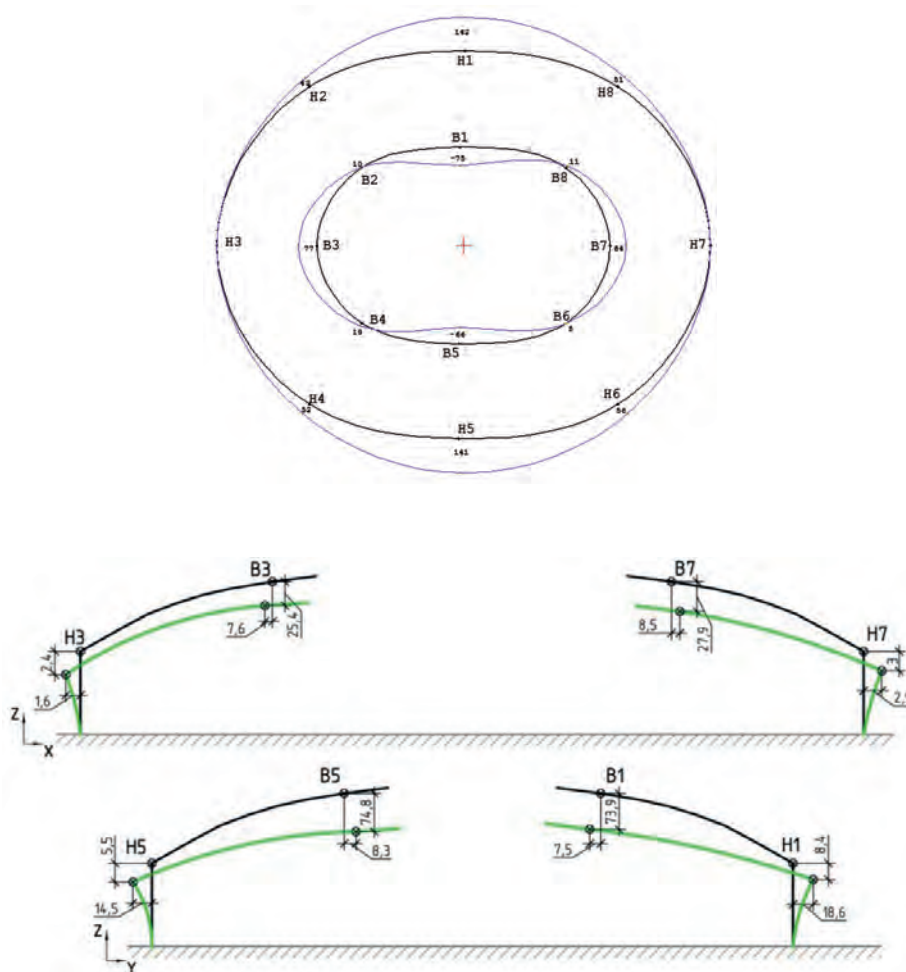


Рис. 12. Пример деформированной схемы в плане и на разрезах покрытия БСА
(горизонтальные и вертикальные перемещения, мм)

Измерения проводятся весовым снегомером ВС-43, разработанным и изготовленным ЦКБ гидрометеорологического приборостроения Росгидромета. В состав снегомера входит снегоприемный цилиндр диаметром около 80 мм с зазубринами на концах для удобства забора снегового столба. Площадь основания снегоприемного цилиндра 50 см^2 . Одной из составных частей снегомера являются измерительные веса с ценой одного деления 5 г. При отнесении его к площади сечения пробы снегового столба получается, что распределенная снеговая нагрузка, соответствующая одному делению измерительных весов, равна 1 кг/м^2 . Таким образом, значение снеговой нагрузки, распределенной по площади, можно получить при непосредственном взвешивании пробы, без дополнительных вычислений.

Измерение (рис. 13) величины и распределения нагрузки от высоты снегового покрова осуществляется в определенных зонах на покрытии, а также на земле.



Рис. 13. Отложение снега на покрытии БСА
и измерение снеговой нагрузки весовым снегомером ВС43

Построенные графики в процессе мониторинга показали прямую зависимость снеговой нагрузки от высоты снега на земле и высоты снега на покрытии в измеренных местах.

На рис. 14 представлены результаты мониторинга БСА в части определения снеговых нагрузок на покрытие сооружения.

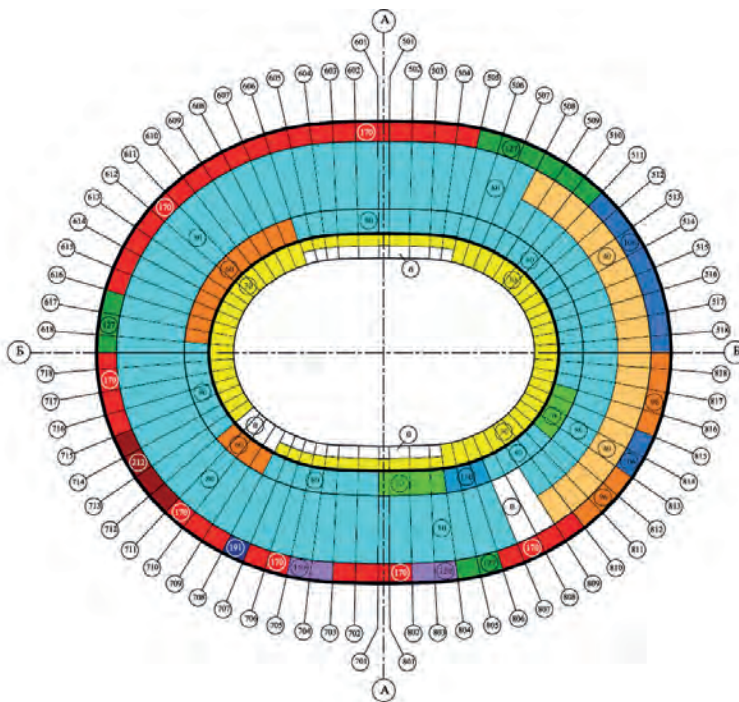


Рис. 14. Распределение и интенсивность снеговой нагрузки на покрытии БСА «Лужники», кг/м²
[28 января 2019 г.]

Выводы

1. Принятая для проведения измерений система регистрации напряжений в элементах конструкций с помощью механических тензометров, разработанных в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, со съемным деформометром дает возможность своевременно предупреждать и оперативно предотвращать возможные негативные ситуации и является наиболее надежной по сравнению с использованием электромеханических или электронных систем измерений.

2. Предложенная и апробированная методика при выполнении мониторинга уникального сооружения – покрытия стадиона БСА «Лужники» в Москве – позволяет:

- определять деформации (напряжения) в элементах конструкций от всех фактических нагрузок (в т. ч. снеговых и ветровых) в период монтажа и эксплуатации;
- находить прогибы и горизонтальные перемещения в выбранных контрольных точках покрытия;
- учитывать влияние температурных поправок при измерении напряжений элементов конструкций;
- определять фактические значения интенсивности снеговой нагрузки и ее распределение по покрытию.

3. Разработанная ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко методика определения напряженно-деформированного состояния конструкций при выполнении мониторинга в настоящее время используется и на других уникальных объектах в городе Москве.

Система мониторинга распорных конструкций котлована предназначена для слежения за их работой при устройстве фундаментов и подземной части строящегося здания гостиницы у Курского вокзала и для предупреждения и предотвращения возможных нештатных ситуаций, которые могут возникнуть при строительстве.

- Проводятся измерения деформаций (напряжений) с помощью установленных механических тензометров в наиболее напряженных элементах полностью смонтированных распорных ферм котлована на различных этапах строительства. При возникновении нештатных ситуаций, которые фиксируются системой, оперативно принимались меры по их устранению.

Библиографический список

1. Градостроительный Кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ, статья 47 (гл.6, ст.48.1 «Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты»).
2. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», статья 15.
3. ГОСТ 31937- 2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
4. Микulin В.Б., Одесский П.Д., Оспенников А.Г., Отставнов В.А., Попов Н.А., Ханджи А.В., Фарфель М.И. [и др.] Покрытие Большой спортивной арены стадиона «Лужники» (проектирование, научные исследования и строительство). – М.: «Фортэ», 1998. 144 с.
5. Фарфель М.И., Гукова М.И., Коняшин Д.Ю., Кущенко А.Е., Любарцев А.В. Особенности реконструкции Большой спортивной арены стадиона «Лужники» к Чемпионату мира

по футболу в 2018 г. // Вестник НИЦ Строительство. Исследования по теории сооружений. 2017. № 14. С. 74-92.

6. *Ведяков И.И., Фарфель М.И.* Научно-техническое сопровождение проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации при реконструкции Большой спортивной арены «Лужники» в г. Москве к Чемпионату мира по футболу в 2018 году // Вестник НИЦ Строительство. Исследования по теории сооружений. 2019. № 3. С. 27-41.

Авторы:

Михаил Иосифович ФАРФЕЛЬ, канд. техн. наук, заведующий сектором реконструкции и мониторинга уникальных зданий и сооружений Лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», НИУ МГСУ, Москва

Mikhail FARFEL, Ph. D. (Engineering), Chief manager of Reconstruction and monitoring of unique building and structures Sector, Metal structures Laboratory, TSNIISK named after V. A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, NRU MGSU, Moscow

e-mail: Farfelmi@yandex.ru

тел.: +7 (916) 950-61-29; +7 (499) 170-10-87

Маргарита Ильинична ГУКОВА, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Margarita GUKOVA, Ph. D. (Engineering), Leading Researcher of Metal structures Laboratory, TSNIISK named after V. A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: Gukova.Rita@yandex.ru

тел.: +7 (909) 628-30-27; +7 (499) 170-10-87

Дмитрий Владимирович КОНДРАШОВ, старший научный сотрудник Лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitry KONDRASHOV, Senior researcher of Metal structures Laboratory, TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: dkondras@mail.ru

тел.: +7 (926) 292-25-58; +7 (499) 174-73-25

Дмитрий Юрьевич КОНЯШИН, научный сотрудник Лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitry KONYASHIN, Researcher of Metal structures Laboratory, TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: dkon10@yandex.ru

тел.: +7 (925) 271-00-10; +7 (499) 174-77-93