НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 69.04
DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330

Автоматизированный мониторинг деформации несущих конструкций «Екатеринбург Арены»

Юрий Александрович Колотовичев[1,2], Андрей Михайлович Шахраманьян[2]
[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;
[2] СОДИС ЛАБ; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются существенные детали технологии внедрения автоматизированных систем мониторинга уникальных сооружений, которые до сих пор не нашли достаточного отражения ни в нормативных документах, ни в методической литературе. Цель исследования — систематизировать опыт апробации ранее разработанных теоретических принципов построения систем мониторинга на примере большепролетного покрытия «Екатеринбург Арены». Показано, как были выбраны контролируемые элементы конструкций, места расположения датчиков, их количество, как решались задачи по определению допустимых интервалов изменения контролируемых параметров.
Материалы и методы. Автоматизированная система мониторинга технического состояния большепролетного покрытия построена путем развертывания комплекса программно-аппаратных средств для обработки информации, поступающей от наклономеров, тензометров, акселерометров, роботизированного тахеометра и метеостанции.
Результаты. Создана единая информационная система обеспечения автоматизированного мониторинга, включающая в себя модули для сбора результатов измерений, высокопроизводительные базы данных для хранения метрик, метаданных и информации о проекте, сервисы расчета и визуализации параметров напряженно-деформированного состояния, компоненты для самодиагностики оборудования, интерфейс разработки приложений для комплексного анализа данных и трехмерную модель объекта. Предложены инженерные методики определения фактических значений контролируемых параметров и допустимых для нормальной эксплуатации диапазонов их изменения. Апробирована методика установления внутренних усилий на основе тензометрического метода с избыточностью измерительной схемы.
Выводы. Получаемые результаты мониторинга являются ценным источником исходных данных для разработки автоматизированных методов выявления и локализации дефектов строительных конструкций, совершенствования методов расчета и проектирования, автоматизированного планирования предупредительных ремонтов, инструментальных обследований и решения других наукоемких задач. Результаты апробации теоретических принципов построения систем мониторинга могут внести весомый вклад в развитие объективно незрелой научно-практической и нормативной базы для внедрения подобных систем на технически сложных объектах капитального строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Екатеринбург Арена, СМДС, СМИК, система мониторинга конструкций, геотехнический мониторинг, большепролетное сооружение, программное обеспечение, программа мониторинга

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Колотовичев Ю.А., Шахраманьян А.М.* Автоматизированный мониторинг деформации несущих конструкций «Екатеринбург Арены» // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 3. С. 314–330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330

Автор, ответственный за переписку: Юрий Александрович Колотовичев, ykol@sodislab.com.

An automated structural health monitoring system developed for Ekaterinburg Arena

Yury A. Kolotovichev[1,2], Andrey M. Shakhramanyan[2]
[1] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;
[2] SODIS LAB; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper presents those essential Structural Health Monitoring (SHM) implementation details that have not been sufficiently documented in Russian national guides or regulations. The study aims to systematize and share the experience of applying the previously developed SHM theoretical principles to the existing large-span unique sports facility Ekaterinburg Arena. The paper provides information about determining monitored structural elements, instrumentation alignment, and monitoring parameters' threshold value.
Materials and methods. The long-term SHM system of the large-span structure of the Arena is organized around hardware and software for processing the data constantly incoming from tiltmeters, strain gauges, accelerometers, a motorized total station, and a weather station.

© Ю.А. Колотовичев, А.М. Шахраманьян, 2022
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Results. A unified information system for automated SHM of the Arena has been created. It comprised modules for data acquisition, high-performance databases for storing metrics, metadata, and the project information, services for evaluating and visualizing structural parameters, components for the instrumentation self-diagnosis, an application development interface for sophisticated data analysis, and a 3D model of the structure. Engineering methods for evaluating the initial values of the controlled parameters and their thresholds acceptable for regular operation are proposed. The technique of calculating internal forces based on the strain gauge data with a redundant measurement pattern has been tested.
Conclusions. The obtained monitoring results have become a valuable source of initial data for developing automated methods for detecting and locating damages in structures, improving structural analysis and design methods, predictive maintenance, surveys, and solving other knowledge-intensive tasks. Applying the SHM theoretical principles to the real structure can significantly contribute to developing the current immature scientific and regulatory framework for implementing similar monitoring systems at complicated construction facilities.

KEYWORDS: Ekaterinburg Arena, structural health monitoring, SHM, long-span, SHM software, structural performance, monitoring programme

FOR CITATION: *Kolotovichev Yu.A., Shakhramanyan A.M.* An automated structural health monitoring system developed for Ekaterinburg Arena. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(3):314-330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330 (rus.).

Corresponding author: Yury A. Kolotovichev, ykol@sodislab.com.

ВВЕДЕНИЕ

«Екатеринбург Арена» (до 2018 г. — стадион «Центральный») — это крупнейшее спортивное сооружение на Урале вместимостью 35 тыс. мест и один из 12 стадионов России, где в 2018 г. проводились матчи чемпионата мира по футболу. Стадион построен в 1953–1957 гг., с 2006 по конец 2017 гг. пережил две масштабные реконструкции, которые привели его к соответствию требованиям FIFA для чемпионатов мира (рис. 1, *a*).

Следуя действующим на момент проектирования стадиона нормативным документам, для обеспечения безопасности долговременной эксплуатации уникальный объект был оборудован стационарной автоматизированной системой мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) основных несущих конструкций (далее — СМДС), разработанной и реализованной специалистами компании «СОДИС ЛАБ» в 2014–2018 гг.

Архитектура СМДС «Екатеринбург Арены» унаследовала многие характерные черты систем мониторинга, спроектированных для спортивных объектов Олимпийского парка г. Сочи в 2012–2014 гг. [1] и для аналогичных сооружений за рубежом [2, 3], но вместе с тем претерпела глубокую модернизацию как программного обеспечения, так и технических решений в части применяемого оборудования, позаимствовав ряд технологий, успешно внедренных в масштабную систему мониторинга Башни многофункционального комплекса «Лахта Центр» [4].

Основными компонентами СМДС, которые на протяжении 15 лет создаются специалистами «СОДИС ЛАБ», являются различные измерительные системы и программно-аппаратный комплекс

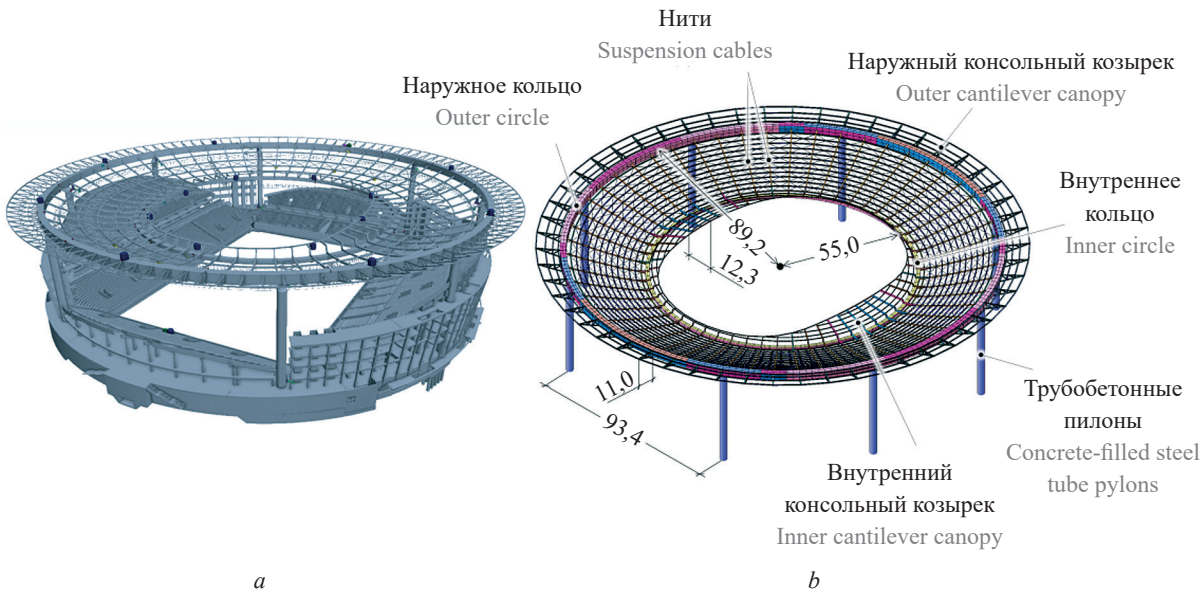


Рис. 1. Екатеринбург Арена: *a* — общий вид несущего каркаса (фрагмент BIM-модели); *b* — конструктивная схема большепролетного покрытия (размеры указаны в метрах)

Fig. 1. Ekaterinburg Arena: *a* — shows the general layout of the bearing framework (a part of the building information model); *b* — shows the structural system of the large-span shell (dimensions in meters)

для сбора, хранения и обработки данных. Разрабатываемое в компании программное обеспечение (ПО) SODIS Building M4 создает из разрозненных технических средств единую информационную среду для обеспечения преемственности, непрерывности и целостности измерений в течение всего жизненного цикла (ЖЦ) здания.

Все датчики, входящие в состав СМДС, опрашиваются автоматически с помощью специализированных систем сбора данных (даталоггеров), которые передают результаты измерений и диагностическую информацию на сервер. Доступ к данным мониторинга осуществляется с помощью автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора.

Фундаментом информационной среды мониторинга служит концепция контролируемых элементов (КЭ) конструкций и контролируемых параметров (КП)[1]. Подобный уровень абстракции позволяет сравнительно просто решать задачу определения «технического состояния» (в терминах ГОСТ 31937–2011[2]) конструкций. Решение об изменении технического состояния принимается на основе сравнения КП с их расчетными значениями [5]. Определение допустимого для нормальной эксплуатации диапазона расчетных значений КП — одна из наименее изученных частей этой технологии, и на практике оказывается сильно затруднено из-за ряда серьезных неопределенностей.

Основная цель публикации — познакомить читателя с тем, как описанные выше теоретические принципы построения систем мониторинга были реализованы на примере уникального спортивного сооружения «Екатеринбург Арена», и поделиться опытом решения ряда задач, которые сопровождают проектирование, наладку и эксплуатацию СМДС, но при этом до сих пор не нашли достаточного отражения ни в нормативной, ни в методической литературе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Краткие сведения о конструкциях «Арены»

Необходимость мониторинга несущих конструкций «Арены» появилась в ходе проведения второй реконструкции, когда в исторические стены (стадион имеет статус объекта культурного наследия и является памятником архитектуры сталинского неоклассицизма) был встроен совершенно новый объем. Наиболее сложная конструктивная часть нового сооружения — уникальное большепролетное покрытие трибун, спроектированное специалистами ООО «СтальПроект» в виде перевернутого усеченного конуса диаметром 178,5 м и высотой около 8 м, — опирается на 8 трубобетонных пилонов через маятниковые шарнирно-неподвижные сферические опоры.

Основные конструктивные элементы покрытия (рис. 1, *b*) — наружная и внутренняя кольцевые балки (кольца) коробчатого сечения. Конструктивно наружное кольцо представляет собой неразрезную 8-пролетную металлическую балку, стенки и пояса которой подкреплены ребрами и диафрагмами жесткости. Внутреннее кольцо подвешено на 54 радиальных нитях, размещенных по окружности с равным шагом и перевязанных в горизонтальной плоскости крест-накрест прутковыми связями. Нити соединены с кольцевыми балками цилиндрическими шарнирами типа «серьга». Кольца и нити выполнены из низколегированной конструкционной стали 10ХСНД.

Покрытие имеет два консольных козырька — наружный и внутренний. Наружный козырек спроектирован в виде треугольных ферм. Внутренний козырек сформирован *S*-образными балками переменного коробчатого сечения. По обоим козырькам уложены шарнирно примыкающие прогоны.

В окружном направлении к нитям жестко через болтовое соединение примыкают прогоны двутаврового сечения.

Структура системы мониторинга «Арены»

В состав СМДС спортивного сооружения включены системы мониторинга угловых перемещений (кренов), деформаций и контроля колебаний (динамического мониторинга), система геодезического мониторинга (контроля перемещений) и система погодного мониторинга. Общий комплекс основных технических средств в виде упрощенной структурной схемы представлен на рис. 2.

В качестве элементов, контролируемых системой мониторинга в большепролетных зданиях, целесообразно выбирать «ключевые» элементы конструктивной схемы. Вопрос о том, какие конструкции считать ключевыми, недостаточно отражен в нормативных документах РФ, поэтому в своей практике «СОДИС ЛАБ» использует подход, описанный в NYC Building Code 2014[3], — элемент считается ключевым, если он удовлетворяет хотя бы одному следующему критерию:

- отказ элемента вызывает лавинообразное обрушение;
- отказ элемента приводит к отказу другого ключевого элемента;

[1] Патент РФ № 2672532 C2, МПК G01M 7/00. Способ мониторинга технического состояния строительных объектов и система мониторинга технического состояния строительных объектов / А.М. Шахраманьян, Ю.А. Колотовичев, Д.А. Мозжухин. Заявитель : Общество с ограниченной ответственностью «СОДИС ЛАБ»; заявл. № 2016144216 от 10.11.2016; опубл. 15.11.2018.

[2] ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М., 2014.

[3] Section BC 1614, Chapter 16, NYC Building Code 2014.

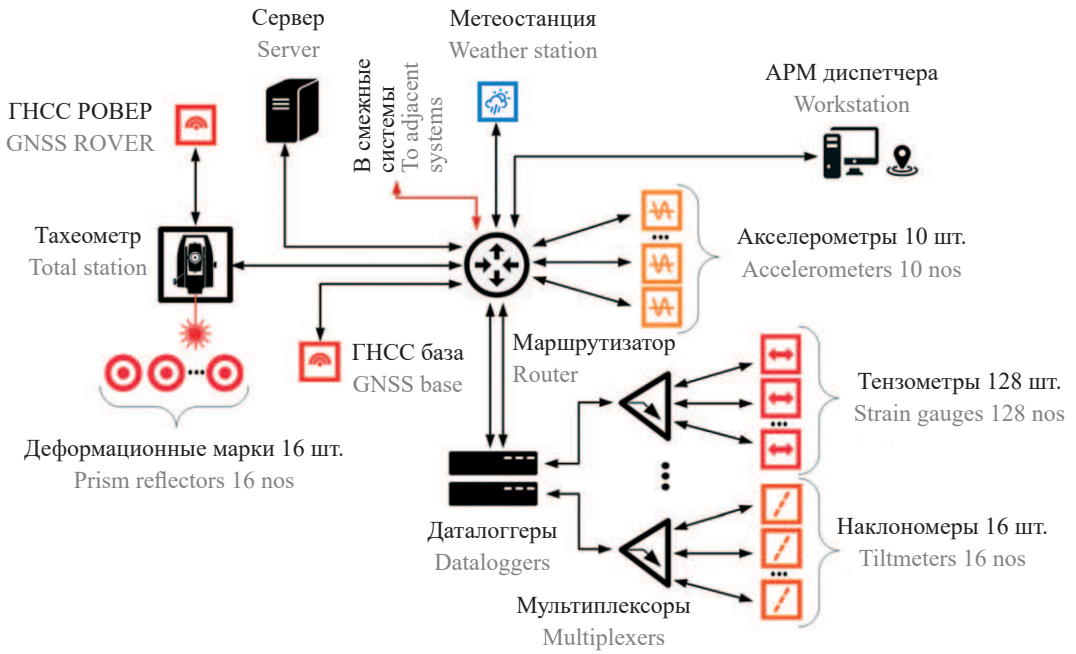


Рис. 2. Структурная схема СМДС «Екатеринбург Арены»

Fig. 2. The block flow diagram of the Ekaterinburg Arena SHM system

• грузовая площадь элемента превышает 3000 футов^2 (~280 м^2) в пределах одного этажа.

Ключевыми элементами покрытия «Арены» являются кольцевые балки и трубобетонные пилоны (рис. 1, *b*), поэтому они выбраны в качестве КЭ. Для удобства локализации аварий (и визуализации нештатных ситуаций) оба кольца в базе данных системы мониторинга разделены на 16 частей (в местах расположения датчиков деформации).

Большинство физических величин, измеряемых датчиками, характеризуется не только значением, но и направлением, поэтому для однозначной интерпретации получаемых сведений приходится использовать различные системы координат и правила знаков, задаваемые для каждой измерительной системы индивидуально.

Получаемые данные инструментальных наблюдений используются для расчета следующих КП: крены (угловые деформации) контролируемых пилонов, внутренние усилия и нормальные напряжения в сечениях кольцевых балок, частоты собственных колебаний конструкций каркаса здания и планово-высотные перемещения металлоконструкций покрытия.

На основании значений КП ПО системы мониторинга в автоматическом режиме определяет техническое состояние объекта (уведомляет диспетчера о нештатных ситуациях).

Для корректировки значений, получаемых от измерительных подсистем, с учетом влияния на них метеорологической составляющей, используются данные погодного мониторинга.

СМДС для связи использует локальную вычислительную сеть объекта, получает электропитание по первой категории электроснабжения и взаимодействует с системой мониторинга инженерных систем (СМИС) для передачи сообщений об изменениях технического состояния КЭ или неисправностях системы. Серверная часть системы обработки данных размещена в стандартной 19-дюймовой стойке, расположенной в специализированном помещении на территории стадиона. Для управления системой, отображения результатов и выдачи отчетов по результатам мониторинга используется АРМ в диспетчерской СМДС. Удаленный доступ к данным мониторинга проектом не предусмотрен по требованиям к информационной безопасности объекта.

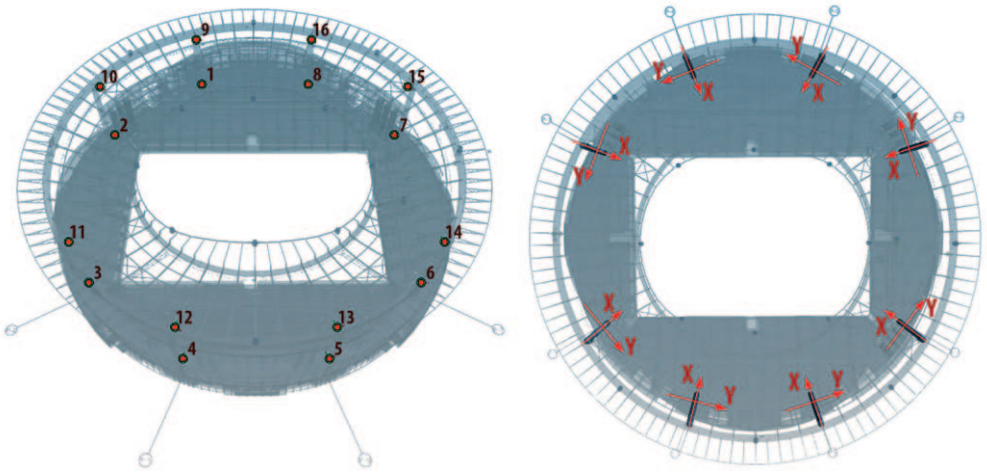
Измерительные системы

Приведем подробную информацию о функционировании измерительных систем автоматизированной системы мониторинга «Арены», компонентах системы, физических принципах, лежащих в основе производимых измерений, и о существенных деталях алгоритмов обработки данных мониторинга.

Система мониторинга угловых перемещений (кренов) состоит из 16 аналоговых двухосных микроэлектромеханических наклономеров 0S542MA0500 с токовым выходом 4–20 мА производства компании SISGEO (Италия). Мониторинг угловых перемещений с помощью наклономеров является экономически эффективным и хорошо апробированным [6–8] способом регистрации длительных деформационных процессов в зданиях.

Все наклономеры (рис. 3, *a*) установлены на боковой поверхности пилонов (рис. 4, *b*) и осу-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 3, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 3, 2022



a *b*

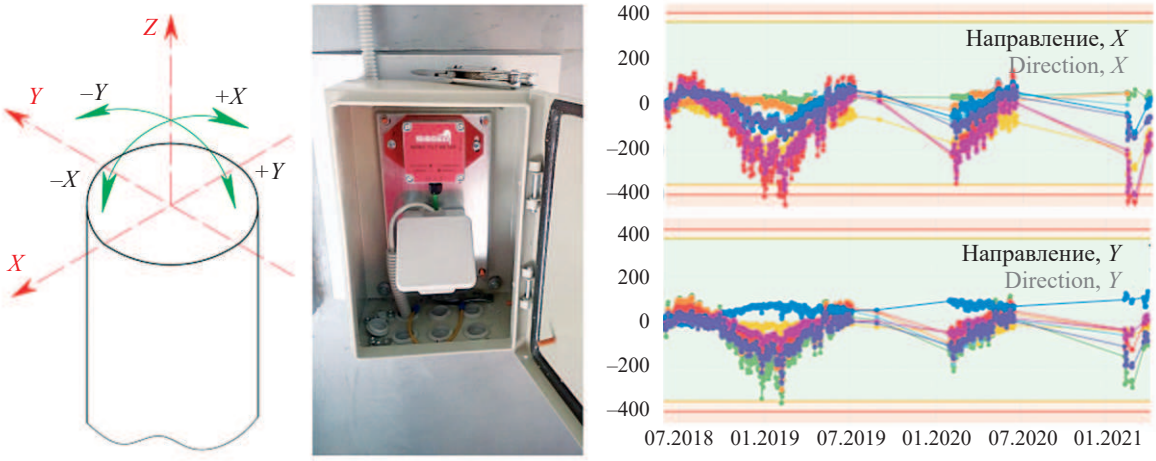
Рис. 3. Система мониторинга угловых деформаций: *a* — схема расположения наклономеров на пилонах; *b* — система координат наклономеров

Fig. 3. The tilt monitoring system: *a* — shows the arrangement diagram of tiltmeters; *b* — shows the coordinate system of tiltmeters

ществляют измерение угловых перемещений в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 4, *a*). Каждый пилон оборудован двумя датчиками, расположенными в нижней и верхней его части. Сбор данных осуществляется с помощью четырех даталоггеров Campbell Scientific CR6 (США) и периферийного оборудования. Для работы с данными мониторинга кренов в ПО была принята система координат, изображенная на рис. 3, *b*, и правило знаков, показанное на рис. 4, *a*.

Даталоггеры производят опрос наклономеров с периодом 2 мин. Результаты измерений (положение прибора относительно вектора силы тяжести) усредняются на 10-минутном интервале и передаются в базу данных мониторинга. Процедура усреднения показаний применяется для минимизации вероятности появления случайных выбросов, вызванных импульсными воздействиями на наблюдаемую конструкцию, к которым большинство наклономеров весьма чувствительно.

Из-за физической невозможности с достаточной точностью сориентировать измерительные оси наклономеров параллельно продольным осям пилонов, получить абсолютное значение угла наклона пилона, как правило, не удается. Поэтому используется метод относительных измерений, при котором система



a *b* *c*

Рис. 4. Схема мониторинга кренов пилонов: *a* — правило знаков для определения направления кренов; *b* — внешний вид наклономера в проектном положении (на боковой поверхности пилона); *c* — результаты мониторинга кренов верхней точки пилонов с 07.2018 по 01.2021, уг. с

Fig. 4. The pylon tilt monitoring diagram: *a* — shows the rule of signs used to identify the tilt of pylons; *b* — shows the tiltmeter (on the side surface of a pylon); *c* — shows the monitoring results of the tilting pylon top from 07/2018 till 01/2021, arc. s

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 3, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 3, 2022

мониторинга отслеживает изменения положения пилонов ΔX и ΔY по сравнению с начальным «нулевым» состоянием. За нулевое принято положение, в котором пилоны находились 18.05.2018 — в момент завершения пусконаладочных работ и начала эксплуатации измерительной системы. В локальной системе координат прибора (для измерительного канала ΔY — аналогично) получим:

$$\Delta X = (X - X_0), \quad (1)$$

где X — текущий угол наклона измерительной оси X прибора по отношению к вектору силы тяжести; X_0 — угол, измеренный 18.05.2018. Температурная коррекция измерений в этом случае не требуется, так как используемые датчики являются самокомпенсирующимися.

Приведение измерений крена к системе координат (рис. 3, *b*) выполняется с помощью матрицы поворота:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ -\sin\alpha & -\cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где X и Y — преобразованные показания датчиков; X' и Y' — показания датчиков в системе координат прибора; α — угол поворота.

Для автоматизированного контроля технического состояния пилонов в ПО заданы допустимые интервалы изменения (уставки) углов крена на контролируемых отметках. Уточненных данных по расчетному крену пилонов от ветровой нагрузки, крена фундаментов и температурных климатических воздействий в процессе проведения пусконаладки системы получить не удалось, поэтому в начальный период мониторинга был использован упрощенный нормативный[4] подход, согласно которому горизонтальные предельные перемещения элементов конструкций, ограничиваемые исходя из конструктивных требований, не должны превышать $h/500$, где h — высота здания. Это перемещение соответствует углу крена $3600 \cdot atan(1/500) = 400$ угловых секунд. ПО системы мониторинга было настроено таким образом, что переход контролируемых пилонов в предаварийное или аварийное состояние происходит при достижении крена на любой отметке и в любом направлении величины, большей (по модулю), чем соответствующая уставка.

Для своевременной реакции на возможный прогрессирующий крен колонн в системе мониторинга заданы более строгие допустимые интервалы, чем предписывает СП 20: аварийная (красная) уставка задана в соответствии с максимальным допустимым угловым отклонением. Предаварийная (желтая) уставка получена умножением «красной» уставки на коэффициент 0,9 (табл. 1).

В начале 2021 г. после обработки показаний (рис. 4, *c*) было установлено, что в периоды с температурами воздуха ниже –20 °C может наблюдаться непродолжительное превышение допустимого уровня деформации большинства контролируемых пилонов, вызываемое, вероятно, температурным сжатием наружного кольца (крен направлен в сторону геометрического центра арены). Учитывая неопределенности в установлении начального положения пилонов, нулевая линия уставок была сдвинута на величину медианы кренов за весь предыдущий период наблюдений.

Табл. 1. Начальные интервалы изменения КП (уставки) для мониторинга кренов пилонов

Table 1. Initial pylon tilt thresholds used to monitor the tilt of pylons

Состояние КЭ Controlled element condition	Угол крена δ, уг. с Tilt angle δ, arc. s
Нормальное Normal	$\lvert\delta\rvert \le 360$
Предаварийное Pre-emergency	$360 < \lvert\delta\rvert \le 400$
Аварийное Emergency	$\lvert\delta\rvert > 400$

Система мониторинга деформаций состоит из 128 струнных датчиков деформации — тензометров SISGEO 0VK4000VS00 (Италия). Система производит автоматизированный мониторинг изменения деформации, напряжений и компонентов внутренних усилий относительно момента времени, в который снимаются «нулевые» замеры, являющиеся отправной точкой при анализе изменений НДС. Используется общепринятый [9, 10] подход, при котором тензометры объединяются в измерительные группы — створы (рис. 5, *a*). Каждый створ состоит из четырех тензометров, приваренных к стенкам кольцевых балок в осевом (окружном) направлении, на известном расстоянии от центра тяжести поперечного сечения (рис. 6, *a*). Такое расположение датчиков является компромиссом между обеспечением механической сохранности приборов и получением релевантных измерений, хотя и не оптимально с точки зрения теории упругости.

Даталоггеры CR6 производят последовательный опрос тензометров с периодом 30 мин. Осреднение не применяется из-за низкой чувствительности струнной технологии к импульсным воздействиям.

В предположении об упругой работе балок возможно по известной деформации в точках установки тензометров произвести расчет механических напряжений в любой точке сечения и определить внутренние усилия — продольную силу N и два из-

[4] СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия.

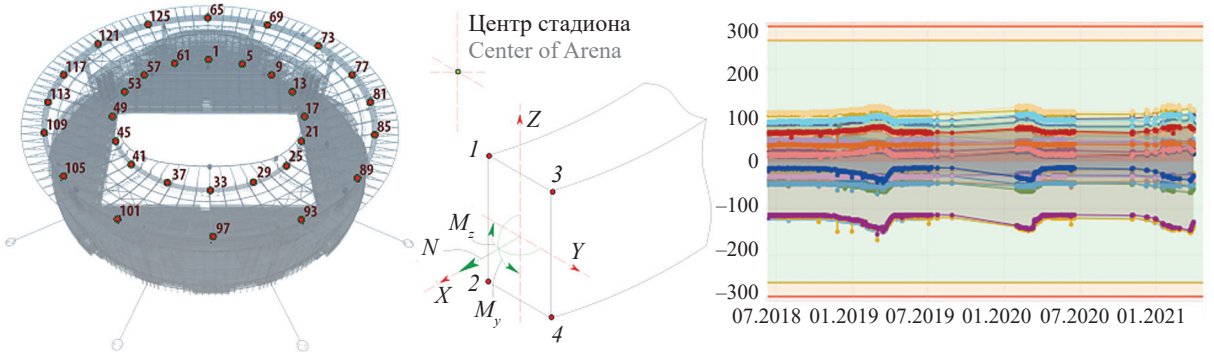


Рис. 5. Система мониторинга деформаций: *a* — схема расположения створов с тензометрами на кольцевых балках; *b* — система внутренних усилий, нумерация точек расчета напряжений и правило знаков в сечении кольцевых балок; *c* — результаты мониторинга напряжений в точках 1 контролируемых сечений с 07.2018 по 01.2021, МПа

Fig. 5. The strain monitoring system: *a* — shows strain gauge groups on circular beams; *b* — shows internal forces, numbered stress analysis points, and the rule of signs in the section of circular beams; *c* — shows the stress monitoring results from 07/2018 till 01/2021 at points 1 of the controlled sections, MPa

гибающих момента — M_y и M_z, действующие во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 5, *b*):

$$\begin{cases} N = N_0 + \Delta N; \\ M_y = M_{y0} + \Delta M_y; \\ M_z = M_{z0} + \Delta M_z, \end{cases} \quad (3)$$

где N_0, M_{y0} и M_{z0} — действующие на момент начала мониторинга 25.05.2018 «нулевые» значения внутренних усилий в точках расположения датчиков; ΔN, ΔM_y и ΔM_z — приращения внутренних усилий в произвольный момент времени, вычисляемые автоматически с помощью ПО системы по следующей схеме:

1. По измеренным деформациям в отдельных точках сечения ε_1, ε_2, ε_3, и ε_4 (рис. 6, *a*) на основе классической гипотезы плоских сечений Эйлера – Бернулли определяется эпюра деформации. Избыточная измерительная схема, состоящая из четырех датчиков, позволяет более точно позиционировать плоскость эпюры в пространстве, но приводит к необходимости минимизировать невязки (рис. 6, *b*), вызванные неизбежными погрешностями измерений и неучитываемыми локальными эффектами. Мини-

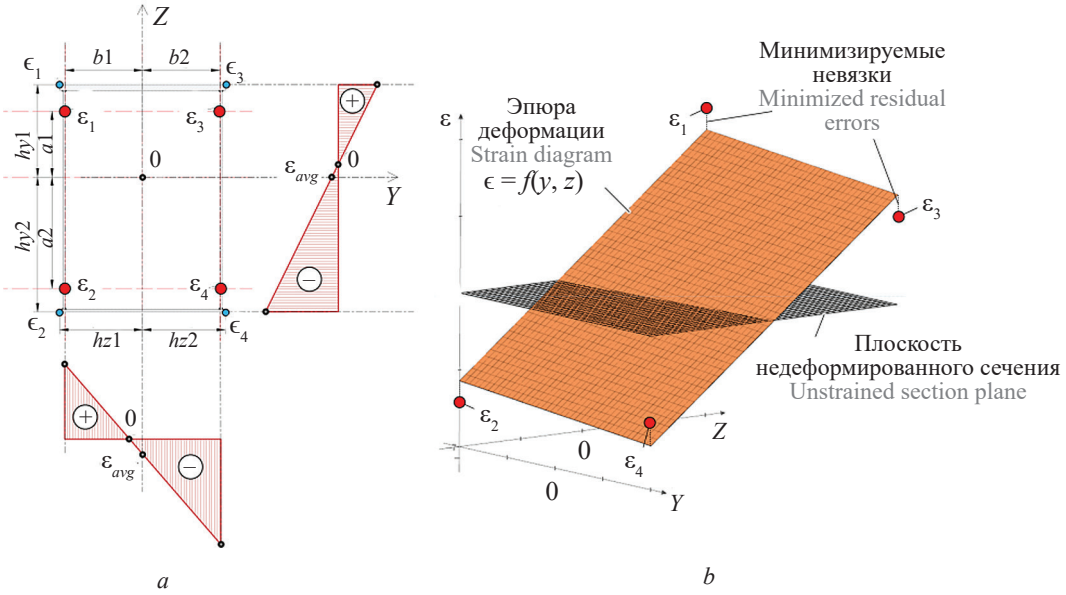


Рис. 6. Система мониторинга деформаций: *a* — схема расположения тензометров (красные точки) в сечении кольцевых балок. Показаны сечения эпюры деформации, проведенные через главные центральные оси; *b* — схема аппроксимации эпюры деформаций в сечениях кольцевых балок

Fig. 6. The strain monitoring system: *a* — shows the arrangement of strain gauges (red dots) in the cross-section of circular beams. Strain diagrams, crossing principal axis sections are shown; *b* — is the approximation layout for a strain diagram of circular beams

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 3, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 3, 2022

мизация невязок выполняется методом наименьших квадратов. Результатом данного этапа расчета является аналитическое представление эпюры деформации в рассматриваемом сечении в виде $\epsilon = f(y, z)$, где ϵ — продольная деформация в произвольной точке сечения с координатами (y, z); f — уравнение плоскости в пространственных координатах.

2. Полученная аналитическая эпюра позволяет определить экстремальные значения деформаций ϵ_1, ϵ_2, ϵ_3, и ϵ_4, которые достигаются в угловых точках 1–4 (рис. 5, *b*) рассматриваемого сечения.

3. В соответствии с законом Гука по вычисленным деформациям в угловых точках сечения производится расчет приращений нормальных напряжений $\Delta\sigma_N$, $\Delta\sigma_{My}$ и $\Delta\sigma_{Mz}$, вызванных растяжением-сжатием и изгибом балок в ортогональных плоскостях соответственно, а также суммарных экстремальных напряжений σ_1, σ_2, σ_3 и σ_4.

4. Приращения нормальных напряжений интегрируются по площади поперечного сечения в соответствии с известными законами механики твердого деформируемого тела для получения искомых приращений компонентов внутренних усилий.

Нулевые значения внутренних усилий в контролируемых сечениях были получены специалистами ООО «СтальПроект» путем расчета пространственной КЭ-модели стадиона в геометрически нелинейной постановке с учетом порядка монтажа, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности, от сочетания постоянных и длительно действующих нагрузок.

Автоматический расчет напряжений и внутренних усилий в сечениях колец производится только при исправности всех датчиков деформации в створе. При отключении или повреждении хотя бы одного датчика в створе расчет параметров балок прекращается вплоть до устранения неисправностей измерительного оборудования.

Для автоматизированного контроля технического состояния кольцевых балок в ПО заданы допустимые интервалы изменения нормальных напряжений σ_1, σ_2, σ_3 и σ_4 в контролируемых сечениях. Уставки для внутренних усилий в системе мониторинга не задаются, так как различные комбинации внутренних усилий могут привести к появлению одних и тех же напряжений в сечении.

Как и в случае с мониторингом кренов, для своевременной реакции на возможный прогрессирующий рост напряжений в ПО заданы более строгие допустимые интервалы: аварийная уставка получена умножением минимального условного предела текучести материала кольцевых балок (325 МПа) на коэффициент 0,9. Предаварийная уставка получена умножением минимального предела текучести материала кольцевых балок на коэффициент 0,8.

ПО системы мониторинга настроено таким образом, что переход контролируемых элементов кольцевых балок покрытия в предаварийное или аварийное состояние происходит при достижении напряжений в любой точке контролируемых сечений величины, большей (по модулю), чем соответствующая уставка (табл. 2).

Табл. 2. Начальные интервалы изменения КП (уставки) для мониторинга деформаций (напряжений) кольцевых балок

Table 2. Initial stress thresholds for the controlled parameters needed to monitor strains in circular beams

Состояние КЭ Controlled element condition	Нормальное напряжение σ_i, МПа Normal stress σ_i, MPa
Нормальное Normal	$\lvert\sigma_i\rvert \le 260$
Предаварийное Pre-emergency	$260 < \lvert\sigma_i\rvert \le 290$
Аварийное Emergency	$\lvert\sigma_i\rvert > 290$

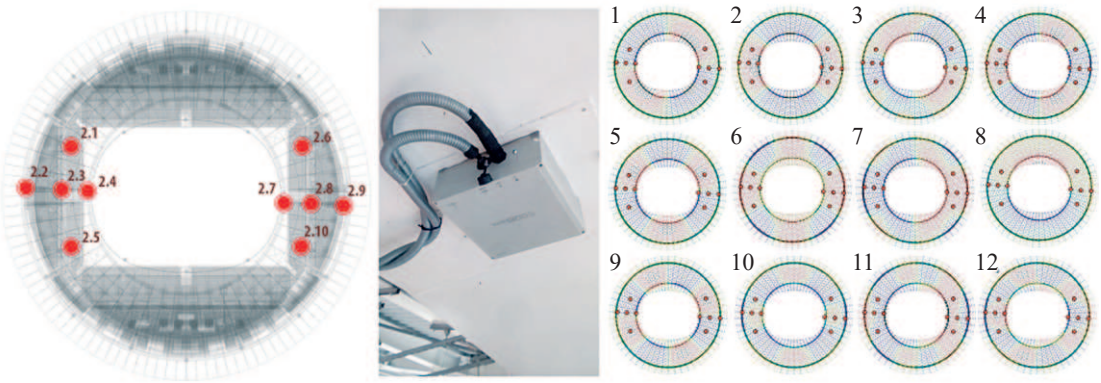
ПО позволяет в любой момент получить доступ к текущим и историческим значениям напряжений σ_i, внутренних усилий N, M_y и M_z, приращениям деформаций ε_i в точках установки датчиков. В дополнение к указанным выше величинам производится регистрация частот колебаний струн тензометров и их температуры, не подвергающиеся никакой математической обработке, — сохранение «сырых» данных мониторинга всегда является крайне желательным для диагностики нештатных ситуаций в работе автоматизированной системы.

Результаты мониторинга кольцевых балок в период с 07.2018 по 01.2021 показали (рис. 5, *c*), что напряжения в наиболее опасных точках сечений находятся глубоко в «зеленой» зоне.

Система контроля колебаний (динамического мониторинга) состоит из 10 трехкомпонентных акселерометров СОДИССТОР SDA-1 (РФ). Акселерометры в автоматизированном режиме осуществляют синхронное измерение ускорений колебаний конструкций покрытия в трех взаимно перпендикулярных направлениях *X*, *Y* и *Z* с частотой 200 Гц. Проектное положение измерительных пунктов с акселерометрами показано на рис. 7.

Количество и места установки акселерометров выбраны таким образом, чтобы для первых 12 низших форм собственных колебаний приборы оказывались расположены вне узловых точек (амплитуда колебания которых по рассматриваемой форме равна нулю), а по разности фаз колебаний можно было бы легко идентифицировать конкретную форму колебаний (рис. 7, *c*). Такое расположение датчиков позволяет получить исходные данные для калибровки расчетной модели [11, 12] и производить полный

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 3, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 3, 2022



a *b* *c*

Рис. 7. Система динамического мониторинга: *a* — схема расположения акселерометров на кольцевых балках; *b* — внешний вид акселерометра в проектном положении (на нижней полке кольцевой балки); *c* — мозаики перемещений по первым 12 формам собственных колебаний, совмещенные с точками расположения акселерометров

Fig. 7. The vibration monitoring system: *a* — shows the arrangement of accelerometers on circular beams; *b* — shows the external appearance of an installed accelerometer; *c* — shows displacement patterns based on the first 12 mode shapes overlaid with points of accelerometers

анализ колебательного процесса на покрытии как во временной, так и в частотной области [13].

Автоматизированный контроль технического состояния покрытия осуществляется на основании известного принципа постоянства ряда динамических характеристик, в частности — спектра частот собственных колебаний [14–17]. ПО системы мониторинга в непрерывном режиме производит спектральное преобразование последовательных 10-минутных (для получения достаточного частотного разрешения) записей колебательного процесса для каждого измерительного канала каждого акселерометра. Далее, в частотном диапазоне 0,5–1,5 Гц выполняется поиск пяти первых спектральных пиков, соответствующих частотам собственных колебаний сооружения. Характеристики пиков сравниваются с уставками (табл. 3), которые назначены вручную путем спектрального анализа колебаний, зарегистрированных в апреле 2018 г. в рамках выполнения пусконаладочных работ. Схема назначения уставок показана на рис. 8 — спектральный пик в процессе эксплуатации «Арены» должен всегда идентифицироваться внутри «окон», отмеченных красными рамками. Допустимый интервал изменения собственных частот, не приводящий к срабатыванию тревожного оповещения, совпадает с шириной «окна», и эмпирически (в работе [1] показано, что положения ГОСТ 31937-2011 в отношении динамического мониторинга неприменимы на практике) принят равным ±0,05 Гц.

Отметим, что в рассматриваемом случае выход спектрального пика за установленные пределы из-за недостаточной изученности процесса [18–21] не рассматривается как аварийная ситуация, а служит лишь индикатором необходимости произвести расследование причин изменения динамических характеристик.

Система геодезического мониторинга (контроля перемещений) выполняет наблюдение за планово-высотными перемещениями покрытия стадиона. Главным компонентом системы является роботизированный тахеометр Leica TM-30 (Швейцария), который каждый час производит автома-

Табл. 3. Начальные уставки для контроля частот собственных колебаний покрытия (выборочно)

Table 3. Initial thresholds for natural frequencies (on a selective basis)

Номер акселерометра Accelerometer No.	Направление Direction	Средняя частота, Гц Mean frequency, Hz	Допустимое отклонение, Гц Acceptable deviation, Hz
2.1	*X*, *Y*, *Z*	0,61	0,05
2.1	*X*, *Y*, *Z*	0,91	0,05
2.1	*X*, *Y*, *Z*	0,97	0,05
2.1	*X*, *Y*, *Z*	1,01	0,05
2.1	*X*, *Y*, *Z*	1,07	0,05

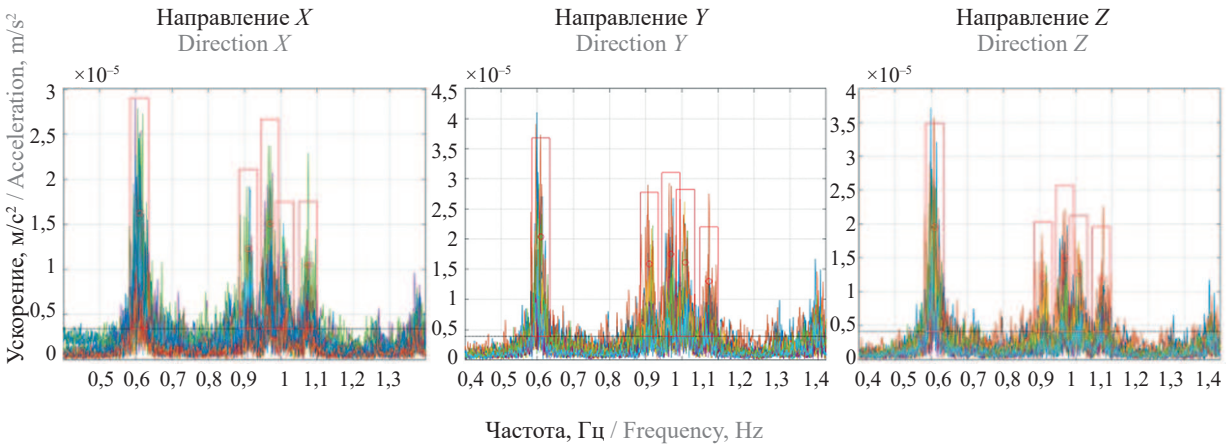


Рис. 8. Спектральный состав колебаний в точке 2,1, полученный в апреле 2018 г.

Fig. 8. The vibration spectrum obtained at point 2.1 in April 2018

тическую съемку 15 деформационных марок типа Leica GPR112 (рис. 10, *a*), установленных на кольцевых балках (рис. 9, *a*).

Тахеометр установлен на наружном кольце (рис. 9, *b*) в зоне активных деформаций, поэтому корректировка его собственного положения производится с помощью ГНСС-приемника Leica GMX901, совмещенного с измерительным пунктом (рис. 10, *b*), и опорной деформационной марки (призмы № 1 6), установленной на конструкциях трибун. ГНСС-приемник рассчитывает собственные координаты с опорой на базовую ГНСС-станцию, смонтированную на глубинном репере на прилегающей к стадиону территории (рис. 9, *b*).

Введение поправок на климатические условия при тахеометрической съемке выполняется на основе показаний двух комбинированных датчиков температуры и давления, расположенных на противоположных сторонах Арены (рядом с тахеометром и в точке № 16).

Специалистами ООО «СтальПроект» путем расчета пространственной КЭ-модели стадиона в геометрически нелинейной постановке с учетом порядка монтажа, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности, получены максимальные u_z^{max} и минимальные u_z^{min} вертикальные перемещения кольцевых балок в контрольных точках от возможных сочетаний постоянных и длительно действующих нагрузок. Расчетный размах перемещений $|u_z^{max} - u_z^{min}|$ составил 33–222 мм, при этом фактический средний суточный размах вертикальных перемещений, полученный по результатам автоматизированного геодезического мониторинга в период пусконаладочных работ, составлял до 10 % от расчетного. Такая деформативность покрытия не позволяла с приемлемой точностью определить «начальное» положение контрольных точек, поэтому для задания в ПО системы мониторинга допустимых перемещений деформационных марок (уставок) использован упрощенный подход. Пред-

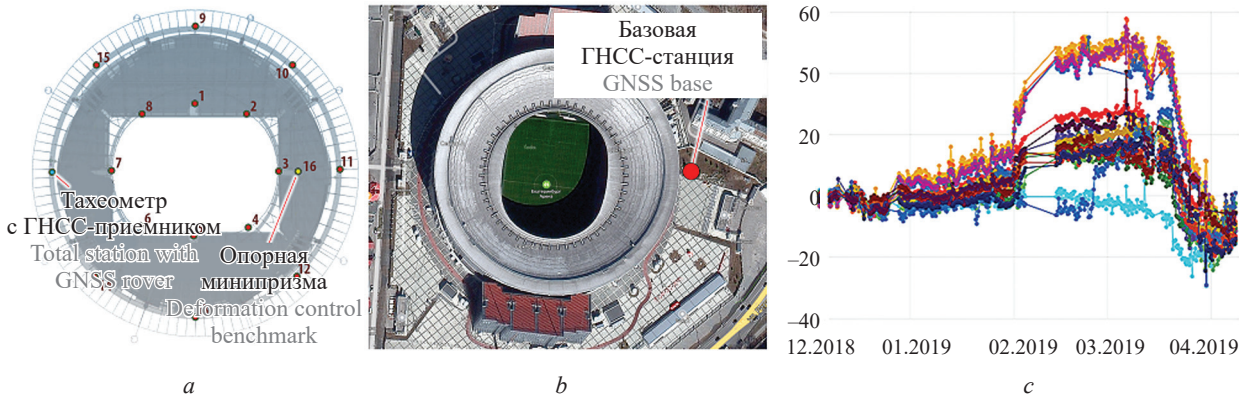
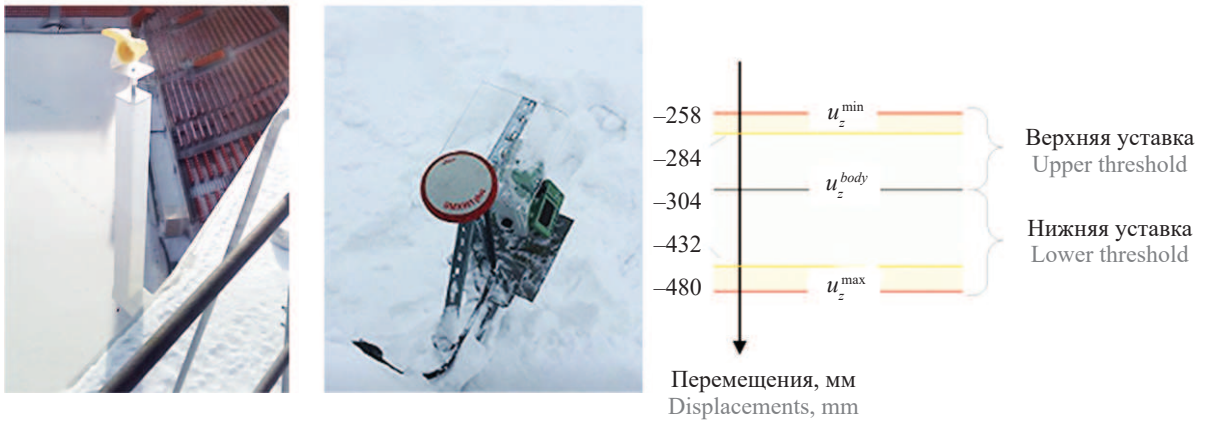


Рис. 9. Схема расположения оборудования системы геодезического мониторинга: *a* — деформационных марок № 1–15 и роботизированного тахеометра на конструкциях покрытия, опорной марки № 16 на конструкциях трибун; *b* — базовой ГНСС-станции на прилегающей территории; *c* — результаты мониторинга вертикальных перемещений деформационных марок с 12.2018 по 04.2019, мм

Fig. 9. The arrangement of instruments comprising the geodetic monitoring system: *a* — shows deformation control benchmarks 1–15 and a motorized total station on the structures of the covering, benchmark 16 on tribune structures; *b* — shows the GNSS base in the adjacent area; *c* — shows the monitoring results of vertical displacements from 12/2018 till 04/2019, mm

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 3, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 3, 2022



a *b* *c*

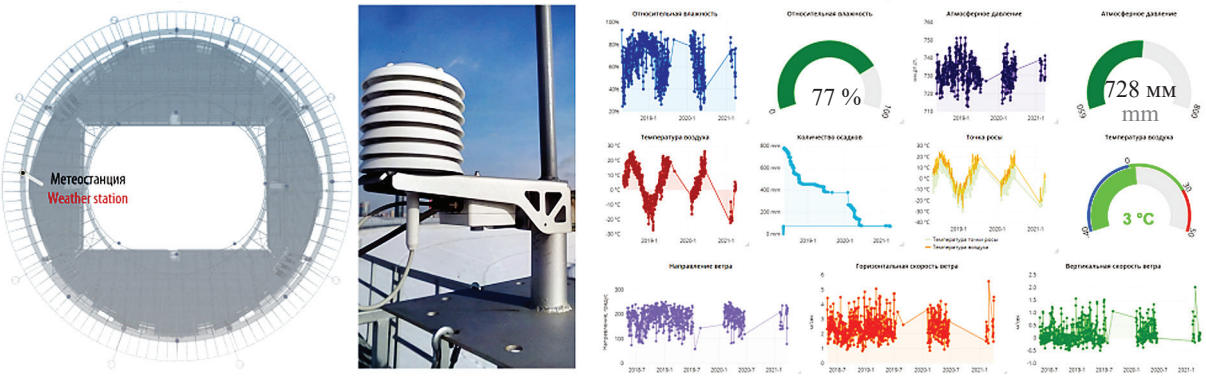
Рис. 10. Система геодезического мониторинга: *a* — деформационная марка 5 на конструкциях внутреннего кольца; *b* — тахеометр, совмещенный с ГНСС-приемником; *c* — схема назначения уставок для деформационной марки № 1

Fig. 10. The displacement monitoring system: *a* is deformation control benchmark 5; *b* is the total station with a GNSS rover; *c* is the threshold layout deformation control benchmark 1

полагается, что в начальный период мониторинга прогиб колец u_z^{body} (рис. 10, *c*) вызван исключительно собственным весом конструкций покрытия, а все изменения положения контролируемых точек вызваны действием временных нагрузок. В дальнейшем положение нулевой линии, выбранное на начальном этапе мониторинга «полуэмпирически», будет скорректировано на основании статистической обработки результатов наблюдений.

Дополнительно для получения абсолютных координат контролируемых точек в местной системе г. Екатеринбург 1 сентября 2018 г. специализированной организацией был выполнен комплекс геодезических работ по привязке в единую локальную сеть деформационных марок, измерительных пунктов с ГНСС-станциями и тахеометром. Сеть создавалась комбинированием спутниковых наблюдений и замкнутого теодолитного хода.

Система погодного мониторинга включает в себя мультисенсорную метеостанцию с ультразвуковым трехкомпонентным анемометром Gill Instruments MetPak RG/WindMaster Pro (Великобритания), установленную на наружном кольце (рис. 11, *a*, *b*). Метеостанция каждые 30 мин регистрирует температуру воздуха, влажность, атмосферное давление, направление и скорость ветра, и количество осадков (рис. 11, *c*). Накопленный различными исследователями опыт наблюдений за высотными и большепролетными конструкциями показывает, что параметры НДС [22, 10, 23, 24] и метрологические характеристики датчиков [25] демонстрируют высокую степень корреляции с параметрами окружающей среды, поэтому погодный мониторинг позволяет отделять изменения параметров, связанных с деградацией строительных конструкций, от сезонных и климатических изменений.



a *b* *c*

Рис. 11. Система погодного мониторинга: *a* — расположение метеостанции на конструкциях покрытия; *b* — внешний вид метеостанции в проектном положении; *c* — информационная панель ПО с данными мониторинга метеопараметров

Fig. 11. The weather monitoring system: *a* is the location of the weather station on the structure of the covering; *b* is the appearance of the weather station; *c* is the data panel showing environmental monitoring information

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Успешная работа над внедрением СМДС «Екатеринбург Арена» показала, что теоретически и методически обоснованный выбор топологии системы, КЭ, качественного измерительного оборудования и допустимых отклонений КП в совокупности с проблемно-ориентированным программным обеспечением (рис. 12) позволяет создать единую информационную среду долговременного мониторинга уникальных объектов, которая при условии компетентной эксплуатации становится ценным источником исходных данных для разработки автоматизированных методов выявления и локализации дефектов строительных конструкций, совершенствования методов расчета и проектирования, обновления нормативной базы, автоматизированного планирования предупредительных ремонтов, инструментальных обследований и решения других наукоемких задач. В составе СМДС «Арены» разработаны:

- база данных оборудования, содержащая информацию о калибровочных коэффициентах и «нулевых» замерах, эксплуатационную документацию и фотографии приборов;
- база КЭ, включающая типы конструкций, деформационные характеристики материалов, геометрические характеристики сечений, координаты точек установки датчиков;
- модули обработки «сырых» данных, реализующие правила расчета КП;
- представление информации в виде графиков, индикаторов на 3D-модели;
- мнемосхемы с правилами определения знаков (направлений) внутренних усилий и перемещений, с точками расчета напряжений;
- система оповещения оперативного персонала о нештатных ситуациях.

Работа над автоматизацией оповещения оперативного персонала о нештатных ситуациях показала необходимость выделения периода опытно-промышленной эксплуатации СМДС, минимальной продолжительностью в один календарный год, в течение которого выбор диапазонов допустимых отклонений КП (уставок) должен осуществляться согласно требованиям действующих нормативных документов в совокупности с результатами математического (конечно-элементного) моделирования работы строительных конструкций. После завершения периода опытно-промышленной эксплуатации СМДС уставки должны пересматриваться путем статистической обработки накопленных данных.

При использовании измерительных технологий, осуществляющих мониторинг изменений параметров сооружения по сравнению с некоторым начальным состоянием, фактическое НДС в момент начала инструментальных наблюдений предложено устанавливать в результате конечно-элементного моделирования линейной работы сооружения под действием комбинации нормативных постоянных и длительных временных нагрузок с коэффициентами сочетания, равными единице, без учета коэффициента надежности по ответственности.

Установлено, что наиболее значительным фактором изменения НДС конструкций покрытия Арены является изменение температуры окружающей среды.



Рис. 12. Пользовательский интерфейс SODIS Building M 4.0, сконфигурированный для управления системой мониторинга «Екатеринбург Арены»

Fig. 12. The SODIS Building M 4.0 user interface, adopted for the SHM system of Ekaterinburg Arena

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 3, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 3, 2022

Апробирована методика определения внутренних усилий на основе тензометрического метода с избыточностью измерительной схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Накопленный специалистами «СОДИС ЛАБ» опыт выполнения работ по мониторингу НДС при сопровождении строительства и эксплуатации крупных строительных объектов позволяет выделить ряд системных проблем, требующих проработки сначала на уровнях научно-исследовательских и проектно-изыскательских организаций, а затем — дальнейшего закрепления в виде нормативных документов. В частности, существующие технологии определения ключевых параметров НДС конструкций (перемещений, внутренних усилий, напряжений) на основе обработки результатов измерений основаны на классических принципах механики твердого деформируемого тела и, на первый взгляд, хорошо известны. Однако с целью полной автоматизации расчетов параметров сооружений для реальных строительных конструкций дополнительно необходимо решить ряд наукоемких задач на стыке науки о больших данных (Data Science) и общестроительных инженерных дисциплин. Специалисты с подобной комбинацией навыков — огромный дефицит, что сильно тормозит технологические возможности отрасли.

Большой проблемой для систем мониторинга технически сложных и уникальных зданий является отсутствие культуры их эксплуатации. Технические службы собственников подобных объектов в настоящее время не обладают необходимыми уровнями компетенций, из-за чего мониторингу — длительному и монотонному процессу — наносится значительный ущерб. На рис. 4, *с*; 5, *с* показаны результаты мониторинга некоторых параметров сооружения, где хорошо заметны длительные разрывы данных, вызванные «человеческим фактором» — вероятно, система регистрации периодически непреднамеренно обесточивалась, а диспетчерская служба по неустановленным причинам игнорировала диагностическую информацию на АРМ. Эта проблема встречается повсеместно, бороться с ней пока удается лишь подготовкой профильных специалистов, либо передавая эксплуатацию в руки специализированных организаций.

В профессиональном сообществе работы по мониторингу принято разделять на геотехнический (ГТМ), технический и автоматизированный мониторинг (СМИК, СМДС, АСДК), которые регламентируются различными нормативными документами и выполняются либо «автономно», либо наоборот — дублируют друг друга. Опыт показывает, что эффективно решать задачи по обеспечению безопасности строительных объектов можно только посредством объединения всех видов мониторинга в логически, технологически и организационно связанный комплекс работ. В противном случае безвозвратно утрачивается преемственность, непрерывность и целостность измерений, что часто только увеличивает неопределенность и затрудняет инженерную интерпретацию получаемых данных, делает невозможным принятие обоснованных организационных решений по ремонту, усилению, проведению контраварийных мероприятий. Правилом с крайне редкими исключениями является практика привлечения различных исполнителей работ по мониторингу на отдельных этапах ЖЦ зданий и сооружений, что в корне ломает концепцию связности. Мы полагаем, что выходом, не противоречащим традиционному укладу, может стать создание единой мультидисциплинарной информационной системы обеспечения мониторинга следующего поколения, которая даст возможность всем исполнителям в структурированном виде аккумулировать результаты всего комплекса полевых наблюдений, начиная с самых ранних стадий строительства. К сожалению, для возможности практического внедрения такого подхода существующим на рынке программно-аппаратным решениям сильно не хватает функциональности. Усилия команды разработчиков «СОДИС ЛАБ» в настоящее время сконцентрированы на доведении программных продуктов до состояния, при котором станет возможна реализация подобного пилотного проекта. Добавляются возможности:

- развертывания в полевых условиях с отсутствующей инфраструктурой (нет совсем или отсутствует стабильное электропитание, экстремальные параметры окружающей среды);
- развертывания «в облаке» или локальной установке в штабе строительства с возможностью аварийного восстановления IT-инфраструктуры (Disaster Recovery);
- передачи данных наблюдений, производимых вручную, на периодической основе, в том числе для ручного их ввода на площадке строительства, используя смартфоны, планшеты, КПК и другие электронные терминалы;
- для автоматизированного распознавания содержимого отсканированных протоколов;
- для автоматической обработки содержимого карт памяти (даталоггеров, тахеометров, лазерных сканеров и т.п.);
- для автоматизированной идентификации измерительного прибора по тегу, цифровой метке, коду (QR-code, barcode, RFID);
- создания единой архивной среды для хранения отчетной документации по мониторингу (отчеты о наблюдениях, данных полевых и лабораторных исследований, отчетов по НТС);
- хранения цифрового регламента наблюдений — сервиса-календаря с автоматической постановкой задач по снятию измерений, контролю

исполнения этих задач и автоматизированной подготовкой отчетной документации;

• геоинформационного сервиса опорной сети системы геодезических наблюдений, содержащего информацию о реперных пунктах, их расположении, координатах и устройстве;

• сервиса для хранения результатов фотофиксации начальных несовершенств, дефектов и повреждений строительных конструкций в рамках входного контроля при производстве НТС, проведении периодических визуальных обследований;

• разработки интегрированных с единой информационной средой web-инструментов для решения частных задач по мониторингу конструкций: определения деформаций ограждающих конструкций котлована по показаниям скважинных инклинометров, построения изополей осадок при производстве геодезических работ по мониторингу основания и фундаментов, построения изополей кренов фундаментных конструкций по показаниям наклономеров, уравнивания геодезических сетей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А.* Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на Олимпийских объектах Сочи-2014 // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 92–105. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.12.92-105

2. *Li H., Yuan C., Ren L., Jiang T.* Structural health-monitoring system for roof structure of the Dalian gymnasium // Advances in Structural Engineering. 2019. Vol. 22. Issue 7. Pp. 1579–1590. DOI: 10.1177/1369433218819572

3. *Zhou X.J., Yang R.Q., Ma X., Xu Y.* Application of health monitoring technology in steel structure engineering of Jinan Olympic Sports Center // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 578–579. Pp. 1170–1176. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.578-579.1170

4. *Травуш В.И., Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А., Шахворостов А.И., Десяткин М.А., Шулятьев О.А. и др.* «Лахта Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 94–108. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-94-108

5. *Шахраманьян А.М.* Методические основы создания систем мониторинга несущих конструкций уникальных объектов // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. № 1. С. 256–261.

6. *Снежков Д.Ю., Леонович С.Н.* Автоматизированный мониторинг состояния несущих конструкций зданий // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2017. № 1 (103). С. 92–97.

7. *Багмет А.Л., Осика В.И., Костин А.Б., Титчев Н.И., Трудненко А.И.* Деформационный мониторинг здания гостиницы Националь // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 4. С. 55–63.

8. *Borlenghi P., D'Angelo M., Ballio F., Gentile C.* Continuous monitoring of masonry arch bridges to evaluate the scour action // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 200. Pp. 400–408. DOI: 10.1007/978-3-030-91877-4_46

9. *Wang X., Ran Y., Zhu Y.* Research on health monitoring for large span steel structures // Earth and Space 2021 : Materials, Structures, Dynamics, and Control in Extreme Environments — Selected Papers from the 17th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Seattle, 2021. Pp. 507–516.

10. *Park H.S., Lee H.Y., Choi S.W., Kim Y.* A practical monitoring system for the structural safety of mega-trusses using wireless vibrating wire strain gauges // Sensors. 2013. Vol. 13. Issue 12. Pp. 17346–17361. DOI: 10.3390/s131217346

11. *Di Re P., Lofrano E., Ciambella J., Romeo F.* Structural analysis and health monitoring of twentieth-century cultural heritage: The Flaminio Stadium in Rome // Smart Structures and Systems. 2021. Vol. 27. Issue 2. Pp. 285–303. DOI: 10.12989/sss.2021.27.2.285

12. *Teng J., Zhu Y.H., Zhou F., Li H., Ou J.P.* Finite element model updating for large span spatial steel structure considering uncertainties // Journal of Central South University of Technology. 2010. Vol. 17. Issue 4. Pp. 857–862. DOI: 10.1007/s11771-010-0567-4

13. *Caprioli A., Vanali M., Cigada A.* One year of structural health monitoring of the Meazza Stadium in Milan : Analysis of the collected data // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 2009.

14. *Гурьев В., Дорофеев В., Лысов Д., Акбиев Р.* Основы мониторинга строительных объектов в период эксплуатации с использованием анализа изменения их динамических параметров // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 3. С. 89–100. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-89-10

15. *Шахраманьян А.М.* Локализация мест изменения напряженно-деформированного состояния строительных конструкций на основе данных вибродиагностических измерений // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 54–66. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.9.54-66

16. *Шаблинский Г.Э., Зубков Д.А.* Натурные динамические исследования строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2009. 216 с.

17. *Diord S., Magalhães F., Cunha Á., Caetano E., Martins N.* Automated modal tracking in a football

stadium suspension roof for detection of structural changes // Structural Control & Health Monitoring. 2017. Vol. 24. Issue 11. DOI: 10.1002/stc.2006

18. *Cigada A., Caprioli A., Redaelli M., Vanali M.* Vibration testing at Meazza stadium : Reliability of operational modal analysis to health monitoring purposes // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2008. Vol. 22. Issue 4. Pp. 228–237. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:4(228)

19. *Peeters B., De Roeck G.* One-year monitoring of the Z24-bridge: Environmental effects versus damage events // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2001. Vol. 30. Issue 2. Pp. 149–171. DOI: 10.1002/1096-9845(200102)30:2<149::AID-EQE1>3.0.CO;2-Z

20. *De Roeck G.* The state-of-the-art of damage detection by vibration monitoring: The SIMCES experience // Journal of Structural Control. 2003. Vol. 10. Issue 2. Pp. 127–134. DOI: 10.1002/stc.20

21. *Lucà F., Manzoni S., Cigada A.* Vibration-based damage feature for long-term structural health monitoring under realistic environmental and operational variability // Structural Health Monitoring Based on Data Science Techniques. 2021. Pp. 289–307. DOI: 10.1007/978-3-030-81716-9_14

22. *Фарфель М.И., Гукова М.И., Кондратов Д.Ю., Коняшин Д.Ю.* Апробированная методика проведения мониторинга в зданиях и сооружениях // Вестник НИЦ. Строительство. 2021. № 1 (28). С. 110–123. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-1(28)-110-123

23. *Kita A., Cavalagli N., Ubertini F.* Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 120. Pp. 180–202. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.021

24. *Martins N., Caetano E., Amador S., Magalhães F., Cunha T.* Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response // Engineering Structures. 2014. No. 59. pp. 80-94. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.10.021

25. *Peng L., Jing G., Yun L., Qingyun Y., Wang Y., Zhang B.* Temperature and strain correlation of bridge parallel structure based on vibrating wire strain sensor // Sensors. 2020. Vol. 20. Issue 3. P. 658. DOI: 10.3390/s20030658

Поступила в редакцию 24 января 2022 г.
Принята в доработанном виде 23 марта 2022 г.
Одобрена для публикации 23 марта 2022 г.

Об авторах: **Юрий Александрович Колотовичев** — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; директор по научной работе; **СОДИС ЛАБ**; 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Нобеля, д. 5; РИНЦ ID: 829386, Scopus: 57209541589, ORCID: 0000-0002-4030-2893, ResearcherID: AAC-3892-2022; ykol@sodislab.com;

Андрей Михайлович Шахраманьян — кандидат технических наук, генеральный директор; **СОДИС ЛАБ**; 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Нобеля, д. 5; РИНЦ ID: 478927, Scopus: 57217098689, info@sodislab.com.

Вклад авторов:

Колотовичев Ю.А. — идея, сбор и обработка материала, написание исходного текста, подготовка иллюстраций.

Шахраманьян А.М. — научное редактирование текста, обзор существующих разработок, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Experience of using automated monitoring systems of the strain state of bearing structures on the Olympic Objects Sochi-2014. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 12:92-105. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.12.92-105 (rus.).

2. Li H., Yuan C., Ren L., Jiang T. Structural health-monitoring system for roof structure of the Dalian gymnasium. *Advances in Structural Engineering*. 2019; 22(7):1579-1590. DOI: 10.1177/1369433218819572

3. Zhou X.J., Yang R.Q., Ma X., Xu Y. Application of health monitoring technology in steel structure engineering of Jinan Olympic Sports Center. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 578-579:1170-1176. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.578-579.1170

4. Travush V.I., Shakhramanyan A.M., Kolotovichev Y.A., Shakhvorostov A.I., Desyatkin M.A., Shulyatyev O.A. et al. Lakhta Center: Automated structural and geotechnical health monitoring. *Academia. Architecture and Construction*. 2018; 4:94-108. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-94-108 (rus.).

5. Shakhramanyan A.M. System of high-rise building's structural monitoring. Practice of engineering and creating. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 1(1):256-261. (rus.).

6. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. The automated monitoring of the state of load-bearing buildings structures. *Bulletin of the Brest State Technical University. Construction and architecture*. 2017; 1(103):92-97. (rus.).

7. Bagmet A.L., Osika V.I., Kostin A.B., Titchev N.I., Trudnenko A.I. Deformation monitoring of the building of the hotel national. *Seismicheskie Pribory*. 2011; 47(4):55-63. (rus.).

8. Borlenghi P., D'Angelo M., Ballio F., Gentile C. Continuous monitoring of masonry arch bridges to evaluate the scour action. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 200:400-408. DOI: 10.1007/978-3-030-91877-4_46

9. Wang X., Ran Y., Zhu Y. Research on health monitoring for large span steel structures. *Earth and Space 2021: Materials, Structures, Dynamics, and Control in Extreme Environments — Selected Papers from the 17th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*. Seattle, 2021; 507-516.

10. Park H.S., Lee H.Y., Choi S.W., Kim Y. A Practical monitoring system for the structural safety of mega-trusses using wireless vibrating wire strain gauges. *Sensors*. 2013; 13(12):17346-17361. DOI: 10.3390/s131217346

11. Di Re P., Lofrano E., Ciambella J., Romeo F. Structural analysis and health monitoring of twentieth-century cultural heritage: The Flaminio Stadium in Rome. *Smart Structures and Systems*. 2021; 27(2):285-303. DOI: 10.12989/sss.2021.27.2.285

12. Teng J., Zhu Y.H., Zhou F., Li H., Ou J.P. Finite element model updating for large span spatial steel structure considering uncertainties. *Journal of Central South University of Technology*. 2010; 17(4):857-862. DOI: 10.1007/s11771-010-0567-4

13. Caprioli A., Vanali M., Cigada A. One year of structural health monitoring of the Meazza Stadium in Milan: Analysis of the collected data. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. 2009.

14. Guryev V.V., Dorofeev V.M., Lysov D.A., Akbiev R.T. Foundations of monitoring for structural obiects during exploitation on the base of analysis of changes in its dynamic parameters. *Academia. Architecture and Construction*. 2021; 3:89-100. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-89-10 (rus.).

15. Shakhraman'yan A.M. Localization of the places of stressstrain state changes of building structures based on the vibrodiagnostic measurement data. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 9:54-66. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.9.54-66 (rus.).

16. Shablinskiy G.E., Zubkov D.A. *Full-scale dynamic studies of building structures*. Moscow, ASV, 2009; 217. (rus.).

17. Diord S., Magalhães F., Cunha Á., Caetano E., Martins N. Automated modal tracking in a football stadium suspension roof for detection of structural changes. *Structural Control & Health Monitoring*. 2017; 24(11). DOI: 10.1002/stc.2006

18. Cigada A., Caprioli A., Redaelli M., Vanali M. Vibration testing at Meazza stadium: Reliability of operational modal analysis to health monitoring purposes. *Journal of Performance of Constructed Facilities.* 2008; 22(4):228-237. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:4(228)

19. Peeters B., De Roeck G. One-year monitoring of the Z24-bridge: Environmental effects versus damage events. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2001; 30(2):149-171. DOI: 10.1002/1096-9845(200102)30:2<149::AID-EQE1>3.0.CO;2-Z

20. De Roeck G. The state-of-the-art of damage detection by vibration monitoring: The SIMCES experience. *Journal of Structural Control*. 2003; 10(2):127-134. DOI: 10.1002/stc.20

21. Lucà F., Manzoni S., Cigada A. Vibration-based damage feature for long-term structural health monitoring under realistic environmental and operational variability. *Structural Health Monitoring Based on Data Science Techniques*. 2021; 289-307. DOI: 10.1007/978-3-030-81716-9_14

22. Farfel M., Gukova M., Kondrashov D., Konyashin D. Proven methods of monitoring in buildings and structures. *Bulletin of SIC Construction*. 2021; 1(28):110-123. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-1(28)-110-123 (rus.).

23. Kita A., Cavalagli N., Ubertini F. Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019; 120:180-202. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.021

24. Martins N., Caetano E., Amador S., Magalhães F., Cunha T. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response. *Engineering Structures.* 2014; 59:80-94. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.10.021

25. Peng L., Jing G., Yun L., Qingyun Y., Wang Y., Zhang B. Temperature and strain correlation of bridge parallel structure based on vibrating wire strain sensor. *Sensors*. 2020; 20(3):658. DOI: 10.3390/s20030658

Received January 24, 2022.
Adopted in revised form on March 23, 2022.
Approved for publication on March 23, 2022.

BIONOTES: **Yury A. Kolotovichev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; R&D Director; **SODIS LAB**; 5 Nobel st., Skolkovo Innovation center, Moscow, 121205, Russian Federation; ID RISC: 829386, Scopus: 57209541589, ORCID: 0000-0002-4030-2893, ResearcherID: AAC-3892-2022, ykol@sodislab.com;

Andrey M. Shakhramanyan — Candidate of Technical Sciences, Director General; **SODIS LAB**; 5 Nobel st., Skolkovo Innovation center, Moscow, 121205, Russian Federation; ID RISC: 478927, Scopus: 57217098689; info@sodislab.com.

Contribution of the authors:

Kolotovichev Y.A. — concept, data processing, source text and illustration development.

Shakhramanyan A.M. — text editing, review of related studies, conclusions.

The authors declare no conflict of interest.